

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Інженерно-хімічний факультет  
Кафедра «Автоматизації хімічних виробництв»**

**МАГІСТЕРСЬКА ДИСЕРТАЦІЯ**

на тему: «Алгоритми інформаційної технології для імітаційного моделювання та регулювання параметрів процесу переробки вторинного нафтового дистиляту»

Виконав:

Алексєєнко С.Ю.  
студент VI курсу, IXФ  
група ЛА-61м  
залікова книжка № ЛА-6101м

Керівник магістерської дисертації:  
к. т. н., доцент Ковалевський В. М.

Київ – 2018

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Інженерно-хімічний факультет  
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматизації хімічних виробництв  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК 004.021

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ А. І. Жученко  
(підпис) (ініціали, прізвище)  
“    ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 151 - «Автоматизація та комп'ютерно-інформаційні технології»  
(код і назва)

на тему: Алгоритми інформаційної технології для імітаційного моделювання та регулювання параметрів процесу переробки вторинного нафтового дистилляту

Виконала: студентка   6   курсу, групи   ЛА-61м    
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Алексєєнко Світлана Юрїївна \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник   доц., к. т. н. Ковалєвський В. М.   \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент   д.т.н., професор Панов Є.М.   \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2018

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

Інженерно-хімічний факультет  
(повна назва)

Кафедра автоматизації хімічних виробництв  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інформаційні технології  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ А. І. Жученко  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

Алексєєно Світлани Юріївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Алгоритми інформаційної технології для імітаційного моделювання та регулювання параметрів процесу переробки вторинного нафтового дистиляту»,

науковий керівник дисертації \_\_\_\_\_ доц., к. т. н. Ковалевський В. М.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом по університету від «21» березня 2018 р. № 979-с

2. Термін подання студентом дисертації 18 травня 2018 р.

3. Об'єкт дослідження Процес переробки вторинного нафтового дистиляту

4. Предмет дослідження Математична модель процесу переробки вторинного нафтового дистиляту; алгоритми до навчального програмного пакету; імітаційне моделювання роботи контуру регулювання температури в технологічних апаратів з процесу переробки вторинного нафтового дистиляту.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Навести аналіз схеми технологічного процесу; вказати особливості перебігу процесу переробки вторинного нафтового дистиляту; розробити математичну модель об'єкта керування; моделювання алгоритмів для системи керування; створення програмного забезпечення для реалізації імітаційного модулювання роботи контуру регулювання температури; створити програмний навчальний пакет для імітаційного моделювання та регулювання параметрів процесу переробки вторинного нафтового дистиляту.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу матеріали презентації до захисту магістерської дисертації

7. Орієнтовний перелік публікацій Тези конференцій за темами: "Алгоритми для імітації значень технологічних параметрів процесу переробки нафтового дистиляту", "Прикладна програма для імітації значень технологічних параметрів процесу переробки нафтового дистиляту", "Програмний пакет для імітаційного моделювання роботи контуру регулювання з візуальним спостереженням у часі зміни параметрів", "Експорт у Excel даних з імітаційного моделювання значень параметрів до процесу технологічного апарату"

Депонована стаття на тему: «Імітаційне моделювання роботи контуру автоматичного регулювання параметру технологічного апарату».

Отримання авторського права на Дистанційну навчальну систему для вивчення технологічного обладнання, математичного моделювання та автоматизації процесу переробки вторинного нафтового дистиляту.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 29.03.2018 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Опис технологічного процесу та об'єкта керування	04.04.2018	
2	Математичне моделювання процесів в апаратах технологічної схеми переробки вторинного нафтового дистиляту	12.04.2018	
3	Розрахунки до налаштування регуляторів у контурах регулювання процесу	17.04.2018	
4	Розробка прикладного навчального пакету для імітаційного моделювання роботи контуру регулювання температури	27.04.2018	
5	Розробка стартап-проекту	04.05.2018	
6	Оформлення матеріалів до магістерської дисертації	18.05.2018	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Алексєєно С.Ю.  
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_ (підпис)

Ковалевський В. М.  
(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить дослідження до системи керування процесом переробки вторинного нафтового дистиляту та розробки алгоритмів та програмних модулів для імітаційного моделювання роботи контуру регулювання температури технологічного апарату, та оформлена у записку об'ємом 110 сторінок. Пояснювальна записка містить 51 рисунок, 36 таблиць, 25 літературних джерел в тому числі 9 публікацій автора до дисертації.

У магістерській дисертації об'єктом дослідження є процес переробки вторинного нафтового дистиляту. Предметом дослідження є математичка модель технологічних апаратів: кип'ятильника, дефлегматора та ректифікаційної колони; алгоритми до розробки прикладного навчального пакету; імітаційна модель роботи контуру регулювання температури.

У магістерській дисертації досліджено особливості роботи технологічних апаратів як об'єктів керування, для яких проведено математичний опис для синтезу системи керування температурою, та створено прикладний навчальний пакет для імітаційного моделювання та регулювання параметрів процесу переробки вторинного нафтового дистиляту.

У магістерській дисертації розроблено програмне забезпечення для реалізації алгоритмів для імітаційного моделювання процесом переробки вторинного нафтового дистиляту.

Також в магістерській дисертації було розроблено стартап-ідею щодо використання інформаційних технологій на виробництві.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** нафтовий дистилят, математична модель, об'єкт керування, контур регулювання, програмний пакет, імітаційне моделювання, регулювання параметрів.

## ABSTRACT

The master's dissertation contains research into the system of management of the process of recycling of the secondary oil distillate and the development of algorithms and software modules for simulating the operation of the temperature control circuit of the technological apparatus, and is executed in a note of 110 pages. The explanatory note contains 51 drawings, 36 tables, 25 literary sources including 9 author's papers for the dissertation.

In the master's thesis the object of research is the process of recycling of secondary oil distillate. The subject of the study is a mathematician model of technological apparatus: a boiler, reflux and a rectifying column; algorithms for the development of an applied training package; simulation model of the temperature control circuit.

In the master's thesis the features of work of technological devices as control objects for which a mathematical description for the synthesis of the temperature control system was conducted were investigated, and an application training package for simulation modeling and regulation of the parameters of the recycling process of the secondary oil distillate was created.

In the master's dissertation the software for realization of algorithms for simulation modeling of process of processing of secondary oil distillate has been developed.

Also, in the master's thesis was developed a start-idea about the use of information technology in production.

**KEY WORDS:** OIL DISTILLATE, MATHEMATICAL MODEL, CONTROL OBJECT, CONTROL REGULATION, SOFTWARE PACKAGE, SIMULATION MODELING, REGULATORY PARAMETERS.

# ЗМІСТ

стор.

ВСТУП.....	10
1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ ВТОРИННОГО НАФТОВОГО ДИСТИЛЯТУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ .....	11
1.1. Опис схеми технологічного процесу переробки вторинного нафтового дистиляту .....	11
1.2. Технологічні апарати і їх особливості функціонування.....	15
1.2.1. Ректифікаційна колона, схема та робота .....	15
1.2.2. Кип'ятильник кубового залишку, схема та робота.....	16
1.2.3. Дефлегматор, схема та робота .....	17
1.3. Фізико-хімічні залежності до процесів з переробки вторинного нафтового дистиляту.....	18
2. МОДЕЛЮВАННЯ ДО ПРОЦЕСІВ В АПАРАТАХ ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ НАФТОВОГО ДИСТИЛЯТУ .....	20
2.1. Статичний режим роботи апаратів та розрахунки характеристик .....	20
2.1.1. Тепловий і матеріальний баланс ректифікаційної колони.....	20
2.1.2. Тепловий і матеріальний баланс кип'ятильника кубового залишку .....	28
2.1.3. Тепловий і матеріальний баланс дефлегматора.....	33
2.2. Динамічні властивості роботи апаратів у технологічній схемі переробки вторинного нафтового дистиляту .....	39
2.2.1. Динамічні властивості колони ректифікації як об'єкта керування.....	39
2.2.2. Динамічні властивості кип'ятильника як об'єкта керування .....	44
2.2.3. Динамічні властивості дефлегматора як об'єкта керування.....	49
3. АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКІВ ДО НАЛАШТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ У КОНТУРАХ РЕГУЛЮВАННЯ .....	56
3.1. Налаштування ПІ-регулятора для кип'ятильника.....	56
3.2. Налаштування ПІ-регулятора для дефлегматора .....	57
4. СТВОРЕННЯ ПРИКЛАДНОГО НАВЧАЛЬНОГО ПАКЕТУ ДЛЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КОНТУРУ РЕГУЛЮВАННЯ .....	60
4.1. Постановка задачі для створення навчальної програми.....	60
4.2. Програмний модуль імітації статичних режимів роботи технологічних апаратів з переробки нафтового дистиляту .....	63
4.2.1. Структура меню команд програми, та знайомство з інтерфейсом .....	63

4.2.2. Пункт меню «Процес» у прикладному навчальному пакеті.....	64
4.2.3. Пункт меню «Статичні характеристики» та «Динамічні характеристики» у прикладному навчальному пакеті .....	66
4.2.4. Пункт меню «Імітація» у прикладному навчальному пакеті.....	68
4.3. Програмний модуль імітації динамічного режиму роботи технологічних апаратів з перероби нафтового дистилляту .....	71
4.3.1. Постановка задачі до динамічного режиму роботи контуру регулювання параметра технологічного апарату.....	71
4.3.2. Структура алгоритму програмного пакету для імітаційного моделювання ...	72
4.3.3. Математичні моделі і їх використання для імітаційного моделювання.....	77
4.4. Програмна реалізація навчального пакету.....	84
4.5. Ресурсоспоживання програмного забезпечення .....	86
<b>5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОНТУРУ РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО АПАРАТУ».....</b>	<b>88</b>
5.1. Опис ідеї стартап-проекту .....	88
5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту.....	90
5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту .....	90
5.4. Характеристика потенційних клієнтів.....	92
5.5. Фактори загроз та можливостей .....	93
5.6. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку .....	95
5.7. Розроблення ринкової стратегії проекту.....	101
5.8. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	103
5.9. Висновки .....	104
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>106</b>
<b>ЛІТЕРАТУРА .....</b>	<b>107</b>
<b>ДОДАТКИ</b>	
Додаток Д1. Алгоритм функціонування програмного модуля „Статичні характеристики” та „Динамічні характеристики”	
Додаток Д2. Алгоритм функціонування програмного модуля „Імітація”	
Додаток Д3. Алгоритм функціонування програмного модуля „Регулювання”	



**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

$F$  – витрата

$t$  – температура

$Q$  – кількість тепла

$c$  – теплоємність

$i$  – ентальпія

$\rho$  – густина

$V$  – об'єм

ПІ-регулятор – пропорційно-інтегральний регулятор

$q$  – питома теплотворність

$s$  – площа поверхні теплообміну

ТЗА – технічні засоби автоматизації

$Kr$  – коефіцієнт пропорційності

$Ti$  – час ізодрому

## ВСТУП

Нафтопереробне виробництво є важливою галуззю. Процес переробки вторинного нафтового дистиляту є основним і розглядається як об'єкт дослідження та розробки системи керування. Даний процес непростий і в ньому часто можуть з'являтися аварійні ситуації, які можуть спровокувати дефект оснащення..

Для забезпечення ефективної роботи технологічного процесу переробки вторинного нафтового дистиляту, необхідно розробити адаптивну систему контролю і керування яка б враховувала температурний режим в апаратах.

Процес переробки вторинного нафтового дистиляту цікавий з навчальної точки зору роботи системи керування. Для навчального процесу корисним буде застосування програмних модулів для динамічної демонстрації роботи основних апаратів у технологічному процесі переробки вторинного нафтового дистиляту та робота технічних засобів керування у схемі.

Актуальність теми визначається тим, що на сьогоднішній день переробка нафти та її похідних елементів має велике значення для подальшого технічного прогресу і розширення хімічної промисловості. Тому процес переробки вторинного нафтового дистиляту потребує додаткового дослідження та вивчення.

Новизна роботи полягає в розробці алгоритму для імітаційного моделювання та регулювання параметрів процесу переробки вторинного нафтового дистиляту. Програмний пакет дозволяє візуально спостерігати як влаштована і функціонує система керування.

Потрібно відзначити, що хороший навик використання аналогічних створених програмних тренажерів сприяє поліпшенню продуктивності навчального процесу і робить краще уявлення роботи концепції управління технологічним процесом.

# 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ ВТОРИННОГО НАФТОВОГО ДИСТИЛЯТУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

## 1.1. Опис схеми технологічного процесу переробки вторинного нафтового дистиляту

На нафтопереробних виробництвах в результаті первинної перегонки сирової нафти отримують відгін у вигляді дистилятів і залишків. Дистиляти з низькими парафіновими вуглеводнями піддаються поділу методом ректифікації на компоненти в декількох однакових з'єднаних послідовно дистиляційних установках. Схема процесу однієї дистиляційної установки складається з таких технологічних апаратів: ректифікаційної колони, кип'ятильника кубового залишку, дефлегматора та сепаратора<sup>[1]</sup>.

З дистилятів прямої перегонки і крекінгу нафти виділяють індивідуальні вуглеводні або фракції з невеликими межами температур википання, які підходять для подальшої хімічної переробки.

Нижчі граничні вуглеводні (до  $C_5$  включно) виділяють зі сирової нафти в процесі її стабілізації. Стабілізація полягає в попередньому видаленні розчинних в нафті газоподібних вуглеводнів в ректифікаційних колонах при тиску 3-5 кгс/см<sup>2</sup>. Отримана суміш нижчих граничних вуглеводнів  $C_1-C_5$  (дистилят) надходить знову на ректифікацію для розділення на індивідуальні вуглеводні.

Вуглеводні, які у своєму складі мають більше п'яти вуглеводних атомів зазвичай мають близькі температури кипіння. Їх виділяють у вигляді сумішей – фракцій з вузьким інтервалом температур википання. Часто такі вузькі фракції використовують для подальшої хімічної переробки без додаткового розділення<sup>[2]</sup>.

У даному процесі відбувається розділення нижчих парафінів у колонах ректифікації. Нижчі парафінові вуглеводні до пентанів включно виділяються з нафти в процесі її стабілізації, яка проходить в колонах ректифікації при тиску 3...6 ат. Із вихідного дистиляту, який складається в основному із вуглеводнів  $C_2-C_5$ , шляхом додаткового фракціонування в декількох ректифікаційних колонах можна виділити індивідуальні вуглеводні.

Розділення проводиться при тиску 19 ат. в чотирьохколонному ректифікаційному агрегаті. Кожна колона оснащена виносним дефлегматором 5 і кип'ятильником 7. В колоні 1 із суміші виділяють розчині в невеликій кількості метан і етан. В колоні 2 виділяють пентани, які направляють на подальше розділення в колоні 4 – відділення ізобутану від Н-бутану або безпосередньо на переробку. В колоні 3 відбувається розділення вуглеводнів  $C_3$  та  $C_4$ , в колоні 4 – відділення ізобутану від Н-бутану. Температура кипіння ізомерів  $C_4$  дуже близькі, тому в колоні 4 повинно бути 50 тарілок, у той час як в колонах 1-3 достатньо мати по 30 тарілок. Сировиною процесу служить бутан-бутиленова фракція з газофракційної установки, в якій масове співвідношення ізобутану до бутиленів становить не менше 1,1:1.

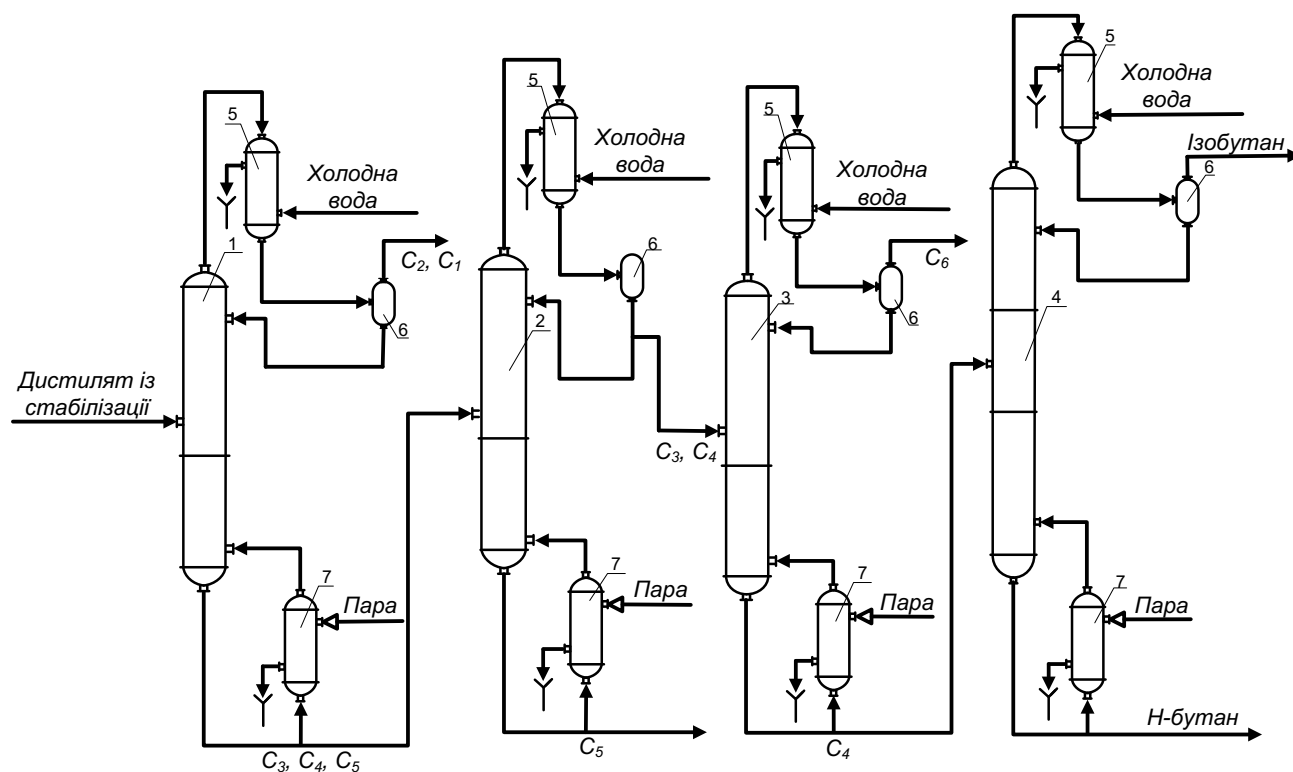
В таблиці 1.1. наведено робочий режим розділення нижчих парафінів, які є в складі газів стабілізації нафти.

**Таблиця 1.1** – Робочий режим колони для розділення нижчих парафінів

Колона	Число тарілок	Температура, °С		Тиск, ат	Флегмове число
		У верхній частині колони	В кубі колони		
1	30	-	-	17,6	6
2	30	78	115-140	9,8	6
3	30	59	116	17,6	6
4	30	70	84	8,8	17

Перегонка з дефлегмацією заснована на частковій конденсації пари, що утворюється при перегонці і поверненні конденсату (флегми) назустріч потоку пари. Завдяки цьому, однократному й однобічному масообміну між зустрічними потоками пари і рідини, що ідуть із системи, пари додатково збагачуються низько киплячими компонентами, тому що при частковій конденсації з них переважно виділяються високо киплячі складові частини.

Технологічна схема установки наведена на рис. 1.1. Дистиллят з секції підготовки (на схемі не показана) подається в ректифікаційну колону 1, також знизу в колону одночасно подається гарячий пар, який насичений високо киплячими компонентами<sup>[3]</sup>.



**Рисунок 1.1** – Технологічна схема процесу переробки вторинного дистилляту

1, 2, 3, 4 – ректифікаційна колону; 5 – дефлегматор; 6 – сепаратор; 7 – кип'ятильник

Дистиллят зі стабілізації подають в колону ректифікації (1), а з кип'ятильника (7) подають гарячу пару, що насичена високо киплячими компонентами. Досягнувши низу колони, рідинний потік  $C_3C_4C_5$ , збагачений високо киплячими компонентами, подається далі в другу ректифікаційну колону. Пар з ректифікаційної колони поступає в дефлегматор (5), де, зазвичай, повністю конденсується холодною водою. Отримана рідина ділиться на 2 потоки: дистиллят і флегму. Дистиллят є продуктовим потоком, що потім виходить з дефлегматора, а флегма поступає в сепаратор (6). Далі процес повторюється аналогічно, тільки вже з другої ректифікаційної колони виходить високо кипляча речовина  $C_5$ , що не подається в третю ректифікаційну колону. Замість цього в ректифікаційну колону подається з сепаратора дистиллят  $C_3C_4$ .

Знову процес повторюється аналогічно, але з ректифікаційної колони, виходить високо киплячий потік  $C_4$ , що подається в останню ректифікаційну колону, а з сепаратора, після фільтрації, утворюється  $C_3$ , який потім збирається в спеціальні цистерни.

В кінці ми отримуємо такі продукти: Н-бутан та Ізобутан.

Показники технологічного режиму процесу переробки вторинного нафтового дистилляту приведені нижче в табл. 1.2:

**Таблиця 1.2** – Показники технологічного процесу переробки вторинного нафтового дистилляту

Назва параметра	Умовне позначення	Значення	Розмірність
Витрата дистилляту	$F_d$	1530	$m^3/год$
Теплоємність дистилляту	$c_d$	3.670	$кДж/(кг \cdot K)$
Температура дистилляту	$t_d$	293	$K$
Витрата кубового залишку	$F_k$	1110	$m^3/год$
Теплоємність кубового залишку	$c_p$	2.9	$кДж/(кг \cdot K)$
Температура кубового залишку	$tp1$	359	$K$
Температура рециркуляту	$tp2$	383	$K$
Витрата флегми	$F_f$	320	$m^3/год$
Теплоємність флегми	$c_f$	3.260	$кДж/(кг \cdot K)$
Температура флегми	$t_f$	312	$K$
Витрата бінарної суміші	$F_{b1}$	540	$m^3/год$
Температура бінарної суміші	$t_{b1}$	342	$K$
Теплоємність бінарної суміші	$c_{b1}$	3.260	$кДж/(кг \cdot K)$
Витрата грійної пари	$F_p$	141	$m^3/год$
Ентальпія грійної пари	$i_p$	20.101	$кДж/кг$
Густина грійної пари	$\rho_p$	2800	$кг/m^3$
Витрата рециркуляту	$F_r$	960	$m^3/год$
Теплоємність рециркуляту	$c_r$	2.9	$кДж/(кг \cdot K)$
Витрата холодної води	$F_v$	650	$m^3/год$
Теплоємність холодної води	$c_v$	4.2	$кДж/(кг \cdot K)$
Температура холодної води на вході в дефлегматор	$t_{v1}$	293	$K$
Температура холодної води на виході з дефлегматора	$t_{v2}$	308	$K$

## 1.2. Технологічні апарати і їх особливості функціонування

### 1.2.1. Ректифікаційна колона, схема та робота

Перегонкою (дистиляцією) називають розділення киплячих рідких сумішей різних за леткістю компонентів внаслідок їх часткового випаровування з подальшою конденсацією утвореної пари<sup>[4]</sup>.

Суміш може складатися з двох або багатьох компонентів. Компонент з меншою температурою кипіння або, відповідно, більшою пружністю пари називають легколетким компонентом (ЛЛК), компонент з більшою температурою кипіння або меншою пружністю пари – важколетким компонентом (ВЛК).

За допомогою простої перегонки неможливо розділити суміш на відносно чисті компоненти. Цього досягають ускладненим процесом перегонки – ректифікацією.

Щоб здійснити процес ректифікації, між дистиляційним кубом і дефлегматором установлюють ректифікаційну колону, в якій відбувається контакт потоку пари, що рухається вгору, і флегми, що стікає вниз. Зустрічні потоки пари і рідини у будь-якому перерізі колони нерівноважні, тому між ними існує перерозподіл компонентів у напрямку встановлення фазової рівноваги.

Щоб забезпечити тісний контакт між парою і рідиною, в колонах установлюють спеціальні пристрої – так звані тарілки, або контакт відбувається в шарі насадки, що заповнює колону. Здійснюючи послідовно у протитечії багаторазовий контакт нерівноважних потоків парової і рідкої фаз, можна змінити їхній склад до бажаного ступеня. В цьому й полягає суть ректифікації.

Ректифікацію здійснюють в установках періодичної або безперервної дії.

В установках періодичної дії вихідну суміш заливають у дистиляційний куб, де її підігрівають до кипіння, а потім безперервно кип'ятять. Утворювана пара надходить у колону, зрошувану флегмою. Частина пари, що не сконденсувалася у дефлегматорі, надходить у конденсатор, конденсат (дистилят) з якого відводиться у збірник дистиляту. Ректифікацію проводять доти, доки рідина в кубі (кубовий залишок) не досягне заданого

складу. Після цього припиняють підігрівання кубової рідини, кубовий залишок вилучають, а куб знову заповнюють вихідною сумішшю, тобто процес повторюється.

Ректифікаційні установки періодичної дії використовують найчастіше у виноробстві (виробництві коньяку) та на невеликих спиртових заводах.

Недоліком установок періодичної дії є необхідність безперервного збільшення флегмового числа, тобто зменшення продуктивності установки для забезпечення заданого складу дистилляту, тоді як частка ЛЛК у кубі безперервно зменшується. Недоліком також є нерівномірність у часі споживання установкою енергії та охолоджувального агента.

### **1.2.2. Кип'ятильник кубового залишку, схема та робота**

В низ ректифікаційних колон підводиться тепло з метою створення висхідного потоку парів (харчування парою). Для створення цього потоку пари в кубовій (нижній, відгінній) частини ректифікаційної колони частину кубової рідини направляють в теплообмінник, пари, що утворилися подають назад під нижню тарілку колони.

Таким чином, в кубі колони створюється два потоки: перший потік – рідина, що стікає зверху (із зони харчування + зрошення), другий потік – пари, що піднімаються з дна колони.

Кубова рідина, стікаючи зверху вниз по тарілках, збагачується високо киплячим компонентами, а пари збагачуються легко киплячим компонентом<sup>[12]</sup>.

При використанні теплообмінників велике значення має спосіб їх приєднання до ректифікаційної колони. Деяким недоліком вертикальних теплообмінників є те, що при їх використанні колона повинна встановлюватись вище рівня, на якому її розміщують при використанні горизонтальних теплообмінників, а також те, що необхідно обмежитись лише однопотоковими теплообмінниками.

Нормальна робота ректифікаційної колони без захлинання нижніх тарілок при підведення тепла за допомогою теплообмінників залежить від правильного розміщення



їх відносно колони, від діаметру підвідних трубопроводів, тому втрата напору циркулюючої речовини піддається ретельній перевірці.

### **1.2.3. Дефлегматор, схема та робота**

Рідинне зрошення, необхідне для здійснення процесу розділення в ректифікаційних колонах, створюється в результаті відводу тепла зверху апарату. В складних колонах тепло може відводитись з верхніх частин окремих секцій для створення в них самостійного зрошення.

В промисловості використовують способи відводу тепла за допомогою конденсатора (дефлегматора), холодного зрошення, що випаровується та циркуляційного зрошення, що не випаровується. Оскільки кожному способу притаманні свої переваги та недоліки, використання їх залежить від конкретних умов розділення: потужності установки, якості і складу сировини і кінцевих продуктів. Для даного технологічного процесу застосовується відвід тепла за допомогою дефлегматора.

При такому відводі тепла лише частина парів, які виходять із колони, конденсуються і повертаються на верхню тарілку у вигляді флегми (зрошення); інша частина парів є цільовий продукт (дистилят). Для того, щоб рідина, яка сконденсувалась стікала самопливом на верхню тарілку, конденсатор встановлюють зверху колони або безпосередньо в корпусі ректифікаційної колони. В цьому випадку конденсатор являє собою теплообмінний апарат, по трубкам якого рухається охолоджуючий агент, а в міжтрубном просторі – пари дистиляту. При установці конденсатора зверху колони пари дистиляту можна відбирати також до конденсатора, зменшив парове навантаження на міжтрубний простір.

До переваг такого типу відводу тепла можна віднести наступні: значне зменшення поверхні конденсатора і витрати охолоджуючої сировини, а також втрати напору парового потоку в конденсаторі і більш сприятливі умови регенерації тепла. Крім того, такий конденсатор здійснює додаткове розділення, еквівалентне одній теоретичній тарілці.

Недоліком такої схеми є інтенсивна корозія теплообмінника, ускладнення конструкції ректифікаційної колони і збільшення витрат, пов'язаних з установкою конденсатора на великій висоті і спорудження спеціальних майданчиків і драбин для доступу до нього, а також неможливість надійного регулювання величини флегмового числа (при установці конденсатора в корпусі ректифікаційної колони).

### **1.3. Фізико-хімічні залежності до процесів з переробки вторинного нафтового дистилляту**

Парафінові вуглеводні від метану  $CH_4$  до бутану  $C_4H_{10}$  – газоподібні речовини, пентани  $C_5H_{12}$  – низько киплячі рідини. Н-бутан та Ізобутан мають значну різницю в температурах кипіннях, тому їх можна розділити ректифікацією.

Головним джерелом нижчих парафінів ( $C_1-C_5$ ) є природний і попутний газ, газ газоконденсатних родовищ, а також нафто-заводські газу від процесів переробки нафтопродуктів в присутності водню.

Природними називають газу, які добувають із чисто газових родовищ. Іноді вони містять великі кількості діоксиду вуглецю, азоту та гелію. Для газоконденсатних родовищ зазвичай характерний високий тиск, і при його зниженні відбувається сепарація і виділяється газ та рідкий конденсат. Природний газ вигідно використовувати тільки як джерело метану. Попутні газу найбільш цінні для отримання парафінів  $C_3-C_5$ . Із вуглеводнів  $C_4$  в попутних газу переважає Н-бутан (3-5 об'ємів на 1 об'єм ізобутану), а із  $C_5$  – Н-пентан (1,5-4,0 об'єму на 1 об'єм ізопентану).

Попутними називають газу, які виділяються разом із нафтою при її видобутку з нафтових свердловин. Частина цих газів відділяється в сепараторах, а інша залишається розчиненою в нафті і відділяється при її стабілізації, тобто відгоні летючих компонентів (газу-стабілізації). Видаляються із нафти та газу і легкі фракції (газу стабілізації) складаються головним чином з нижчих парафінових вуглеводнів  $C_1-C_5$ . Газу стабілізації являють собою цінну хімічну сировину; їх можна розділяти на індивідуальні вуглеводні і переробляти потім в різні продукти органічного синтезу.

Для розділення попутного газу можна використовувати способи абсорбції, конденсації та ректифікації. Найбільш поширений метод ректифікації.

Випаровування парафінових вуглеводнів у ректифікаційній колоні залежить від температури нагріву маси кубового об'єму (нижня частина колони) та тиску парів у об'ємі розташування тарілок (верхня частина колони). Температура всередині колони змінюється по висоті відповідно до температурами кипіння поділюваних компонент і у верхній частині колони вона близька до температури кипіння легко киплячої компоненти. Необхідними умовами якісного процесу ректифікації в колоні є наявність потоку парів у напрямку до верху колони і низхідного потоку флегми (пари повинні мати температуру більш високу, ніж дотична охолоджена флегма)<sup>[4]</sup>. Гарячий потік парів до верху колони підтримується за рахунок процесу перегрівання у кип'ятильнику потоку з рециркуляцією кубового залишку. Температура флегми на виході дефлегматора регулюється потоком холодної води. Кількість флегми повинно подаватися у колонну ректифікації згідно відношення кількості пари відібраної з колони і кількості поверненої у колонну сконденсованої пари (флегми)<sup>[13]</sup>.

З нижчих парафінів в якості сировини для органічного синтезу найчастіше використовують метан, Н-бутан та ізобутан, ізопентан.

## 2. МОДЕЛЮВАННЯ ДО ПРОЦЕСІВ В АПАРАТАХ ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ НАФТОВОГО ДИСТИЛЯТУ

### 2.1. Статичний режим роботи апаратів та розрахунки характеристик

#### 2.1.1. Тепловий і матеріальний баланс ректифікаційної колони

На рис. 2.2. зображено спрощену схему ректифікаційної колони у процесі переробки вторинного нафтового дистиляту, а також вхідні і вихідні потоки для апарату<sup>[5]</sup>.

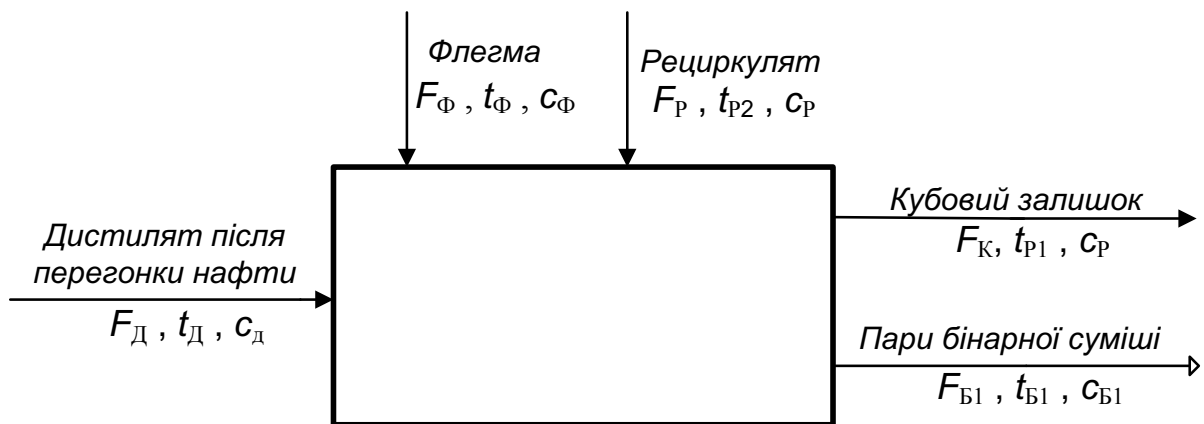


Рисунок 2.2 – Спрощена схема ректифікаційної колони

Запишемо матеріальний баланс апарату:

$$F_D + F_\Phi + F_{P2} - F_{P1} - F_{B1} = 0,$$

де  $F_D$  – витрата дистиляту після стабілізації;

$F_\Phi$  – витрата флегми, що подається в колону ректифікації;

$F_{P2}$  – витрата рециркуляту, що поступає в апарат;

$F_{P1}$  – витрата кубового залишку, що виходить з апарату.

$F_{B1}$  – витрата парів бінарної суміші, що виходять з колони.

Так як основним параметром для якісного проведення процесу є температура, то будемо розглядати тепловий баланс як основу опису процесу.

Залежності до теплових балансів були записані у наступному вигляді:

$$Q_D - Q_{P1} + Q_{P2} - \Delta Q_{KS} - Q_{ZS} - Q_{ПР} = 0, \quad (2.1)$$

де  $Q_D$  – кількість тепла з вхідним потоком дистилляту,  $Q_D = F_D c_D t_D$ ;

$Q_{P1}$  – кількість тепла з вихідним потоком кубового залишку,  $Q_{P1} = F_{KCP} t_{P1}$ ;

$Q_{P2}$  – кількість тепла з вхідним потоком рециркуляту,  $Q_{P2} = F_{PCP} t_{P2}$ ;

$\Delta Q_{KS}$  – кількість тепла передана від нагрівача до маси суміші,  
 $\Delta Q_{KS} = F_1 s_1 (t_{P1} - t_\Phi)$ ;

$Q_{PP}$  – кількість тепла, витраченого на процес,  $Q_{PP} = (F_D c_D t_D + F_{PCP} t_{P2}) q_1$ ;

$Q_{ZS}$  – кількість втрат тепла в оточуюче середовище, визначено таким чином  
 $Q_{ZS} = 0,2 F_{PCP} t_{P2}$ .

$$Q_\Phi - Q_{B1} + \Delta Q_{KS} = 0, \quad (2.2)$$

де  $Q_\Phi$  – кількість тепла, внесеного в колону флегмою,  $Q_\Phi = F_\Phi c_\Phi t_\Phi$ ;

$Q_{B1}$  – кількість тепла, що виноситься з колони з паром бінарної суміші,  
 $Q_{B1} = F_{B1} c_{B1} t_{B1}$ .

Статичний режим об'єкта представлений рівняннями (2.1) та (2.2):

$$Q_D - Q_{P1} + Q_{P2} - \Delta Q_{KS} - Q_{ZS} - Q_{PP} = 0$$

$$Q_\Phi - Q_{B1} + \Delta Q_{KS} = 0$$

Запишемо рівняння з усіма підстановками:

$$F_D c_D t_D - F_{KCP} t_{P1} + F_{PCP} t_{P2} - F_1 s_1 (t_{P1} - t_\Phi) - 0,2 F_{PCP} t_{P2} - (F_D c_D t_D + F_{PCP} t_{P2}) q_1 = 0 \quad (2.3)$$

$$F_\Phi c_\Phi t_\Phi - F_{B1} c_{B1} t_{B1} + F_1 s_1 (t_{P1} - t_\Phi) = 0 \quad (2.4)$$

Керованою величиною обираємо температуру кубового залишку на виході з ректифікаційної колони. Відносно неї будемо будувати статичні характеристики.

Зобразимо залежності у вигляді структурно-параметричної схеми на рисунку 2.3.

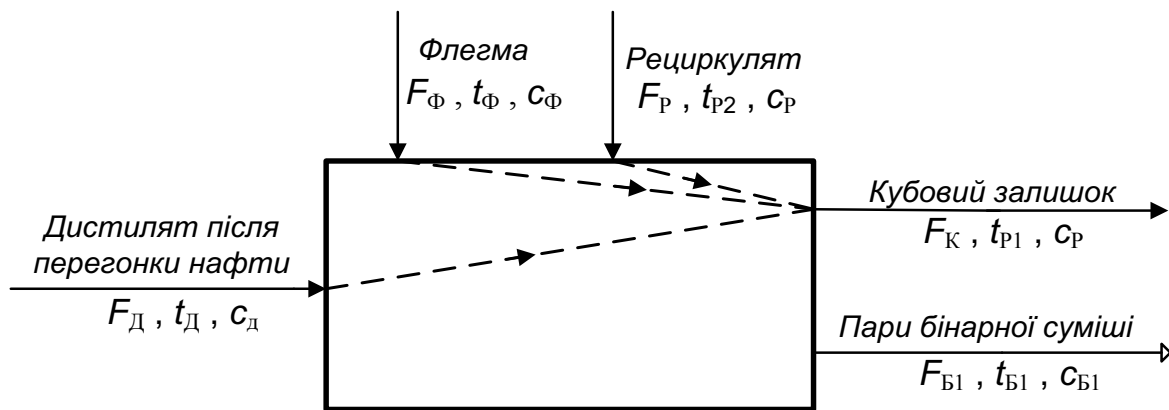


Рисунок 2.3 – Структурно-параметрична схема ректифікаційної колони

Сформуємо функції залежності температури вихідної суміші  $t_K$  від різних параметрів на основі рівнянь (2.3) та (2.4). З рівняння (2.4) виражаємо температуру флегми  $t_\Phi$ :

$$t_\Phi = \frac{F_{B1}t_{B1}c_{B1} - F_1s_1t_{P1}}{F_\Phi c_\Phi - F_1s_1}.$$

Підставимо температуру  $t_\Phi$  в рівняння (2.3) та виразимо керовану величину вихідної суміші  $t_{P1}$ :

$$F_D c_D t_D - F_K t_{P1} c_P + F_P t_{P2} c_P - F_1 s_1 \left( t_{P1} - \frac{F_{B1} t_{B1} c_{B1} - F_1 s_1 t_{P1}}{F_\Phi c_\Phi - F_1 s_1} \right) - 0,2 F_P t_{P2} c_P - (F_D t_D c_D - F_P t_{P2} c_P) q_1 = 0$$

$$t_{P1} = \frac{F_D c_D t_D + F_K t_{P2} c_P - 0,2 F_P t_{P2} c_P - (F_D t_D c_D - F_P t_{P2} c_P) q_1 + F_1 s_1 \left( \frac{F_{B1} t_{B1} c_{B1} - F_1 s_1 t_{P1}}{F_\Phi c_\Phi - F_1 s_1} \right)}{F_P c_P + F_1 s_1 - F_1 s_1 \frac{-F_1 s_1}{F_\Phi c_\Phi - F_1 s_1}} \quad (2.5)$$

Залежність від витрати дистилляту:

$$t_{P1} = f_1(F_D) \quad (2.6)$$

Залежність від температури дистилляту:

$$t_{P1} = f_2(t_D) \quad (2.7)$$

Залежність від температури рециркуляту:

$$t_{P1} = f_3(t_{P2}) \quad (2.8)$$

Залежність від витрати флегми:

$$t_{P1} = f_4(F_\Phi) \quad (2.9)$$

Залежність від витрати бінарної суміші:

$$t_{P1} = f_5(F_{B1}) \quad (2.10)$$

Залежність від температури бінарної суміші:

$$t_{P1} = f_6(t_{B1}) \quad (2.11)$$

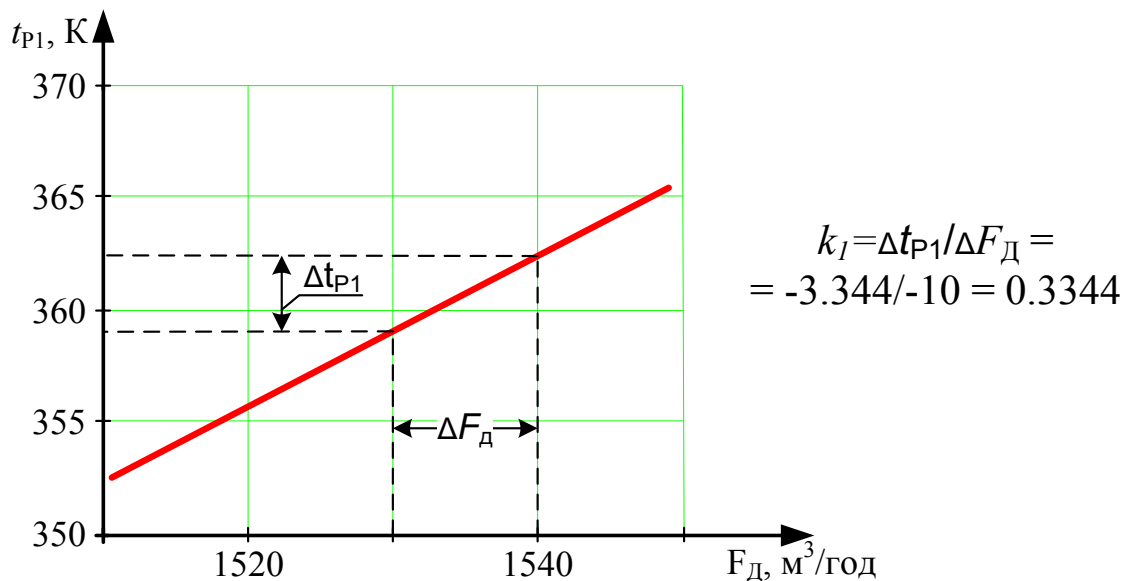
Залежність від витрати рециркуляту:

$$t_{P1} = f_7(F_P) \quad (2.12)$$

Визначаємо статичну характеристику за формулою (2.5) для функції (2.6).  
Результати обчислень записуємо у таблицю 2.2 та будуємо графік на  
рисунок 2.4.

**Таблиця 2.2** – Результати розрахунку статичної характеристики 2.6

$t_{P1}$	352.313	353.985	355.657	357.33	359.002	360.674	362.346	364.019	365.691
$F_D$	1510	1515	1520	1525	1530	1535	1540	1545	1550

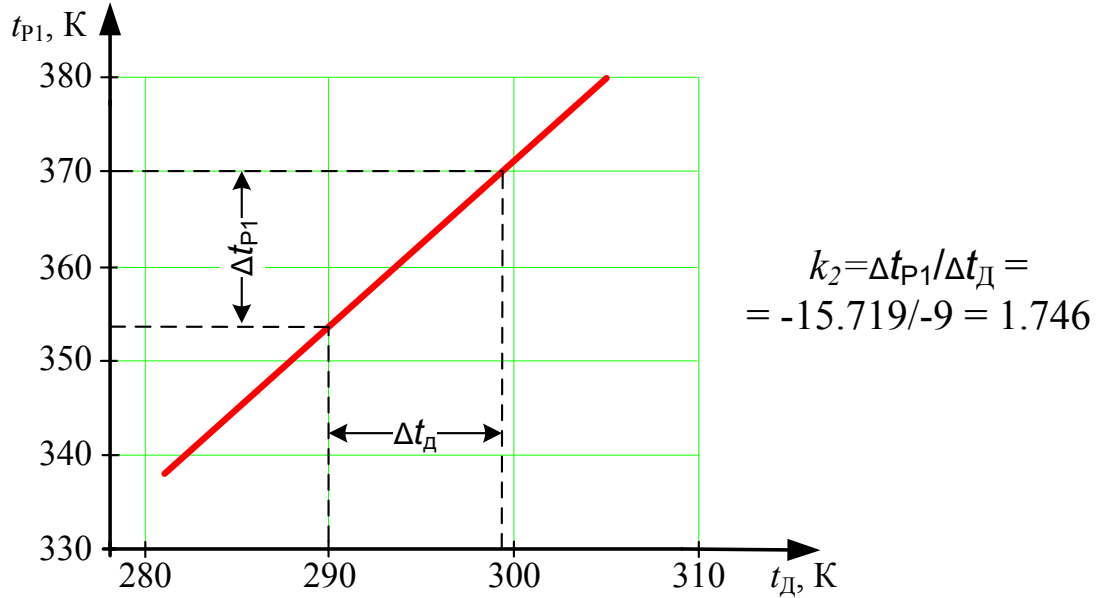


**Рисунок 2.4** – Статична характеристика залежності  $t_{P1}$  від  $F_D$

Визначаємо статичну характеристику за формулою (2.5) для функції (2.7).  
Результати обчислень записуємо у таблицю 2.3 та будуємо графік на  
рисунок 2.5.

Таблиця 2.3 – Результати розрахунку статичної характеристики 2.7

$t_{P1}$	338.044	343.283	348.523	353.762	359.002	364.241	369.481	374.72	379.96
$t_D$	281	284	287	290	293	296	299	302	305

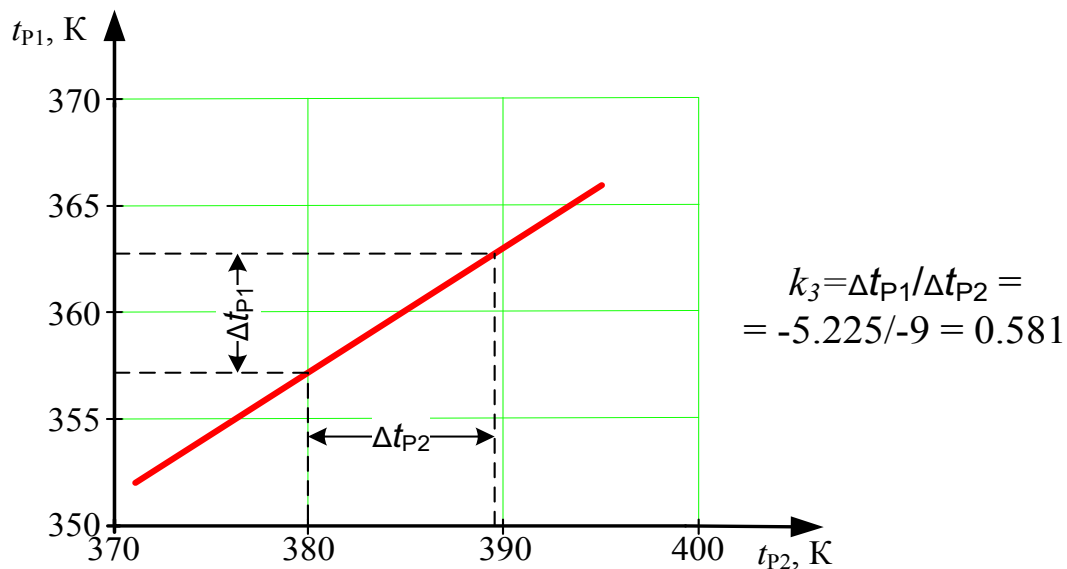
Рисунок 2.5 – Статична характеристика залежності  $t_{P1}$  від  $t_D$ 

Визначаємо статичну характеристику за формулою (2.5) для функції (2.8). Результати обчислень записуємо у таблицю 2.4 та будуємо графік на рисунку 2.6.

Таблиця 2.4 – Результати розрахунку статичної характеристики 2.8

$t_{P1}$	352.035	353.777	355.519	357.26	359.002	360.743	362.485	364.227	365.968
$t_{P2}$	371	374	377	380	383	386	389	392	395



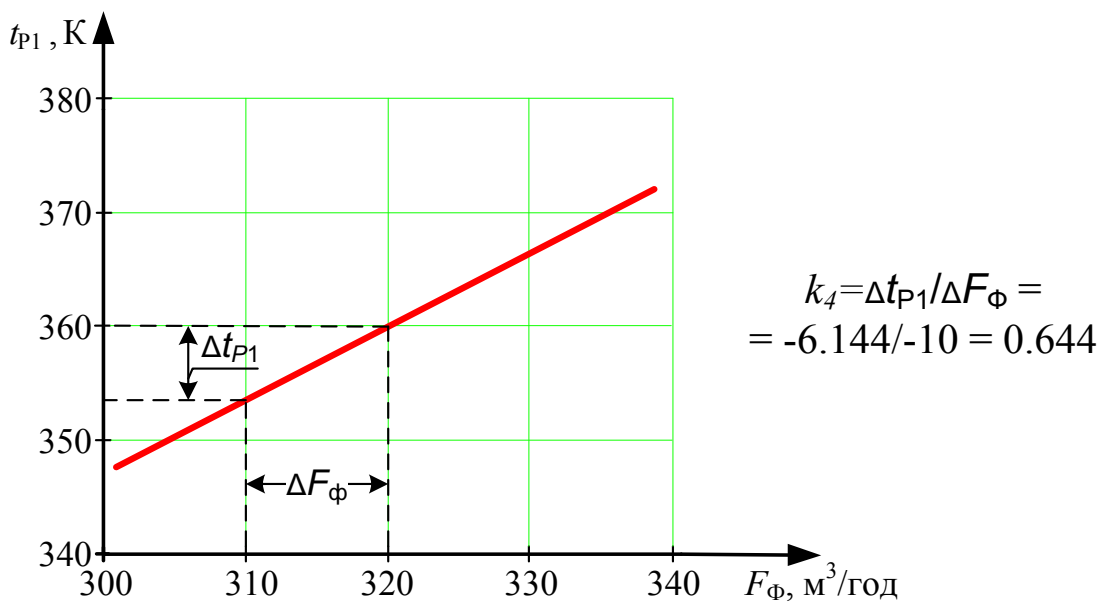


**Рисунок 2.6** – Статична характеристика залежності  $t_{p1}$  від  $t_{p2}$

Визначаємо статичну характеристику за формулою (2.5) для функції (2.9). Результати обчислень записуємо у таблицю 2.5 та будуємо графік на рисунку 2.7.

**Таблиця 2.5** – Результати розрахунку статичної характеристики 2.9

$t_{p1}$	347.078	349.925	352.858	355.883	359.002	362.221	365.544	368.977	372.525
$F_{\phi}$	300	305	310	315	320	325	330	335	340

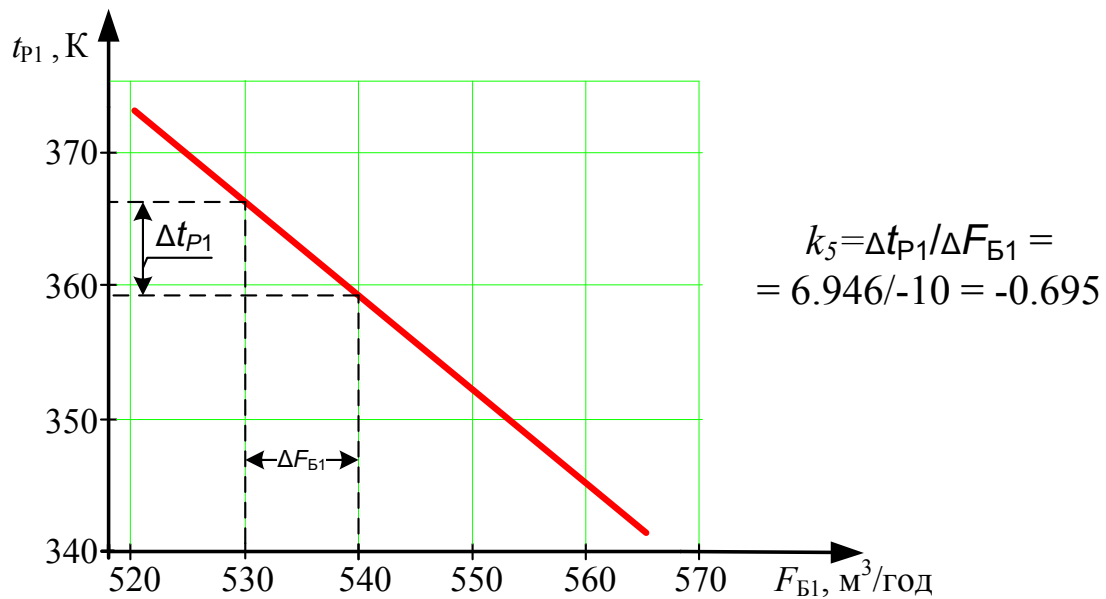


**Рисунок 2.7** – Статична характеристика залежності  $t_{p1}$  від  $F_{\phi}$

Визначаємо статичну характеристику за формулою (2.5) для функції (2.10). Результати обчислень записуємо у таблицю 2.6 та будемо графік на рисунку 2.8.

**Таблиця 2.6** – Результати розрахунку статичної характеристики 2.10

$t_{p1}$	372.893	369.42	365.948	362.475	359.002	355.529	352.056	345.11	341.638
$F_{Б1}$	520	525	530	535	540	545	550	560	565

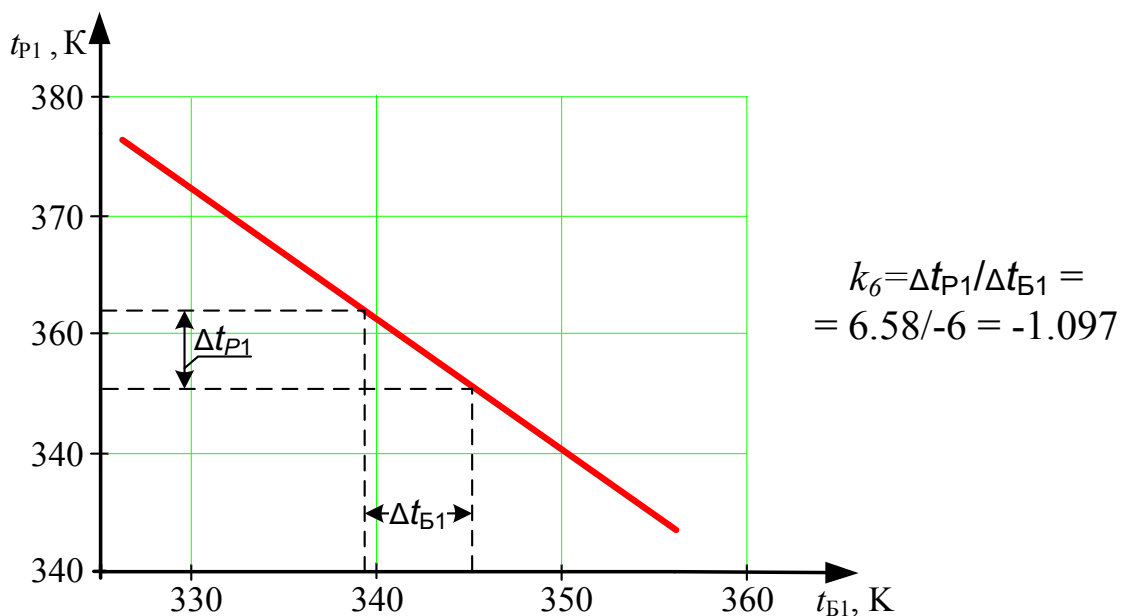


**Рисунок 2.8** – Статична характеристика залежності  $t_{p1}$  від  $F_{Б1}$

Визначаємо статичну характеристику за формулою (2.5) для функції (2.11). Результати обчислень записуємо у таблицю 2.7 та будемо графік на рисунку 2.9.

**Таблиця 2.7** – Результати розрахунку статичної характеристики 2.11

$t_{p1}$	372.162	368.872	365.582	362.292	359.002	355.712	353.518	350.228	346.938
$t_{Б1}$	330	333	336	339	342	345	347	350	353

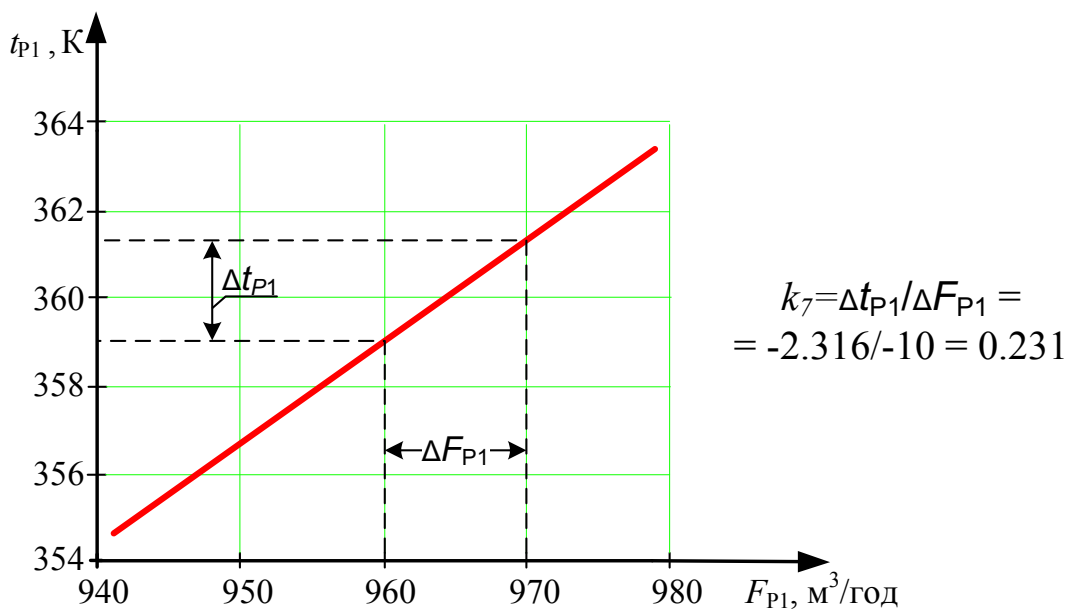


**Рисунок 2.9** – Статична характеристика залежності  $t_{P1}$  від  $t_{B1}$

Визначаємо статичну характеристику за формулою (2.5) для функції (2.12). Результати обчислень записуємо у таблицю 2.8 та будуємо графік на рисунку 2.10.

**Таблиця 2.8** – Результати розрахунку статичної характеристики 2.12

$t_{P1}$	354.37	355.528	356.686	357.844	359.002	360.16	361.318	362.476	363.634
$F_{P1}$	940	945	950	955	960	965	970	975	980



**Рисунок 2.10** – Статична характеристика залежності  $t_{P1}$  від  $F_{P1}$

### 2.1.2. Тепловий і матеріальний баланс кип'ятильника кубового залишку

На рис. 2.11. зображено спрощену схему кип'ятильника кубового залишку у процесі переробки вторинного нафтового дистилляту, а також вхідні і вихідні потоки для апарату<sup>[5]</sup>.

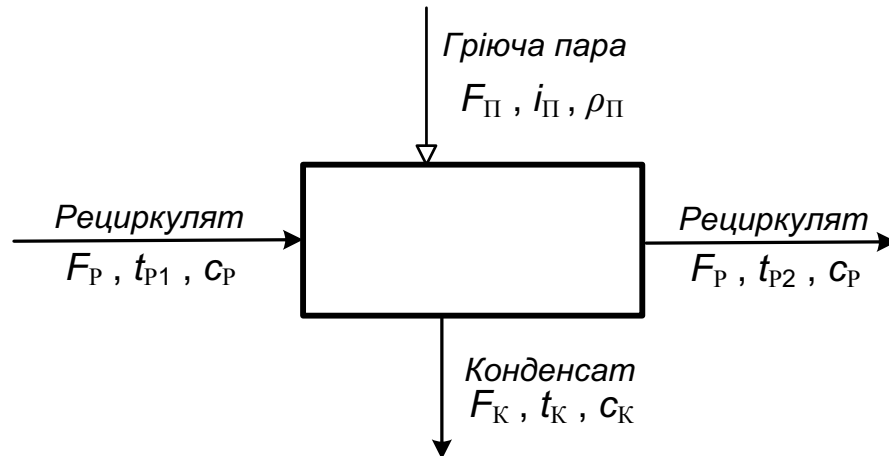


Рисунок 2.11 – Спрощена схема кип'ятильника кубового залишку

Запишемо матеріальний баланс апарату:

$$F_{P1} + F_{\Pi} - F_{P2} - F_K = 0,$$

де  $F_{P1}$  – витрата рециркуляту, що подається в кип'ятильник;

$F_{\Pi}$  – витрата пари, що подається на обігрів сировини в кип'ятильник;

$F_{P2}$  – витрата рециркуляту, що виходить з апарату;

$F_K$  – витрата конденсату, що виходить з апарату.

Так як основним параметром для якісного проведення процесу є температура, то будемо розглядати тепловий баланс як основу опису процесу.

Залежності до теплових балансів були записані у наступному вигляді:

$$Q_{\Pi} - Q_K - \Delta Q_{KS} - Q_{ZS} = 0, \quad (2.13)$$

де  $Q_{\Pi}$  – кількість тепла з вхідним потоком гріючої пари,  $Q_{\Pi} = F_{\Pi} i_{\Pi} \rho_{\Pi}$ ;

$Q_K$  – кількість тепла з вихідним потоком конденсату,  $Q_K = F_{\Pi} \rho_{\Pi} c_K t_K$ ;

$\Delta Q_{KS}$  – кількість тепла передана від нагрівача до маси суміші,  
 $\Delta Q_{KS} = F_2 s_2 (t_{P2} - t_K)$ ;

$Q_{ZS}$  – кількість втрат тепла в оточуюче середовище, визначено таким чином  
 $Q_{ZS} = 0,2 F_{\Pi} i_{\Pi} \rho_{\Pi}$ .

$$Q_{P1} - Q_{P2} + \Delta Q_{KS} - Q_{\Pi P} = 0, \quad (2.14)$$

де  $Q_{P1}$  – кількість тепла з вхідним потоком рециркуляту,  $Q_{P1} = F_P c_P t_{P1}$ ;

$Q_{P2}$  – кількість тепла з вихідним потоком рециркуляту,  $Q_{P2} = F_P c_P t_{P2}$ ;

$Q_{\Pi P}$  – кількість тепла, витраченого на процес,  $Q_{\Pi P} = F_P q_2$ .

Статичний режим об'єкта представлений рівняннями (2.13) та (2.14):

$$Q_{\Pi} - Q_K - \Delta Q_{KS} - Q_{ZS} = 0$$

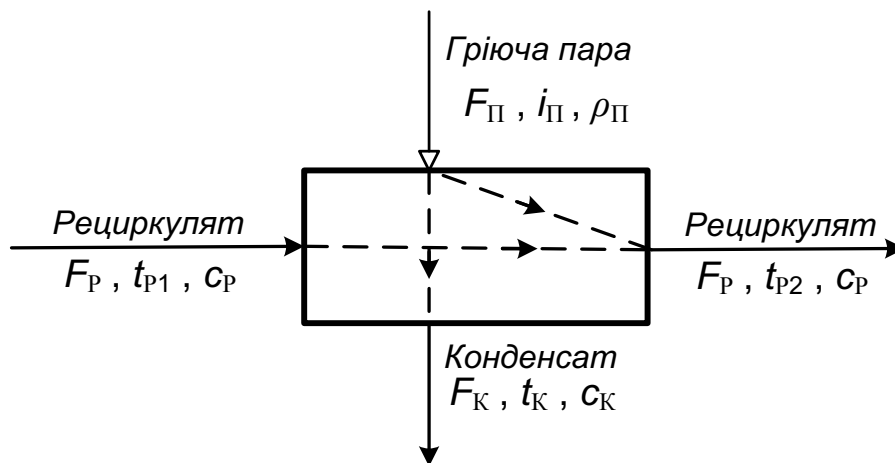
$$Q_{P1} - Q_{P2} + \Delta Q_{KS} - Q_{\Pi P} = 0$$

Запишемо рівняння з усіма підстановками:

$$F_{\Pi} i_{\Pi} \rho_{\Pi} - F_{\Pi} \rho_{\Pi} c_K t_K - F_2 s_2 (t_{P2} - t_K) - 0,2 F_{\Pi} i_{\Pi} \rho_{\Pi} = 0 \quad (2.15)$$

$$F_P c_P t_{P1} - F_P c_P t_{P2} + F_2 s_2 (t_{P2} - t_K) - F_P q_2 = 0 \quad (2.16)$$

Керованою величиною обираємо температуру рециркуляту на виході з кип'ятильника кубового залишку. Відносно неї будемо будувати статичні характеристики. Зобразимо залежності у вигляді структурно-параметричної схеми на рисунку 2.12.



**Рисунок 2.12** – Структурно-параметрична схема кип'ятильника кубового залишку

Сформуємо функції залежності температури вихідної суміші  $t_{p2}$  від різних параметрів на основі рівнянь (2.15) та (2.16). З рівняння (2.15) виражаємо температуру конденсату  $t_K$ :

$$t_K = \frac{-0,8F_{II}\rho_{II}i_{II} + F_2s_2t_{p2}}{F_2s_2 - F_{II}\rho_{II}c_K}$$

Підставимо температуру  $t_K$  в рівняння (2.16) та виразимо керовану величину вихідної суміші  $t_{p2}$ :

$$F_P c_P t_{p1} - F_P c_P t_{p2} + F_2 s_2 \left( t_{p2} - \frac{-0,8F_{II}\rho_{II}i_{II} + F_2 s_2 t_{p2}}{F_2 s_2 - F_{II}\rho_{II}c_K} \right) - F_P q_2 = 0$$

$$t_{p2} = \frac{F_P c_P t_{p1} - F_P q_2 - F_2 s_2 \frac{-0,8F_{II}\rho_{II}i_{II} + F_2 s_2 t_{p2}}{F_2 s_2 - F_{II}\rho_{II}c_K}}{-F_P c_P + F_2 s_2 - F_2 s_2 \frac{F_2 s_2}{F_2 s_2 - F_{II}\rho_{II}c_K}} \quad (2.17)$$

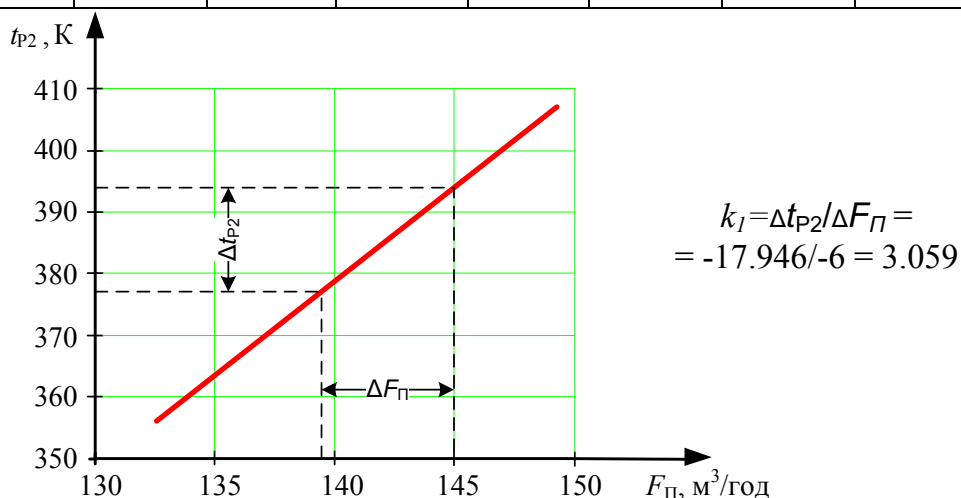
Залежність від витрати гріючої пари:

$$t_{p2} = f_1(F_{II}) \quad (2.18)$$

Визначаємо статичну характеристику за формулою (2.17) для функції (2.18). Результати обчислень записуємо у таблицю 2.9 та будуємо графік на рисунку 2.12.

**Таблиця 2.9** – Результати розрахунку статичної характеристики 2.18

$t_{p2}$	357.648	364.211	370.62	376.882	383	388.981	394.828	400.546	406.139
$F_{II}$	133	135	137	139	141	143	145	147	149



**Рисунок 2.12** – Статична характеристика залежності  $t_{p2}$  від  $F_{II}$

Для каналів  $t_{p2} \rightarrow F_p$ ,  $t_{p2} \rightarrow t_p$  рівняння для статичної характеристики має наступний вигляд:

$$Q_{p1} - Q_{p2} + Q_{\Pi} - Q_K - Q_{ZS} - Q_{\Pi P} = 0 \quad (2.19)$$

З усіма підстановками рівняння (2.19) має вигляд:

$$F_p c_p t_{p1} - F_p c_p t_{p2} + F_{\Pi} i_{\Pi} \rho_{\Pi} - F_{\Pi} \rho_{\Pi} c_K - 0,2 F_{\Pi} i_{\Pi} \rho_{\Pi} - F_p q_2 = 0 \quad (2.20)$$

Виразимо температуру рециркуляту  $t_{p2}$  на виході з кип'ятильника та побудуємо статичні характеристики:

$$t_{p2} = \frac{F_p c_p t_{p1} - 0,8 F_{\Pi} \rho_{\Pi} i_{\Pi} - F_{\Pi} \rho_{\Pi} c_K t_K - F_p q_2}{F_p c_p} \quad (2.21)$$

Залежність від витрати гріючої пари:

$$t_{p2} = f_2(F_p) \quad (2.22)$$

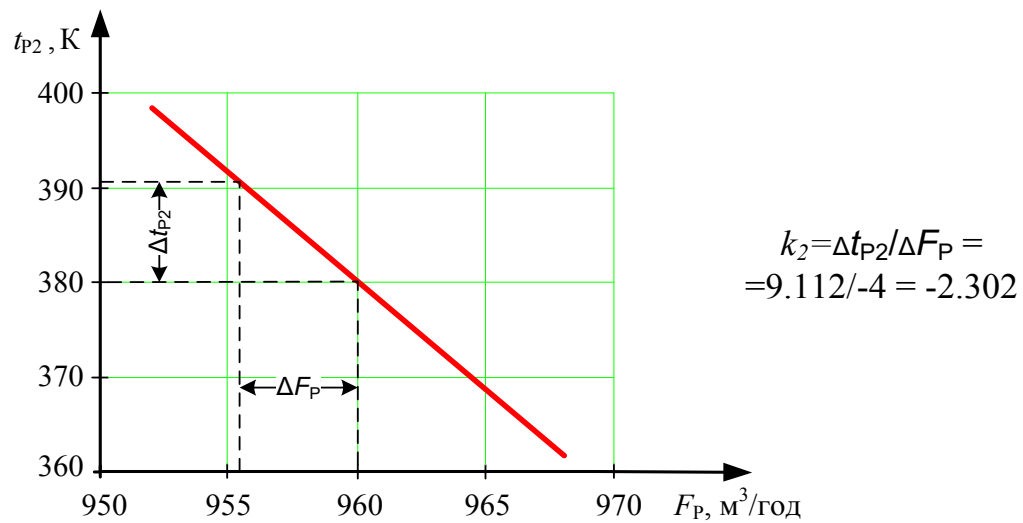
Залежність від витрати гріючої пари:

$$t_{p2} = f_3(t_{p1}) \quad (2.23)$$

Визначаємо статичну характеристику за формулою (2.21) для функції (2.22). Результати обчислень записуємо у таблицю 2.10 та будуємо графік на рисунку 2.13.

**Таблиця 2.10** – Результати розрахунку статичної характеристики 2.22

$t_{p2}$	401.301	396.697	392.112	387.547	383	378.472	373.963	369.473	365.002
$F_p$	952	954	956	958	960	962	964	966	968

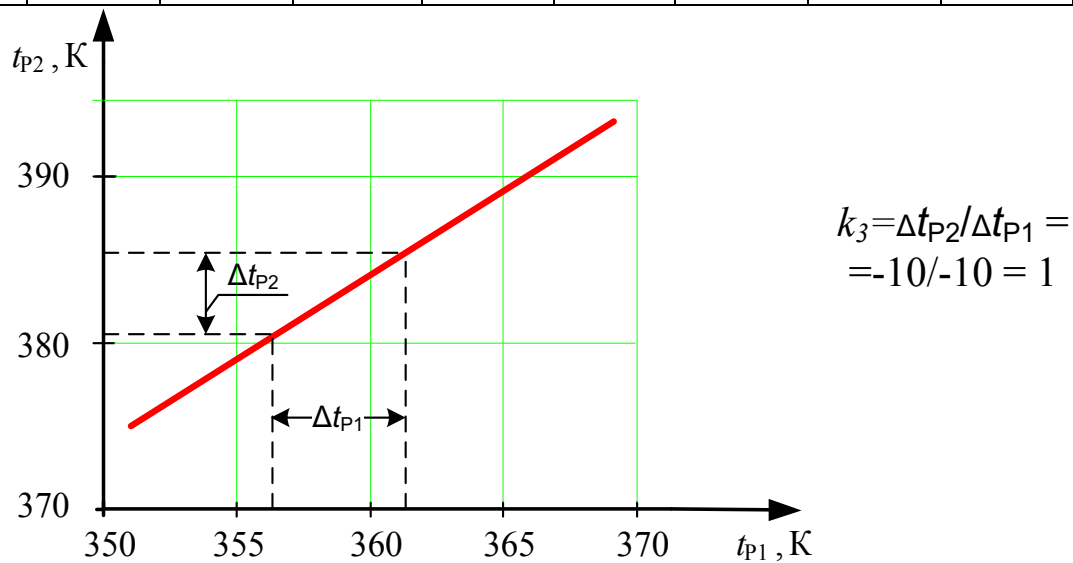


**Рисунок 2.13** – Статична характеристика залежності  $t_{P2}$  від  $F_P$

Визначаємо статичну характеристику за формулою (2.21) для функції (2.23). Результати обчислень записуємо у таблицю 2.11 та будуємо графік на рисунку 2.14.

**Таблиця 2.11** – Результати розрахунку статичної характеристики 2.23

$t_{P2}$	375	377	379	381	383	385	387	389	391
$t_{P1}$	351	353	355	357	359	361	363	365	367



**Рисунок 2.14** – Статична характеристика залежності  $t_{P2}$  від  $t_{P1}$



### 2.1.3. Тепловий і матеріальний баланс дефлегматора

На рис. 2.15. зображено спрощену схему дефлегматора у процесі переробки вторинного нафтового дистилляту, а також вхідні і вихідні потоки для апарату<sup>[5]</sup>.

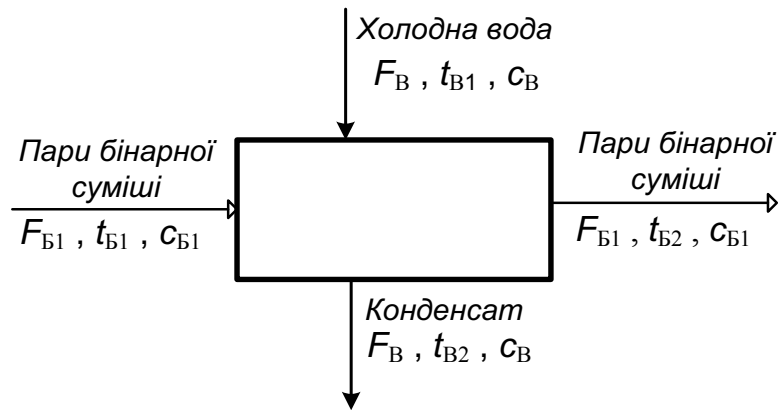


Рисунок 2.15 – Спрощена схема дефлегматора

Запишемо матеріальний баланс апарату:

$$F_{B1} + F_B - F_{B2} - F_K = 0,$$

де  $F_{B1}$  – витрата парів бінарної суміші, що подається в дефлегматор;

$F_B$  – витрата холодної води, що подається на охолодження сировини в дефлегматорі;

$F_{B2}$  – витрата парів бінарної суміші, що виходить з апарату;

$F_K$  – витрата конденсату, що виходить з апарату.

Так як основним параметром для якісного проведення процесу є температура, то будемо розглядати тепловий баланс як основу опису процесу.

Залежності до теплових балансів були записані у наступному вигляді:

$$Q_B - Q_K + \Delta Q_{KS} = 0, \quad (2.24)$$

де  $Q_B$  – кількість тепла з вхідним потоком холодної води,  $Q_B = F_B t_{B1} c_B$ ;

$Q_K$  – кількість тепла з вихідним потоком конденсату,  $Q_K = F_B c_B t_{B2}$ ;

$\Delta Q_{KS}$  – кількість тепла передана від нагрівача до маси суміші,

$$\Delta Q_{KS} = F_3 s_3 (t_{\Phi} - t_{B2});$$

$$Q_{B1} - Q_{B2} - \Delta Q_{KS} - Q_{ZS} + Q_{\text{ПР}} = 0, \quad (2.25)$$

де  $Q_{B1}$  – кількість тепла з вхідним потоком парів бінарної суміші,  $Q_{B1} = F_{B1} c_{B1} t_{B1}$ ;

$Q_{B2}$  – кількість тепла з вихідним потоком флегми,  $Q_{B2} = F_{B1}c_{B2}t_{B1}$ ;

$Q_{ПР}$  – кількість тепла, витраченого на процес,  $Q_{ПР} = F_{B1}c_{B1}t_{B1}q_3$ .

$Q_{ZS}$  – кількість втрат тепла в оточуюче середовище, визначено таким чином  $Q_{ZS} = 0,2(F_{B1}c_{B1}t_{B1}q_3 + F_{B1}c_{B1}t_{B1})$ .

Статичний режим об'єкта представлений рівняннями (2.24) та (2.25):

$$Q_B - Q_K + \Delta Q_{KS} = 0$$

$$Q_{B1} - Q_{B2} - \Delta Q_{KS} - Q_{ZS} + Q_{ПР} = 0$$

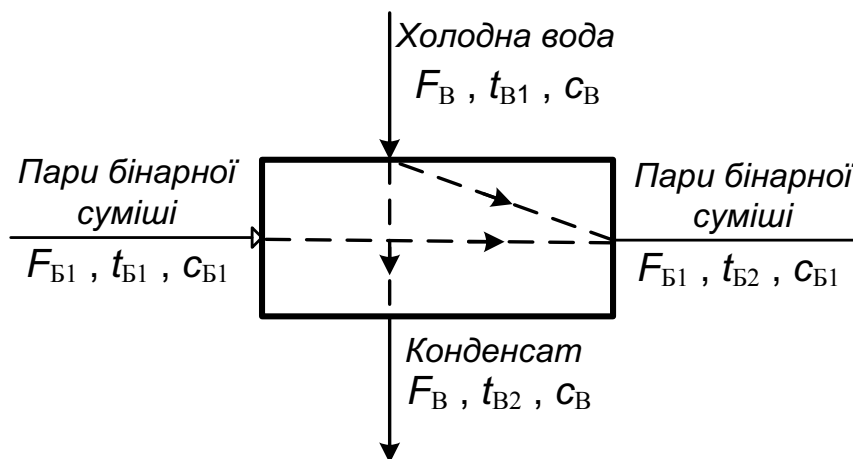
Запишемо рівняння з усіма підстановками:

$$F_B t_{B1} c_B - F_B t_{B2} c_B + F_3 s_3 (t_{\Phi} - t_{B2}) = 0 \quad (2.26)$$

$$F_{B1} c_{B1} t_{B1} - F_{B1} c_{B2} t_{B1} - F_3 s_3 (t_{B2} - t_{B2}) - 0,2 (F_{B1} c_{B1} t_{B1} q_3 + F_{B1} c_{B1} t_{B1}) + F_{B1} c_{B1} t_{B1} q_3 = 0 \quad (2.27)$$

Керованою величиною обираємо температуру парів бінарної суміші на виході з дефлегматора. Відносно неї будемо будувати статичні характеристики.

Зобразимо залежності у вигляді структурно-параметричної схеми на рисунку 2.16.



**Рисунок 2.16** – Структурно-параметрична схема дефлегматора

Сформуємо функції залежності температури вихідної суміші  $t_{B2}$  від різних параметрів на основі рівнянь (2.26) та (2.27). З рівняння (2.26) виражаємо температуру конденсату  $t_{B2}$ :

$$t_{B2} = \frac{F_B t_{B1} c_B + F_3 s_3 t_\phi}{F_3 s_3 + F_B c_B}.$$

Підставимо температуру  $t_K$  в рівняння (2.27) та виразимо керовану величину вихідної суміші  $t_\phi$ :

$$F_B t_{B1} c_B - F_{B1} t_{B2} c_{B1} - F_3 s_3 \left( -\frac{F_B t_{B1} c_B + F_3 s_3 t_\phi}{F_3 s_3 + F_B c_B} + t_\phi \right) - 0,2(F_{B1} t_{B1} c_{B1} q_3 + F_{B1} t_{B1} c_{B1}) + F_{B1} t_{B1} c_{B1} q_3 = 0$$

$$t_{B2} = \frac{F_{B1} c_{B1} t_{B1} + F_3 s_3 \frac{F_B t_{B1} c_B}{F_3 s_3 + F_B c_B} - 0,2(F_{B1} c_{B1} t_{B1} q_3 - F_{B1} c_{B1} t_{B1}) + F_{B1} c_{B1} t_{B1} q_3}{F_{B1} c_{B1} + F_3 s_3 - F_3 s_3 \frac{F_3 s_3}{F_3 s_3 + F_B c_B}} \quad (2.28)$$

Залежність від витрати холодної води:

$$t_{B2} = f_1(F_B) \quad (2.29)$$

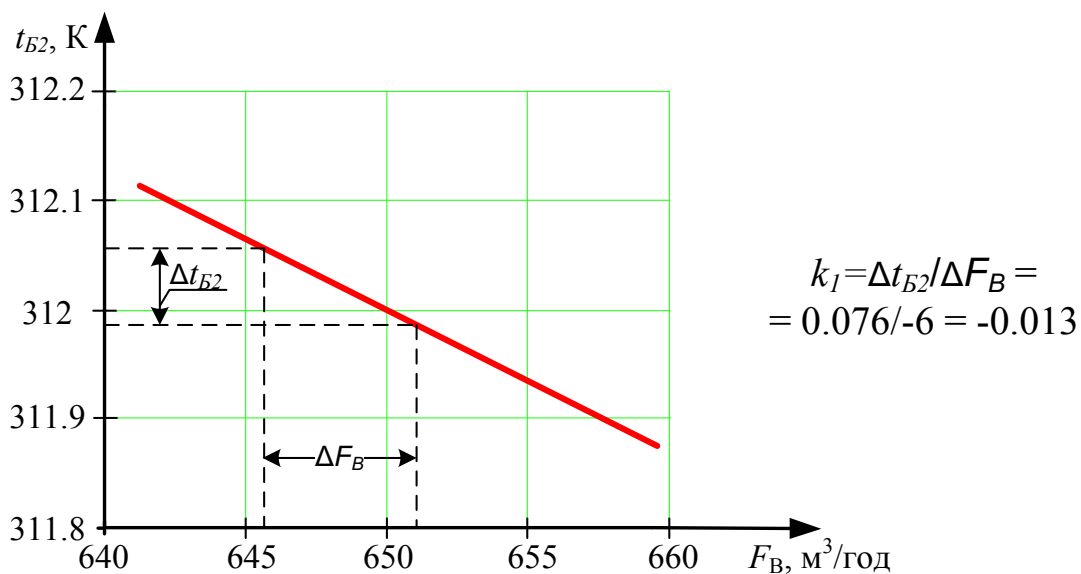
Залежність від температури холодної води:

$$t_{B2} = f_2(t_{B1}) \quad (2.30)$$

Визначаємо статичну характеристику за формулою (2.28) для функції (2.29). Результати обчислень записуємо у таблицю 2.12 та будуємо графік на рисунку 2.16.

**Таблиця 2.12** – Результати розрахунку статичної характеристики 2.29

$t_{B2}$	312.102	312.076	312.05	312.025	311.999	311.974	311.949	311.924	311.899
$F_B$	642	644	646	648	650	652	654	656	658

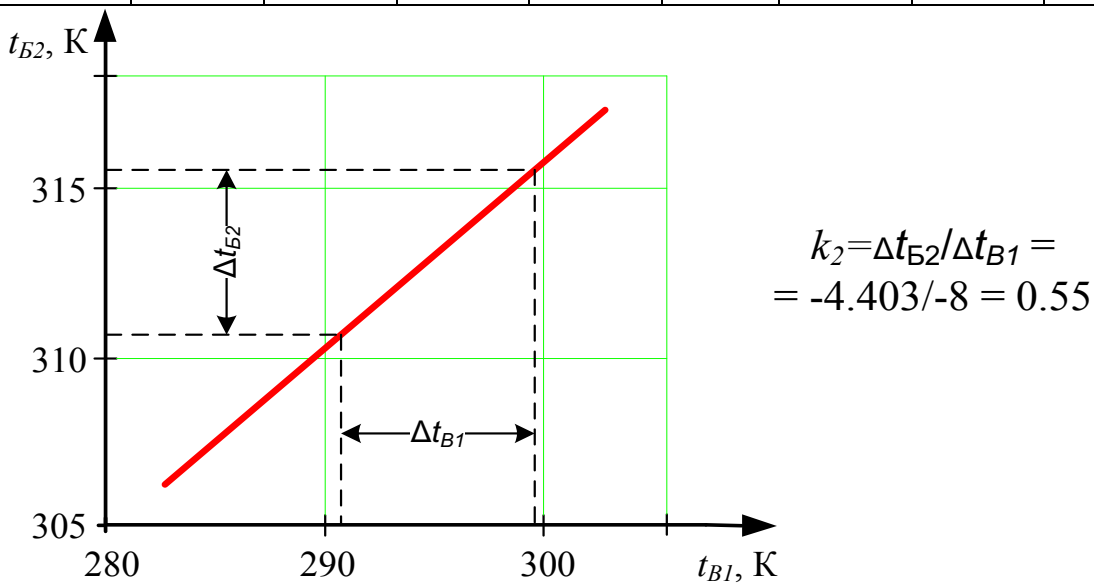


**Рисунок 2.16** – Статична характеристика залежності  $t_{B2}$  від  $F_B$

Визначаємо статичну характеристику за формулою (2.28) для функції (2.30). Результати обчислень записуємо у таблицю 2.13 та будуємо графік на рисунку 2.17.

**Таблиця 2.13** – Результати розрахунку статичної характеристики 2.30

$t_{B2}$	307.596	308.697	309.798	310.899	311.999	313.1	314.201	315.302	316.403
$t_{B1}$	285	287	289	291	293	295	297	299	301



**Рисунок 2.17** – Статична характеристика залежності  $t_{B2}$  від  $t_{B1}$

Для каналів  $t_{B2} \rightarrow F_{B1}$ ,  $t_{B2} \rightarrow t_{B1}$  рівняння для статичної характеристики має наступний вигляд:

$$Q_{B1} - Q_{B2} + Q_B - Q_K - Q_{ZS} + Q_{PP} = 0 \quad (2.31)$$

З усіма підстановками рівняння (2.31) має вигляд:

$$F_{B1}c_{B1}t_B - F_{B1}c_{B2}t_B + F_B t_{B1}c_B - F_B t_{B2}c_B - 0,2(F_{B1}c_{B1}t_{B1}q_3 + F_{B1}c_{B1}t_B) + F_{B1}c_{B1}t_{B1}q_3 = 0 \quad (2.32)$$

Виразимо температуру  $t_{B2}$  на виході з дефлегматора та побудуємо статичні характеристики:

$$t_{B2} = \frac{0,8F_{B1}c_{B1}t_{B1} + F_B t_{B1}c_B - F_B t_{B2}c_B + F_{B1}t_{B1}c_{B1}q_3}{F_{B1}c_{B1}} \quad (2.33)$$

Залежність від витрати бінарної суміші:

$$t_{B2} = f_3(F_{B1}) \quad (2.34)$$

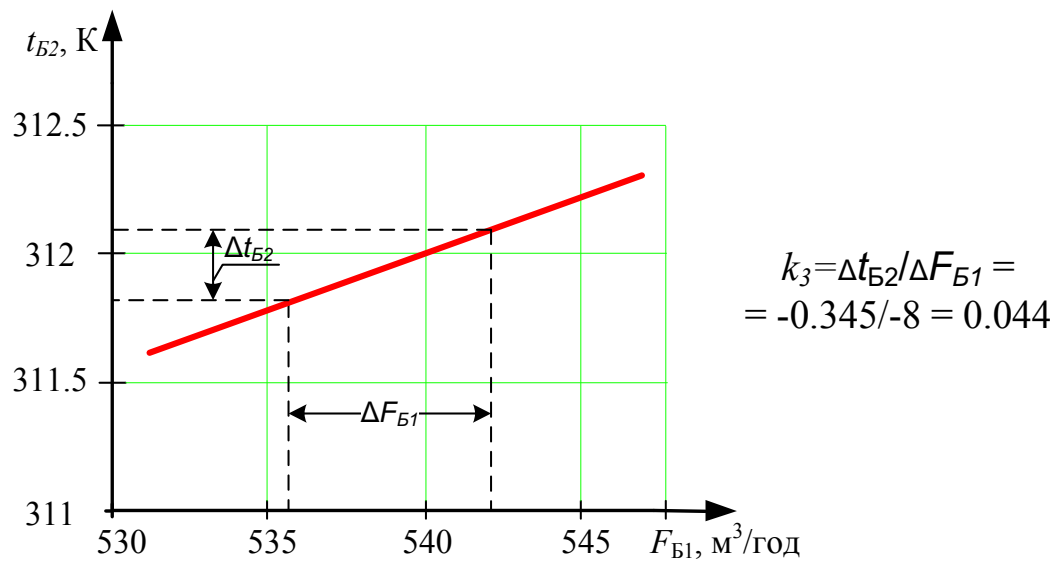
Залежність від витрати бінарної суміші:

$$t_{B2} = f_4(t_{B1}) \quad (2.35)$$

Визначаємо статичну характеристику за формулою (2.33) для функції (2.34). Результати обчислень записуємо у таблицю 2.14 та будуємо графік на рисунку 2.18.

**Таблиця 2.14** – Результати розрахунку статичної характеристики 2.34

$t_{B2}$	311.65	311.739	311.826	311.914	312	312.086	312.171	312.256	312.34
$F_{B1}$	532	534	536	538	540	542	544	546	548

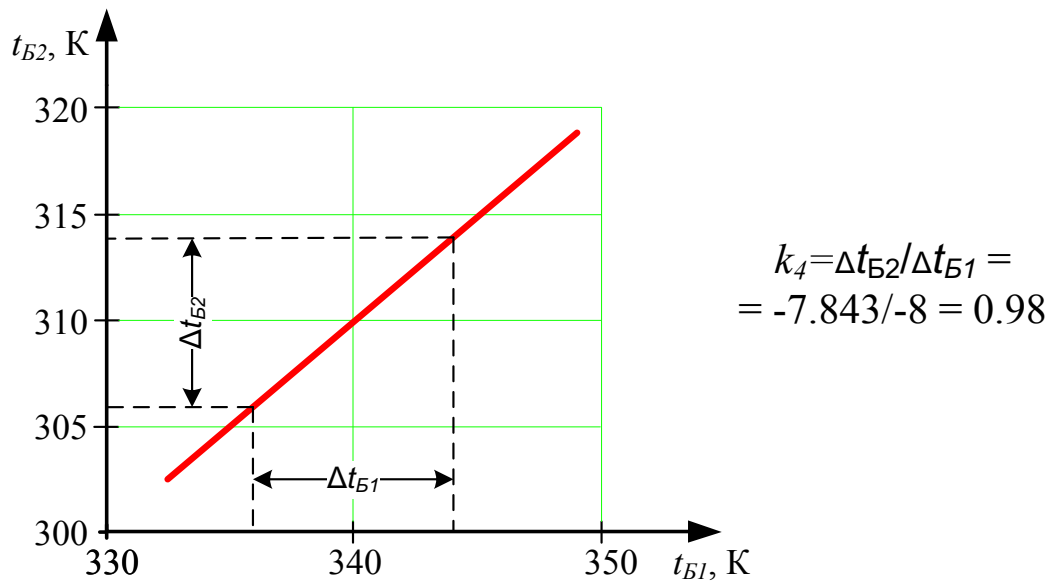


**Рисунок 2.18** – Статична характеристика залежності  $t_{B2}$  від  $F_{B1}$

Визначаємо статичну характеристику за формулою (2.33) для функції (2.35). Результати обчислень записуємо у таблицю 2.15 та будуємо графік на рисунку 2.19.

**Таблиця 2.15** – Результати розрахунку статичної характеристики 2.35

$t_{B2}$	304.158	306.118	308.079	310.039	312	313.961	315.921	317.882	319.842
$t_{B1}$	334	336	338	340	342	344	346	348	350



**Рисунок 2.19** – Статична характеристика залежності  $t_{B2}$  від  $t_{B1}$

## 2.2. Динамічні властивості роботи апаратів у технологічній схемі переробки вторинного нафтового дистилляту

### 2.2.1. Динамічні властивості колони ректифікації як об'єкта керування

Запишемо модель динаміки нижньої частини ректифікаційної колони:

$$Q_D - Q_{P1} + Q_{P2} - \Delta Q_{KS} - Q_{ZS} - Q_{PP} = V_P c_P \rho_P \frac{d t_{P1}}{d \tau} \quad (2.36)$$

де  $V_P = 9 \text{ м}^3$  – об'єм дистилляту в колоні ректифікації;

$c_P = 2.9 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  – теплоємність дистилляту в колоні ректифікації;

$\rho_P = 850 \text{ кг}/\text{м}^3$  – густина дистилляту в колоні ректифікації;

Розпишемо всі складові рівняння динаміки (2.36) для нижньої частини колони ректифікації:

$$F_D c_D t_D - F_{PCP} t_{P1} + F_{PCP} t_{P2} - F_1 s_1 (t_{P1} - t_\Phi) - 0,2 F_{PCP} t_{P2} - (F_D c_D t_D + F_{PCP} t_{P2}) q_1 = V_P c_P \rho_P \frac{d t_{P1}}{d \tau} \quad (2.37)$$

Запишемо модель динаміки для верхньої частини колони ректифікації:

$$Q_\Phi - Q_{B1} + \Delta Q_{KS} = V_\Phi c_\Phi \rho_\Phi \frac{d t_\Phi}{d \tau} \quad (2.38)$$

де  $V_\Phi = 5 \text{ м}^3$  – об'єм флегми в колоні ректифікації;

$c_\Phi = 3.260 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  – теплоємність флегми в колоні ректифікації;

$\rho_\Phi = 634 \text{ кг}/\text{м}^3$  – густина флегми в колоні ректифікації;

Розпишемо всі складові рівняння динаміки (2.38) для верхньої частини колони ректифікації:

$$F_\Phi c_\Phi t_\Phi - F_{B1} c_{B1} t_{B1} + F_1 s_1 (t_{P1} - t_\Phi) = V_\Phi c_\Phi \rho_\Phi \frac{d t_\Phi}{d \tau} \quad (2.39)$$

Лінеаризація рівняння динаміки для нижньої частини колони:

$$\Delta F_D c_D t_D + F_D c_D \Delta t_D - \Delta F_{PCP} t_{P1} - F_{PCP} \Delta t_{P1} + \Delta F_{PCP} t_{P2} + F_{PCP} \Delta t_{P2} - F_1 s_1 (\Delta t_{P1} - \Delta t_\Phi) - 0,2 \Delta F_{PCP} t_{P2} - 0,2 F_{PCP} \Delta t_{P2} - (\Delta F_D c_D t_D + \Delta F_{PCP} t_{P2}) q_1 - (F_D c_D \Delta t_D + F_{PCP} \Delta t_{P2}) q_1 = V_P c_P \rho_P \frac{d \Delta t_{P1}}{d \tau}$$

Виконаємо перетворення Лапласа:

$$\begin{aligned}
 & F_{\text{д}}(p)c_{\text{д}}t_{\text{д}} + F_{\text{д}}c_{\text{д}}t_{\text{д}}(p) - F_{\text{р}}(p)c_{\text{р}}t_{\text{р1}} - F_{\text{р}}c_{\text{р}}t_{\text{р1}}(p) + F_{\text{р}}(p)c_{\text{р}}t_{\text{р2}} + F_{\text{р}}c_{\text{р}}t_{\text{р2}}(p) - \\
 & - F_1s_1(t_{\text{р1}}(p) - t_{\text{ф}}(p)) - 0,2F_{\text{р}}(p)c_{\text{р}}t_{\text{р2}} - 0,2F_{\text{р}}c_{\text{р}}t_{\text{р2}}(p) - \\
 & (F_{\text{д}}(p)c_{\text{д}}t_{\text{д}} + F_{\text{р}}(p)c_{\text{р}}t_{\text{р2}})q_1 - (F_{\text{д}}c_{\text{д}}t_{\text{д}}(p) + F_{\text{р}}c_{\text{р}}t_{\text{р2}}(p))q_1 = V_{\text{р}}c_{\text{р}}\rho_{\text{р}}pt_{\text{р1}}(p) \quad (2.40)
 \end{aligned}$$

Лінеаризація рівняння динаміки для верхньої частини ректифікаційної колони:

$$\Delta F_{\text{ф}}c_{\text{ф}}t_{\text{ф}} + F_{\text{ф}}c_{\text{ф}}\Delta t_{\text{ф}} - \Delta F_{\text{б1}}c_{\text{б1}}t_{\text{б1}} - F_{\text{б1}}c_{\text{б1}}\Delta t_{\text{б1}} + F_1s_1(\Delta t_{\text{р1}} - \Delta t_{\text{ф}}) = V_{\text{ф}}c_{\text{ф}}\rho_{\text{ф}} \frac{d \Delta t_{\text{ф}}}{d \tau}$$

Виконаємо перетворення Лапласа:

$$\begin{aligned}
 & F_{\text{ф}}(p)c_{\text{ф}}t_{\text{ф}} + F_{\text{ф}}c_{\text{ф}}t_{\text{ф}}(p) - F_{\text{б1}}(p)c_{\text{б1}}t_{\text{б1}} - F_{\text{б1}}c_{\text{б1}}t_{\text{б1}}(p) + \\
 & + F_1s_1(t_{\text{р1}}(p) - t_{\text{ф}}(p)) = V_{\text{ф}}c_{\text{ф}}\rho_{\text{ф}}pt_{\text{ф}}(p) \quad (2.41)
 \end{aligned}$$

З рівняння (2.41) виражаємо температуру флегми  $t_{\text{ф}}$  та підставляємо в рівняння (2.40). Отримаємо:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{ф}}(p) &= \frac{F_{\text{ф}}(p)t_{\text{ф}}c_{\text{ф}} - F_{\text{б1}}(p)t_{\text{б1}}c_{\text{б1}} - F_{\text{б1}}t_{\text{б1}}c_{\text{б1}}(p) + F_1s_1t_{\text{р1}}(p)}{V_{\text{ф}}c_{\text{ф}}\rho_{\text{ф}}p - F_{\text{ф}}c_{\text{ф}} + F_1s_1} \\
 & F_{\text{д}}(p)c_{\text{д}}t_{\text{д}} + F_{\text{д}}c_{\text{д}}t_{\text{д}}(p) - F_{\text{р}}(p)c_{\text{р}}t_{\text{р1}} - F_{\text{р}}c_{\text{р}}t_{\text{р1}}(p) + F_{\text{р}}(p)c_{\text{р}}t_{\text{р2}} + F_{\text{р}}c_{\text{р}}t_{\text{р2}}(p) - \\
 & - F_1s_1(t_{\text{р1}}(p) - \frac{F_{\text{ф}}(p)t_{\text{ф}}c_{\text{ф}} - F_{\text{б1}}(p)t_{\text{б1}}c_{\text{б1}} - F_{\text{б1}}t_{\text{б1}}c_{\text{б1}}(p) + F_1s_1t_{\text{р1}}(p)}{V_{\text{ф}}c_{\text{ф}}\rho_{\text{ф}}p - F_{\text{ф}}c_{\text{ф}} + F_1s_1}) - \\
 & - 0,2F_{\text{р}}(p)c_{\text{р}}t_{\text{р2}} - 0,2F_{\text{р}}c_{\text{р}}t_{\text{р2}}(p) - (F_{\text{д}}(p)c_{\text{д}}t_{\text{д}} + F_{\text{р}}(p)c_{\text{р}}t_{\text{р2}})q_1 - \\
 & - (F_{\text{д}}c_{\text{д}}t_{\text{д}}(p) + F_{\text{р}}c_{\text{р}}t_{\text{р2}}(p))q_1 = V_{\text{р}}c_{\text{р}}\rho_{\text{р}}pt_{\text{р1}}(p) \quad (2.42)
 \end{aligned}$$

Розглянемо канал керування  $F_{\text{ф}} \rightarrow t_{\text{р1}}$ . Спростуємо рівняння (2.42):

$$V_{\text{р}}c_{\text{р}}\rho_{\text{р}}pt_{\text{р1}}(p) + F_{\text{р}}c_{\text{р}}t_{\text{р1}}(p) + F_1s_1t_{\text{р1}}(p) = F_1s_1 \frac{F_{\text{ф}}(p)t_{\text{ф}}c_{\text{ф}} + F_1s_1t_{\text{р1}}(p)}{V_{\text{ф}}c_{\text{ф}}\rho_{\text{ф}}p - F_{\text{ф}}c_{\text{ф}} + F_1s_1} \quad (2.43)$$

Зведемо рівняння (2.43) до канонічної форми та введемо позначення:

$$\begin{aligned}
 & \frac{V_{\text{р}}c_{\text{р}}\rho_{\text{р}}V_{\text{ф}}c_{\text{ф}}\rho_{\text{ф}}}{(F_{\text{р}}c_{\text{р}} + F_1s_1)(F_1s_1 - F_{\text{ф}}c_{\text{ф}}) - F_1^2s_1^2} \cdot p^2t_{\text{р1}}(p) + \\
 & + \frac{V_{\text{р}}c_{\text{р}}\rho_{\text{р}}(F_1s_1 - F_{\text{ф}}c_{\text{ф}}) + (F_{\text{р}}t_{\text{р1}}c_{\text{р}} + F_1s_1)V_{\text{ф}}c_{\text{ф}}\rho_{\text{ф}}}{(F_{\text{р}}c_{\text{р}} + F_1s_1)(F_1s_1 - F_{\text{ф}}c_{\text{ф}}) - F_1^2s_1^2} \cdot pt_{\text{р1}}(p) + t_{\text{р1}}(p) = \\
 & = \frac{F_1s_1c_{\text{ф}}t_{\text{ф}}}{(F_{\text{р}}c_{\text{р}} + F_1s_1)(F_1s_1 - F_{\text{ф}}c_{\text{ф}}) - F_1^2s_1^2} \cdot F_{\text{ф}}(p)
 \end{aligned}$$



де

$$A_2 = \frac{V_P c_P \rho_P V_\Phi c_\Phi \rho_\Phi}{(F_p c_p + F_1 s_1)(F_1 s_1 - F_\Phi c_\Phi) - F_1^2 s_1^2} = 24.27;$$

$$A_1 = \frac{V_P c_P \rho_P (F_1 s_1 - F_\Phi c_\Phi) + (F_p t_{p1} c_p + F_1 s_1) V_\Phi c_\Phi \rho_\Phi}{(F_p c_p + F_1 s_1)(F_1 s_1 - F_\Phi c_\Phi) - F_1^2 s_1^2} = 21.33;$$

$$k_1 = \frac{F_1 s_1 c_\Phi t_\Phi}{(F_p c_p + F_1 s_1)(F_1 s_1 - F_\Phi c_\Phi) - F_1^2 s_1^2} = 0.634.$$

Маємо рівняння:

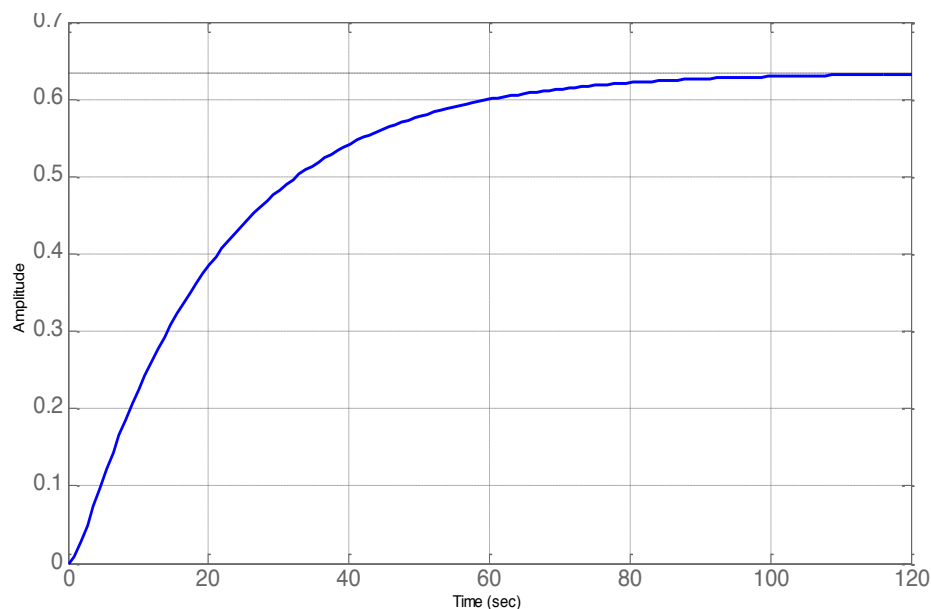
$$A_2 p^2 t_{p1}(p) + A_1 p t_{p1}(p) + t_{p1}(p) = k_1 F_\Phi(p);$$

Передавальна функція каналу  $F_\Phi \rightarrow t_{p1}$  має вигляд:

$$W_{F_\Phi \rightarrow t_{p1}}(p) = \frac{t_{p1}(p)}{F_\Phi(p)};$$

$$W_{F_\Phi \rightarrow t_{p1}}(p) = \frac{k_1}{A_2 p^2 + A_1 p + 1} = \frac{0.634}{24.27 p^2 + 21.33 p + 1}. \quad (2.44)$$

Перехідна характеристика по каналу  $F_\Phi \rightarrow t_{p1}$  побудована в програмі MatLab зображена на рисунку 2.20:



**Рисунок 2.20** – Перехідна характеристика по каналу  $F_\Phi \rightarrow t_{p1}$

Розглянемо канал керування  $F_{B1} \rightarrow t_{P1}$ . Спростуємо рівняння (2.42):

$$V_P c_P \rho_P p t_{P1}(p) + F_P c_P t_{P1}(p) + F_1 s_1 t_{P1}(p) = \frac{-F_{B1}(p) t_{B1} c_{B1} + F_1 s_1 t_{P1}(p)}{V_\Phi c_\Phi \rho_\Phi p - F_\Phi c_\Phi + F_1 s_1} \quad (2.45)$$

Зведемо рівняння (2.45) до канонічної форми та введемо позначення:

$$\begin{aligned} & \frac{V_P c_P \rho_P V_\Phi c_\Phi \rho_\Phi}{(F_P c_P + F_1 s_1)(F_1 s_1 - F_\Phi c_\Phi) - F_1^2 s_1^2} \cdot p^2 t_{P1}(p) + \\ & + \frac{V_P c_P \rho_P (F_1 s_1 - F_\Phi c_\Phi) + ((F_P t_{P1} c_P + F_1 s_1) V_\Phi c_\Phi \rho_\Phi)}{(F_P c_P + F_1 s_1)(F_1 s_1 - F_\Phi c_\Phi) - F_1^2 s_1^2} \cdot p t_{P1}(p) + t_{P1}(p) = \\ & = \frac{-F_1 s_1 t_{B1} c_{B1}}{(F_P c_P + F_1 s_1)(F_1 s_1 - F_\Phi c_\Phi) - F_1^2 s_1^2} \cdot F_{B1}(p) \end{aligned}$$

де

$$k_2 = \frac{-F_1 s_1 t_{B1} c_{B1}}{(F_P c_P + F_1 s_1)(F_1 s_1 - F_\Phi c_\Phi) - F_1^2 s_1^2} = -0.695.$$

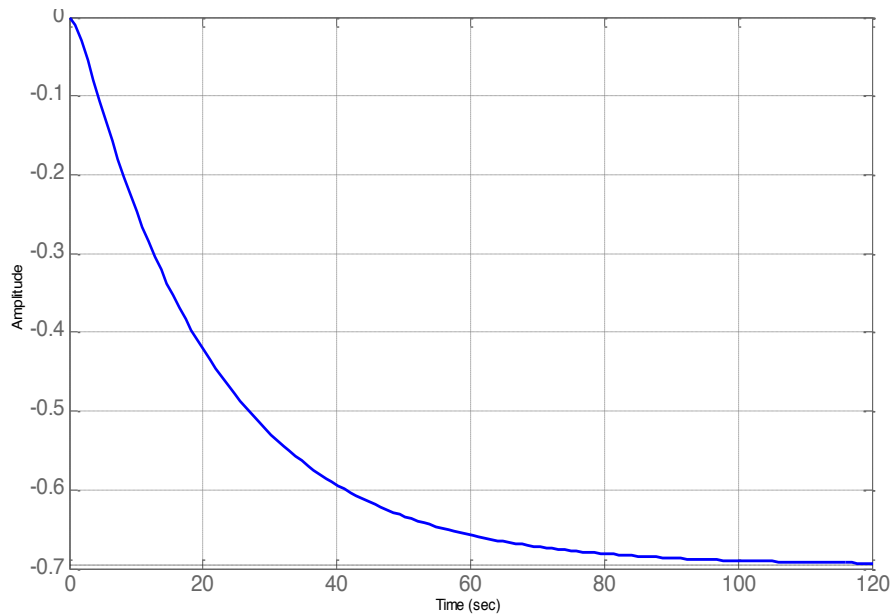
Маємо рівняння:

$$A_2 p^2 t_{P1}(p) + A_1 p t_{P1}(p) + t_{P1}(p) = k_2 F_{B1}(p);$$

Передавальна функція каналу  $F_{B1} \rightarrow t_{P1}$  має вигляд:

$$\begin{aligned} W_{F_{B1} \rightarrow t_{P1}}(p) &= \frac{t_{P1}(p)}{F_{B1}(p)}; \\ W_{F_{B1} \rightarrow t_{P1}}(p) &= \frac{k_2}{A_2 p^2 + A_1 p + 1} = \frac{-0.695}{24.27 p^2 + 21.33 p + 1}. \end{aligned} \quad (2.46)$$

Перехідна характеристика по каналу  $F_{B1} \rightarrow t_{P1}$  побудована в програмі MatLab зображена на рисунку 2.21:



**Рисунок 2.21** – Перехідна характеристика по каналу  $F_{B1} \rightarrow t_{P1}$

Розглянемо канал керування  $t_{B1} \rightarrow t_{P1}$ . Спростуємо рівняння (2.42):

$$V_P c_P \rho_P p t_{P1}(p) + F_P c_P t_{P1}(p) + F_1 s_1 t_{P1}(p) = \frac{-F_{B1} t_{B1} c_{B1}(p) + F_1 s_1 t_{P1}(p)}{V_\Phi c_\Phi \rho_\Phi p - F_\Phi c_\Phi + F_1 s_1} \quad (2.47)$$

Зведемо рівняння (2.47) до канонічної форми та введемо позначення:

$$\begin{aligned} & \frac{V_P c_P \rho_P V_\Phi c_\Phi \rho_\Phi}{(F_P c_P + F_1 s_1)(F_1 s_1 - F_\Phi c_\Phi) - F_1^2 s_1^2} \cdot p^2 t_{P1}(p) + \\ & + \frac{V_P c_P \rho_P (F_1 s_1 - F_\Phi c_\Phi) + ((F_P t_{P1} c_P + F_1 s_1) V_\Phi c_\Phi \rho_\Phi)}{(F_P c_P + F_1 s_1)(F_1 s_1 - F_\Phi c_\Phi) - F_1^2 s_1^2} \cdot p t_{P1}(p) + t_{P1}(p) = \\ & = \frac{-F_1 s_1 F_{B1} c_{B1}}{(F_P c_P + F_1 s_1)(F_1 s_1 - F_\Phi c_\Phi) - F_1^2 s_1^2} \cdot t_{B1}(p) \end{aligned}$$

де

$$k_3 = \frac{-F_1 s_1 F_{B1} c_{B1}}{(F_P c_P + F_1 s_1)(F_1 s_1 - F_\Phi c_\Phi) - F_1^2 s_1^2} = -1.097.$$

Маємо рівняння:

$$A_2 p^2 t_{P1}(p) + A_1 p t_{P1}(p) + t_{P1}(p) = k_3 t_{B1}(p);$$

Передавальна функція каналу  $t_{B1} \rightarrow t_{P1}$  має вигляд:

$$W_{t_{B1} \rightarrow t_{P1}}(p) = \frac{t_{P1}(p)}{t_{B1}(p)};$$

$$W_{t_{B1} \rightarrow t_{P1}}(p) = \frac{k_3}{A_2 p^2 + A_1 p + 1} = \frac{-1.097}{24.27 p^2 + 21.33 p + 1}. \quad (2.48)$$

Перехідна характеристика по каналу  $t_{B1} \rightarrow t_{P1}$  побудована в програмі MatLab зображена на рисунку 2.22:

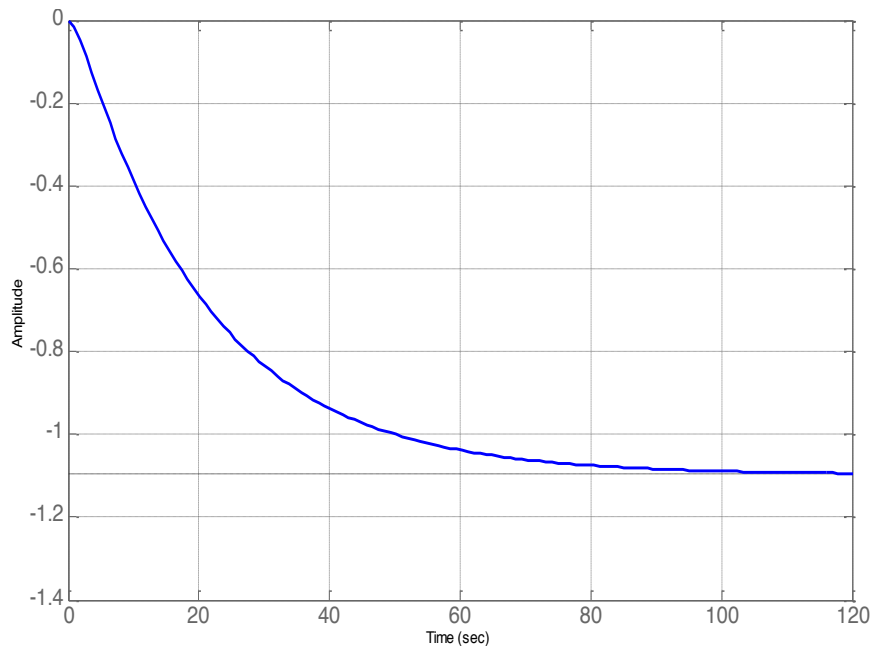


Рисунок 2.22 – Перехідна характеристика по каналу  $t_{B1} \rightarrow t_{P1}$

### 2.2.2. Динамічні властивості кип'ятильника як об'єкта керування

Запишемо модель динаміки для міжтрубного простору кип'ятильника<sup>[6]</sup>:

$$Q_{\Pi} - Q_K - \Delta Q_{KS} - Q_{ZS} = V_K c_K \rho_K \frac{d t_K}{d \tau} \quad (2.49)$$

де  $V_K = 5 \text{ м}^3$  – об'єм конденсату в кип'ятильнику;

$c_K = 4.2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  – теплоємність конденсату в кип'ятильнику;

$\rho_K = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$  – густина конденсату в кип'ятильнику;

Розпишемо всі складові рівняння динаміки (2.49) для міжтрубного простору кип'ятильника:

$$F_{\Pi} i_{\Pi} \rho_{\Pi} - F_{\Pi} \rho_{\Pi} c_K t_K - F_2 s_2 (t_{P2} - t_K) - 0,2 F_{\Pi} i_{\Pi} \rho_{\Pi} = V_K c_K \rho_K \frac{d t_K}{d \tau} \quad (2.50)$$

Запишемо модель динаміки для трубного простору кип'ятильника:

$$Q_{P1} - Q_{P2} + \Delta Q_{KS} - Q_{ПP} = V_P c_P \rho_P \frac{d t_{P2}}{d \tau} \quad (2.51)$$

де  $V_P = 8 \text{ м}^3$  – об'єм рециркуляту в кип'ятильнику;

$c_P = 2.9 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  – теплоємність рециркуляту в кип'ятильнику;

$\rho_P = 850 \text{ кг}/\text{м}^3$  – густина рециркуляту в кип'ятильнику;

Розпишемо всі складові рівняння динаміки (2.51) для трубного простору кип'ятильника:

$$F_P c_P t_{P1} - F_P c_P t_{P2} + F_2 s_2 (t_{P2} - t_K) - F_P q_2 = V_P c_P \rho_P \frac{d t_{P2}}{d \tau} \quad (2.52)$$

Лінеаризація рівняння динаміки для міжтрубного простору:

$$\Delta F_{Пi\Pi} \rho_{П} - \Delta F_{П\rho_{П} c_K t_K} - F_{П\rho_{П} c_K} \Delta t_K - F_2 s_2 (\Delta t_{P2} - \Delta t_K) - 0,2 \Delta F_{Пi\Pi} \rho_{П} = V_K c_K \rho_K \frac{d \Delta t_K}{d \tau}$$

Виконаємо перетворення Лапласа:

$$F_{П}(p) i_{П} \rho_{П} - F_{П}(p) \rho_{П} c_K t_K - F_{П\rho_{П} c_K} t_K(p) - F_2 s_2 (t_{P2}(p) - t_K(p)) - \\ - 0,2 F_{П}(p) i_{П} \rho_{П} = V_K c_K \rho_K p t_K(p) \quad (2.53)$$

Лінеаризація рівняння динаміки для трубного простору кип'ятильника:

$$\Delta F_P c_P t_{P1} + F_P c_P \Delta t_{P1} - \Delta F_P c_P t_{P2} - F_P c_P \Delta t_{P2} + F_2 s_2 (\Delta t_{P2} - \Delta t_K) - \\ - \Delta F_P q_2 = V_P c_P \rho_P \frac{d \Delta t_{P2}}{d \tau}$$

Виконаємо перетворення Лапласа:

$$F_P(p) c_P t_{P1} + F_P c_P t_{P1}(p) - F_P(p) c_P t_{P2} - F_P c_P t_{P2}(p) + F_2 s_2 (t_{P2}(p) - t_K(p)) - \\ - F_P(p) q_2 = V_P c_P \rho_P p t_{P2}(p) \quad (2.54)$$

З рівняння (2.53) виражаємо температуру конденсату  $t_K$  та підставляємо в рівняння (2.54). Отримаємо:

$$t_K(p) = \frac{0.8 F_{П}(p) \rho_{П} i_{П} - F_{П}(p) \rho_{П} t_K c_K - F_2 s_2 t_{P2}(p)}{V_K c_K \rho_K p + F_{П}(p) \rho_{П} c_K - F_2 s_2}$$

$$F_P(p) c_P t_{P1} + F_P c_P t_{P1}(p) - F_P(p) c_P t_{P2} - F_P c_P t_{P2}(p) + F_2 s_2 (t_{P2}(p) - \\ - \frac{0.8 F_{П}(p) \rho_{П} i_{П} - F_{П}(p) \rho_{П} t_K c_K - F_2 s_2 t_{P2}(p)}{V_K c_K \rho_K p + F_{П}(p) \rho_{П} c_K - F_2 s_2}) - F_P(p) q_2 = V_P c_P \rho_P p t_{P2}(p) \quad (2.55)$$

Розглянемо канал керування  $F_{\Pi} \rightarrow t_{p2}$ . Спростуємо рівняння (2.55):

$$\begin{aligned} & V_{pCp}\rho_p p t_{p2}(p) + F_{pCp} t_{p2}(p) - F_2 s_2 t_{p2}(p) = \\ & = -F_2 s_2 \frac{0.8 F_{\Pi}(p) \rho_{\Pi} i_{\Pi} - F_{\Pi}(p) \rho_{\Pi} t_{kCk} - F_2 s_2 t_{p2}(p)}{V_{kCk} \rho_k p + F_{\Pi}(p) \rho_{\Pi} c_k - F_2 s_2} \end{aligned}$$

Зведемо рівняння (2.43) до канонічної форми та введемо позначення:

$$\begin{aligned} & \frac{V_{kCk} \rho_k V_{pCp} \rho_p}{(F_{\Pi} \rho_{\Pi} c_k - F_2 s_2)(-F_2 s_2 + F_p c_p) - F_2^2 s_2^2} \cdot p^2 t_{p2}(p) + \\ & + \frac{V_{pCp} \rho_p (F_{\Pi} \rho_{\Pi} c_k - F_2 s_2) + (-F_2 s_2 + F_p c_p) V_{kCk} \rho_k}{(F_{\Pi} \rho_{\Pi} c_k - F_2 s_2)(-F_2 s_2 + F_p c_p) - F_2^2 s_2^2} \cdot p t_{p2}(p) + t_{p2}(p) = \\ & = \frac{-F_2 s_2 (\rho_{\Pi} i_{\Pi} - \rho_{\Pi} t_{kCk})}{(F_{\Pi} \rho_{\Pi} c_k - F_2 s_2)(-F_2 s_2 + F_p c_p) - F_2^2 s_2^2} \cdot F_{\Pi}(p) \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{V_{kCk} \rho_k V_{pCp} \rho_p}{(F_{\Pi} \rho_{\Pi} c_k - F_2 s_2)(-F_2 s_2 + F_p c_p) - F_2^2 s_2^2} = 0.413; \\ A_1 &= \frac{V_{pCp} \rho_p (F_{\Pi} \rho_{\Pi} c_k - F_2 s_2) + (-F_2 s_2 + F_p c_p) V_{kCk} \rho_k}{(F_{\Pi} \rho_{\Pi} c_k - F_2 s_2)(-F_2 s_2 + F_p c_p) - F_2^2 s_2^2} = 1.153; \\ k_1 &= \frac{-F_2 s_2 (\rho_{\Pi} i_{\Pi} - \rho_{\Pi} t_{kCk})}{(F_{\Pi} \rho_{\Pi} c_k - F_2 s_2)(-F_2 s_2 + F_p c_p) - F_2^2 s_2^2} = 3.024. \end{aligned}$$

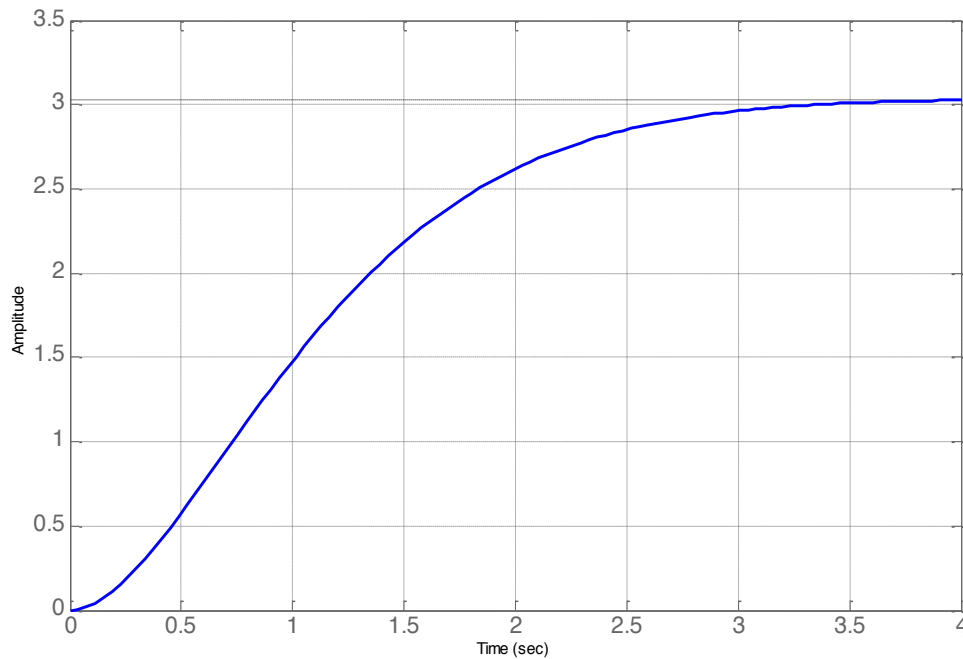
Маємо рівняння:

$$A_2 p^2 t_{p2}(p) + A_1 p t_{p2}(p) + t_{p2}(p) = k_1 F_{\Pi}(p);$$

Передавальна функція каналу  $F_{\Pi} \rightarrow t_{p2}$  має вигляд:

$$\begin{aligned} W_{F_{\Pi} \rightarrow t_{p2}}(p) &= \frac{t_{p2}(p)}{F_{\Pi}(p)}; \\ W_{F_{\Pi} \rightarrow t_{p2}}(p) &= \frac{k_1}{A_2 p^2 + A_1 p + 1} = \frac{3.024}{0.413 p^2 + 1.153 p + 1}. \end{aligned} \quad (2.56)$$

Перехідна характеристика по каналу  $F_{\Pi} \rightarrow t_{p2}$  побудована в програмі MatLab зображена на рисунку 2.23:



**Рисунок 2.23** – Перехідна характеристика по каналу  $F_{\Pi} \rightarrow t_{p2}$

Для каналів  $F_P \rightarrow t_{p2}$  та  $t_p \rightarrow t_{p2}$  маємо наступне рівняння динаміки:

$$Q_{P1} + Q_{\Pi} - Q_K - Q_{ZS} - Q_{P2} - Q_{\Pi P} = V_P c_P \rho_P \frac{d t_{p2}}{d \tau} \quad (2.57)$$

Розпишемо усі складові рівняння (2.57):

$$F_P c_P t_{P1} + F_{\Pi} i_{\Pi} \rho_{\Pi} - F_{\Pi} \rho_{\Pi} c_K t_K - 0,2 F_{\Pi} i_{\Pi} \rho_{\Pi} - F_P c_P t_{P2} - F_P q_2 = V_P c_P \rho_P \frac{d t_{p2}}{d \tau} \quad (2.58)$$

Лінеаризуємо рівняння (2.58):

$$\begin{aligned} & \Delta F_P c_P t_{P1} + F_P c_P \Delta t_{P1} + \Delta F_{\Pi} i_{\Pi} \rho_{\Pi} - \Delta F_{\Pi} \rho_{\Pi} c_K t_K - \\ & - F_{\Pi} \rho_{\Pi} c_K \Delta t_K - 0,2 \Delta F_{\Pi} i_{\Pi} \rho_{\Pi} - \Delta F_P c_P t_{P2} - F_P c_P \Delta t_{P2} - \Delta F_P q_2 = V_P c_P \rho_P \frac{d \Delta t_{p2}}{d \tau} \end{aligned}$$

Виконаємо перетворення Лапласа:

$$\begin{aligned} & F_P(p) c_P t_{P1} + F_P c_P t_{P1}(p) + F_{\Pi}(p) i_{\Pi} \rho_{\Pi} - F_{\Pi}(p) \rho_{\Pi} c_K t_K - F_{\Pi} \rho_{\Pi} c_K t_K(p) - \\ & - 0,2 F_{\Pi}(p) i_{\Pi} \rho_{\Pi} - F_P(p) c_P t_{P2} - F_P(p) q_2 = V_P c_P \rho_P p t_{p2}(p) \end{aligned} \quad (2.59)$$

Розглянемо канал  $F_P \rightarrow t_{p2}$ . Спростимо рівняння (2.59). Отримаємо:

$$V_P c_P \rho_P p t_{p2}(p) + F_P c_P t_{P2}(p) = F_P(p) c_P t_{P1} - F_P(p) q_2 - F_P(p) c_P t_{P2}.$$

Виконаємо заміну:

$$A_1 = \frac{V_P c_P \rho_P}{c_P F_P} = 7.083;$$

$$k_2 = \frac{c_P t_{P1} - q - c_P t_{P2}}{c_P F_P} = -2.269.$$

Маємо рівняння:

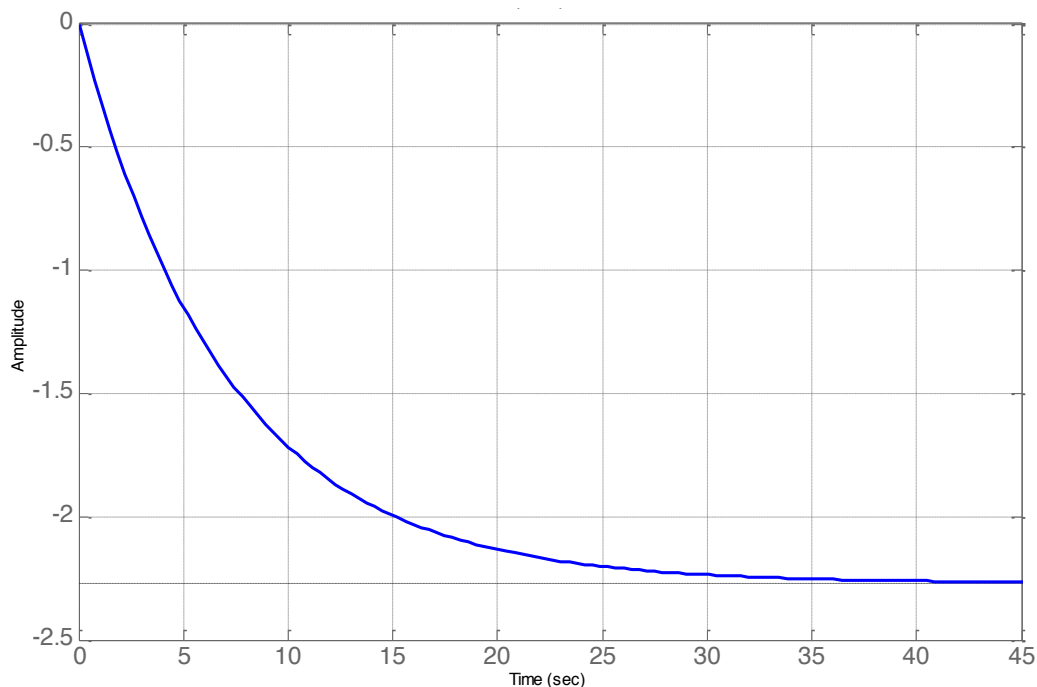
$$A_1 p t_{P2}(p) + t_{P2}(p) = k_2 F_P(p);$$

Передавальна функція каналу  $F_P \rightarrow t_{P2}$  має вигляд:

$$W_{F_P \rightarrow t_{P2}}(p) = \frac{t_{P2}(p)}{F_P(p)};$$

$$W_{F_P \rightarrow t_{P2}}(p) = \frac{k_2}{A_1 p + 1} = \frac{-2.269}{7.083 p + 1}. \quad (2.60)$$

Перехідна характеристика по каналу  $F_P \rightarrow t_{P2}$  побудована в програмі MatLab зображена на рисунку 2.24:



**Рисунок 2.24** – Перехідна характеристика по каналу  $F_P \rightarrow t_{P2}$

Розглянемо канал  $t_{P1} \rightarrow t_{P2}$ . Спростимо рівняння (2.59). Отримаємо:

$$V_P c_P \rho_P p t_{P2}(p) + F_P c_P t_{P2}(p) = F_P c_P t_{P1}(p)$$



Виконаємо заміну:

$$k_3 = \frac{c_p F_p}{c_p F_p} = 1.$$

Маємо рівняння:

$$A_1 p t_{p2}(p) + t_{p2}(p) = k_3 t_{p1}(p);$$

Передавальна функція каналу  $t_{p1} \rightarrow t_{p2}$  має вигляд:

$$W_{t_{p1} \rightarrow t_{p2}}(p) = \frac{t_{p2}(p)}{t_{p1}(p)};$$

$$W_{t_{p1} \rightarrow t_{p2}}(p) = \frac{k_3}{A_1 p + 1} = \frac{1}{7.083p + 1}. \quad (2.61)$$

Перехідна характеристика по каналу  $t_{p1} \rightarrow t_{p2}$  побудована в програмі MatLab зображена на рисунку 2.25:

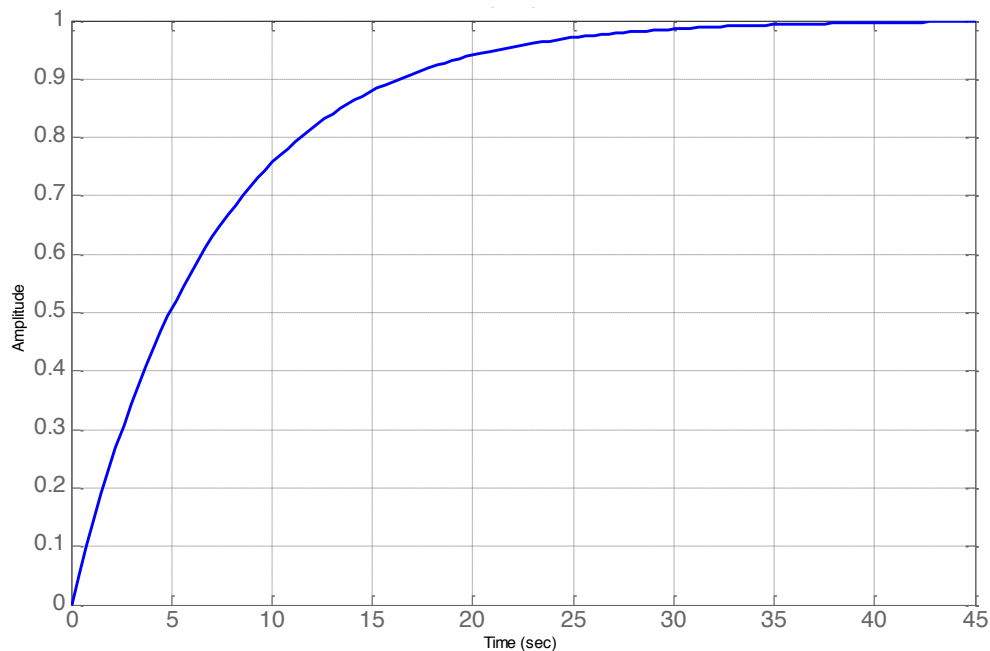


Рисунок 2.25 – Перехідна характеристика по каналу  $t_{p1} \rightarrow t_{p2}$

### 2.2.3. Динамічні властивості дефлегматора як об'єкта керування

Запишемо модель динаміки для міжтрубного простору дефлегматора:

$$Q_B - Q_K + \Delta Q_{KS} = V_B c_B \rho_B \frac{d t_{B2}}{d \tau} \quad (2.62)$$

де  $V_B = 7 \text{ м}^3$  – об'єм холодної води в дефлегматорі;

$c_B = 4.2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  – теплоємність холодної води в дефлегматорі;

$\rho_B = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$  – густина холодної води в дефлегматорі;

Розпишемо всі складові рівняння динаміки (2.62) для міжтрубного простору дефлегматора:

$$F_B t_{B1} c_B - F_B t_{B2} c_B + F_3 s_3 (t_{B2} - t_{B1}) = V_B c_B \rho_B \frac{d t_{B2}}{d \tau} \quad (2.63)$$

Запишемо модель динаміки для трубного простору дефлегматора:

$$Q_{B1} - Q_{B2} - \Delta Q_{KS} - Q_{ZS} + Q_{ПР} = V_{B2} c_{B2} \rho_{B2} \frac{d t_{B2}}{d \tau} \quad (2.64)$$

де  $V_{B2} = 5 \text{ м}^3$  – об'єм флегми в дефлегматорі;

$c_{B2} = 3.260 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  – теплоємність флегми в дефлегматорі;

$\rho_{B2} = 750 \text{ кг}/\text{м}^3$  – густина флегми в дефлегматорі;

Розпишемо всі складові рівняння динаміки (2.64) для трубного простору дефлегматора:

$$\begin{aligned} F_{B1} c_{B1} t_{B1} - F_{B1} c_{B1} t_{B2} - F_3 s_3 (t_{B2} - t_{B1}) - 0,2 (F_{B1} c_{B1} t_{B1} q_3 + F_{B1} c_{B1} t_{B1}) + \\ + F_{B1} c_{B1} t_{B1} q_3 = V_{B2} c_{B2} \rho_{B2} \frac{d t_{B2}}{d \tau} \end{aligned} \quad (2.65)$$

Лінеаризація рівняння динаміки для міжтрубного простору:

$$\Delta F_B t_{B1} c_B + F_B \Delta t_{B1} c_B - \Delta F_B t_{B2} c_B - F_B c_B \Delta t_{B2} + F_3 s_3 (\Delta t_{B2} - \Delta t_{B1}) = V_B c_B \rho_B \frac{d \Delta t_{B2}}{d \tau}$$

Виконаємо перетворення Лапласа:

$$\begin{aligned} F_B(p) t_{B1} c_B + F_B t_{B1}(p) c_B - F_B(p) c_B t_{B2} - F_B c_B t_{B2}(p) + F_3 s_3 (t_{B2}(p) - \\ - t_{B1}(p)) = V_B c_B \rho_B p t_{B2}(p) \end{aligned} \quad (2.66)$$

Лінеаризація рівняння динаміки для трубного простору дефлегматора:

$$\begin{aligned} \Delta F_{B1} c_{B1} t_{B1} + F_{B1} c_{B1} \Delta t_{B1} - \Delta F_{B1} c_{B1} t_{B2} - F_{B1} c_{B1} \Delta t_{B2} - F_3 s_3 (\Delta t_{B1} - \Delta t_{B2}) - \\ - 0,2 (\Delta F_{B1} c_{B1} t_{B1} q_3 + \Delta F_{B1} c_{B1} t_{B1}) - 0,2 (F_{B1} c_{B1} \Delta t_{B1} q_3 + F_{B1} c_{B1} \Delta t_{B1}) + \\ + \Delta F_{B1} c_{B1} t_{B1} q_3 + F_{B1} c_{B1} \Delta t_{B1} q_3 = V_{B2} c_{B2} \rho_{B2} \frac{d \Delta t_{B2}}{d \tau} \end{aligned}$$

Виконаємо перетворення Лапласа:

$$\begin{aligned}
& F_{B1}(p)c_{B1}t_{B1} + F_{B1}c_{B1}t_{B1}(p) - F_{B1}(p)c_{B1}t_{B2} - F_{B1}c_{B1}t_{B2}(p) - F_3s_3(t_{B2}(p) - t_{B2}(p)) - \\
& - 0,2 (F_{B1}(p)c_{B1}t_{B1}q_3 + F_{B1}(p)c_{B1}t_{B1}) - 0,2 (F_{B1}c_{B1}t_{B1}(p)q_3 + F_{B1}c_{B1}t_{B1}(p)) + \\
& + F_{B1}(p)c_{B1}t_{B1}q_3 + F_{B1}c_{B1}t_{B1}(p)q_3 = V_{B2}c_{B2}\rho_{B2} \frac{d t_{B2}}{d \tau} \quad (2.67)
\end{aligned}$$

З рівняння (2.66) виражаємо температуру води на виході з дефлегматора  $t_{B2}$  та підставляємо в рівняння (2.67). Отримаємо:

$$t_{B2}(p) = \frac{F_B(p)c_B t_{B1} + F_B c_B t_{B1}(p) - F_B(p)c_B t_{B2} + F_3 s_3 t_\Phi(p)}{V_B c_B \rho_B p + F_B c_B + F_3 s_3}$$

$$\begin{aligned}
& F_{B1}(p)c_{B1}t_{B1} + F_{B1}c_{B1}t_{B1}(p) - F_{B1}(p)c_{B1}t_{B1} - F_{B1}c_{B1}t_{B1}(p) - F_3s_3(t_{B2}(p) - \\
& - \frac{F_B(p)c_B t_{B1} + F_B c_B t_{B1}(p) - F_B(p)c_B t_{B2} + F_3 s_3 t_\Phi(p)}{V_B c_B \rho_B p + F_B c_B + F_3 s_3}) - 0,2(F_{B1}(p)c_{B1}t_{B1}q_3 + \\
& F_{B1}(p)c_{B1}t_{B1}) - 0,2 (F_{B1}c_{B1}t_{B1}(p)q_3 + F_{B1}c_{B1}t_{B1}(p)) + F_{B1}(p)c_{B1}t_{B1}q_3 + \\
& + F_{B1}c_{B1}t_{B1}(p)q_3 = V_{B2}c_{B2}\rho_{B2}t_{B2}p(p) \quad (2.68)
\end{aligned}$$

Розглянемо канал керування  $F_B \rightarrow t_\Phi$ . Спростуємо рівняння (2.68):

$$V_{B2}c_{B2}\rho_{B2}t_{B2}p(p) + F_{B1}c_{B1}t_{B2}(p) + F_3s_3t_{B2}(p) = F_3s_3 \left( \frac{F_B(p)c_B t_{B1} - F_B(p)c_B t_{B2} + F_3 s_3 t_\Phi(p)}{V_B c_B \rho_B p + F_B c_B + F_3 s_3} \right) \quad (2.69)$$

Зведемо рівняння (2.69) до канонічної форми та введемо позначення:

$$\begin{aligned}
& \frac{V_B c_B \rho_B V_{B2} c_{B2} \rho_{B2}}{(F_B c_B + F_3 s_3)(F_{B1} c_{B1} + F_3 s_3) - F_3^2 s_3^2} \cdot p^2 t_{B2}(p) + \\
& + \frac{V_{B2} c_{B2} \rho_{B2} (-F_B c_B + F_3 s_3) + (-F_{B1} c_{B1} + F_3 s_3) V_B c_B \rho_B}{(F_B c_B + F_3 s_3)(F_{B1} c_{B1} + F_3 s_3) - F_3^2 s_3^2} \cdot p t_{B2}(p) + t_{B2}(p) = \\
& = \frac{F_3 s_3 (t_{B1} c_B - t_{B2} c_B)}{(F_B c_B + F_3 s_3)(F_{B1} c_{B1} + F_3 s_3) - F_3^2 s_3^2} \cdot F_B(p)
\end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned}
A_2 &= \frac{V_B c_B \rho_B V_{B2} c_{B2} \rho_{B2}}{(F_B c_B + F_3 s_3)(F_{B1} c_{B1} + F_3 s_3) - F_3^2 s_3^2} = 7.077; \\
A_1 &= \frac{V_{B2} c_{B2} \rho_{B2} (-F_B c_B + F_3 s_3) + (-F_{B1} c_{B1} + F_3 s_3) V_B c_B \rho_B}{(F_B c_B + F_3 s_3)(F_{B1} c_{B1} + F_3 s_3) - F_3^2 s_3^2} = 6.716;
\end{aligned}$$

$$k_1 = \frac{F_3 s_3 (t_{B1} c_B - t_{B2} c_B)}{(F_B c_B + F_3 s_3)(F_{B1} c_{B1} + F_3 s_3) - F_3^2 s_3^2} = -0.013.$$

Маємо рівняння:

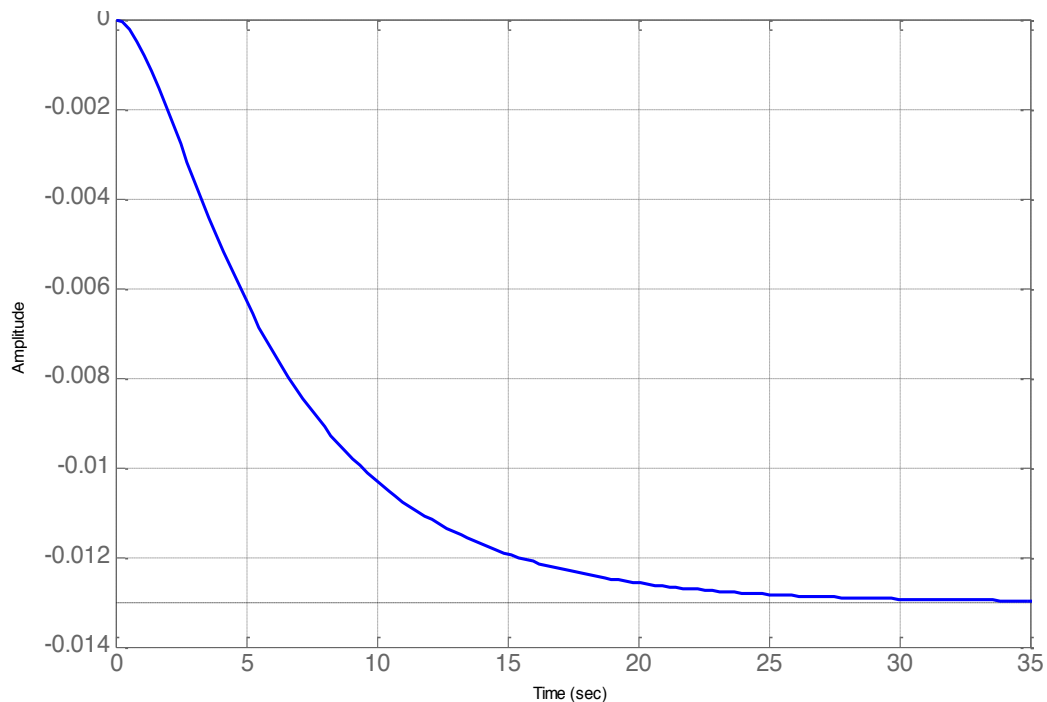
$$A_2 p^2 t_{B2}(p) + A_1 p t_{B2}(p) + t_{B2}(p) = k_1 F_B(p);$$

Передавальна функція каналу  $F_B \rightarrow t_{B2}$  має вигляд:

$$W_{F_B \rightarrow t_{B2}}(p) = \frac{t_{B2}(p)}{F_B(p)};$$

$$W_{F_B \rightarrow t_{B2}}(p) = \frac{k_1}{A_2 p^2 + A_1 p + 1} = \frac{-0.013}{7.077 p^2 + 6.716 p + 1}. \quad (2.70)$$

Перехідна характеристика по каналу  $F_B \rightarrow t_{B2}$  побудована в програмі MatLab зображена на рисунку 2.26:



**Рисунок 2.26** – перехідна характеристика по каналу  $F_B \rightarrow t_{B2}$

Для каналів  $F_{B1} \rightarrow t_{B2}$  та  $t_{B1} \rightarrow t_{B2}$  маємо наступне рівняння динаміки:

$$Q_{B1} - Q_{B2} + Q_B - Q_K - Q_{ZS} + Q_{ПР} = V_{B2} c_{B2} \rho_{B2} \frac{d t_{B2}}{d \tau} \quad (2.71)$$

Розпишемо усі складові рівняння (2.71):

$$F_{B1}c_{B1}t_{B1} - F_{B1}c_{B1}t_{B2} + F_{B1}t_{B1}c_{B1} - F_{B1}t_{B2}c_{B1} - 0,2(F_{B1}c_{B1}t_{B1}q_3 + F_{B1}c_{B1}t_{B1}) + \\ + F_{B1}c_{B1}t_{B1}q_3 = V_{B2}c_{B2}\rho_{B2} \frac{d t_{B2}}{d \tau} \quad (2.72)$$

Лінеаризуємо рівняння (2.72):

$$\Delta F_{B1}c_{B1}t_{B1} + F_{B1}c_{B1}\Delta t_{B1} - \Delta F_{B1}c_{B1}t_{B2} - F_{B1}c_{B1}\Delta t_{B2} + \Delta F_{B1}t_{B1}c_{B1} + F_{B1}\Delta t_{B1}c_{B1} - \\ - \Delta F_{B1}t_{B2}c_{B1} - F_{B1}\Delta t_{B2}c_{B1} - 0,2(\Delta F_{B1}c_{B1}t_{B1}q_3 + \Delta F_{B1}c_{B1}t_{B1}) - \\ - 0,2(F_{B1}c_{B1}\Delta t_{B1}q_3 + F_{B1}c_{B1}\Delta t_{B1}) + \Delta F_{B1}c_{B1}t_{B1}q_3 + F_{B1}c_{B1}\Delta t_{B1}q_3 = V_{B2}c_{B2}\rho_{B2} \frac{d t_{B2}}{d \tau}$$

Виконаємо перетворення Лапласа:

$$F_{B1}(p)c_{B1}t_{B1} + F_{B1}c_{B1}t_{B1}(p) - F_{B1}(p)c_{B1}t_{B2} - F_{B1}c_{B1}t_{B2}(p) + F_{B1}(p)t_{B1}c_{B1} + F_{B1}t_{B1}(p)c_{B1} - \\ - F_{B1}(p)t_{B2}c_{B1} - F_{B1}t_{B2}(p)c_{B1} - 0,2(F_{B1}(p)c_{B1}t_{B1}q_3 + F_{B1}(p)c_{B1}t_{B1}) - \\ - 0,2(F_{B1}c_{B1}t_{B1}(p)q_3 + F_{B1}c_{B1}t_{B1}(p)) + F_{B1}(p)c_{B1}t_{B1}q_3 + \\ + F_{B1}c_{B1}t_{B1}(p)q_3 = V_{B2}c_{B2}\rho_{B2}pt_{B2}(p) \quad (2.73)$$

Розглянемо канал  $F_{B1} \rightarrow t_{B2}$ . Спростимо рівняння (2.73). Отримаємо:

$$V_{B2}c_{B2}\rho_{B2}pt_{B2}(p) + F_{B1}c_{B1}t_{B2}(p) = F_{B1}(p)c_{B1}t_{B1} - 0,2(F_{B1}(p)c_{B1}t_{B1}q_3 + \\ + F_{B1}(p)c_{B1}t_{B1}) + F_{B1}(p)c_{B1}t_{B1}q_3 - F_{B1}(p)c_{B1}t_{B2}.$$

Виконаємо заміну:

$$A_1 = \frac{V_{B2}c_{B2}\rho_{B2}}{c_{B1}F_{B1}} = 6.944; \\ k_2 = \frac{0.8c_{B1}t_{B1} - c_{B1}t_{B2} + 0.8c_{B1}t_{B1}q}{c_{B1}F_{B1}} = 0.043.$$

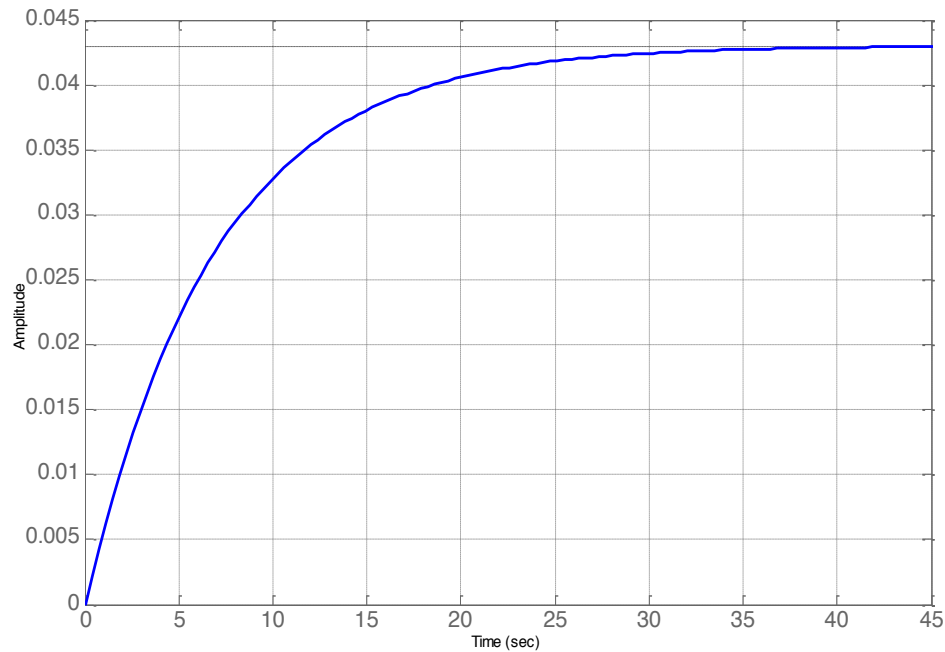
Маємо рівняння:

$$A_1pt_{B2}(p) + t_{B2}(p) = k_2F_{B1}(p);$$

Передавальна функція каналу  $F_{B1} \rightarrow t_{B2}$  має вигляд:

$$W_{F_{B1} \rightarrow t_{B2}}(p) = \frac{t_{B2}(p)}{F_{B1}(p)}; \\ W_{F_{B1} \rightarrow t_{B2}}(p) = \frac{k_2}{A_1p + 1} = \frac{0.043}{6.944p + 1}. \quad (2.74)$$

Перехідна характеристика по каналу  $F_{B1} \rightarrow t_{B2}$  побудована в програмі MatLab зображена на рисунку 2.27:



**Рисунок 2.27** – Перехідна характеристика по каналу  $F_{B1} \rightarrow t_{B2}$

Розглянемо канал  $t_{B1} \rightarrow t_{B2}$ . Спростимо рівняння (2.73). Отримаємо:

$$V_{B2}c_{B2}\rho_{B2}pt_{B2}(p) + F_{B1}c_{B1}t_{B2}(p) = F_{B1}c_{B1}t_{B1}(p) - 0,2(F_{B1}c_{B1}t_{B1}(p)q_3 + F_{B1}c_{B1}t_{B1}(p)) + F_{B1}c_{B1}t_{B1}(p)q_3.$$

Виконаємо заміну:

$$k_3 = \frac{0.8F_{B1}c_{B1} + 0.8F_{B1}c_{B1}q}{c_{B1}F_{B1}} = 0.98.$$

Маємо рівняння:

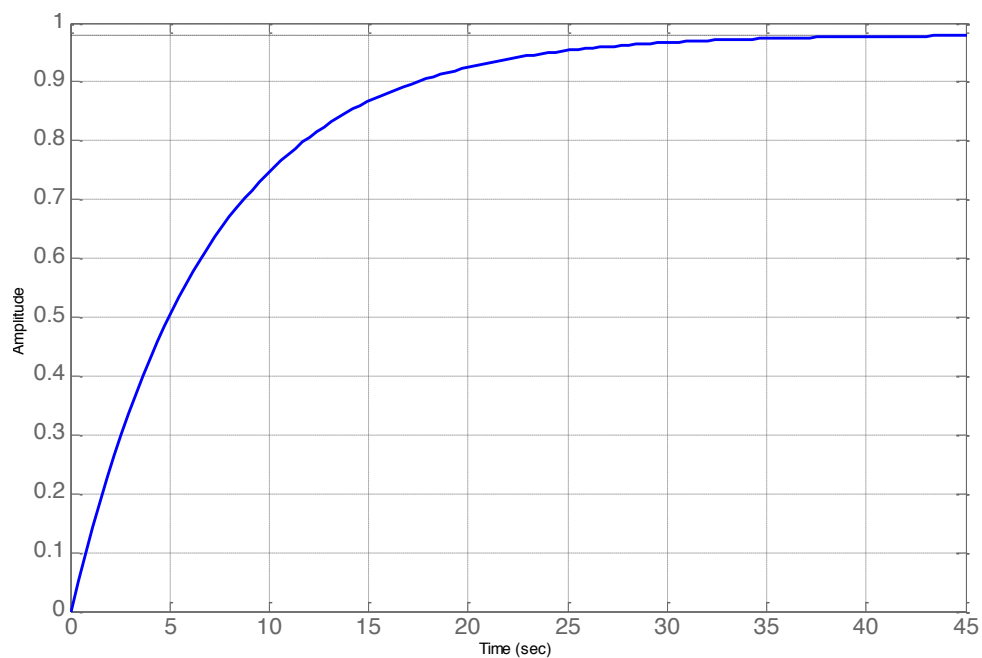
$$A_1pt_{B2}(p) + t_{B2}(p) = k_3t_{B1}(p);$$

Передавальна функція каналу  $t_{B1} \rightarrow t_{B2}$  має вигляд:

$$W_{t_{B1} \rightarrow t_{B2}}(p) = \frac{t_{B2}(p)}{t_{B1}(p)};$$

$$W_{t_{B1} \rightarrow t_{B2}}(p) = \frac{k_3}{A_1p + 1} = \frac{0.98}{6.944p + 1}. \quad (2.75)$$

Перехідна характеристика по каналу  $t_{B1} \rightarrow t_{B2}$  побудована в програмі MatLab зображена на рисунку 2.28:



**Рисунок 2.28** – Перехідна характеристика по каналу  $t_{B1} \rightarrow t_{B2}$

### 3. АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКІВ ДО НАЛАШТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ У КОНТУРАХ РЕГУЛЮВАННЯ

#### 3.1. Налаштування ПІ-регулятора для кип'ятильника

Проведемо налаштування ПІ-регулятора для керування витратою пари, що подається в кип'ятильник. Скористаємося середовищем *MatLab* та бібліотекою *sisotool*.

Задамо передатну функцію об'єкта керування  $W_{\text{кер}}(p)$  у *tf*-формі:

$$w_{\text{ker}} = \text{tf} ([3.024], [0.413 \ 1.153 \ 1])$$

Після того, як ми ввели передатну функцію і програмне середовище її синтезувало – викликаємо інтерактивне середовище налаштування регулятора «*SISOTool*».

Перед нами відкриється вікно редактора з архітектурою системи, із закладками, що відкривають різноманітні налаштування, архітектури, регулятора, графічні та інші.

Спершу обираємо архітектуру системи. Показано на рис. 3.1.

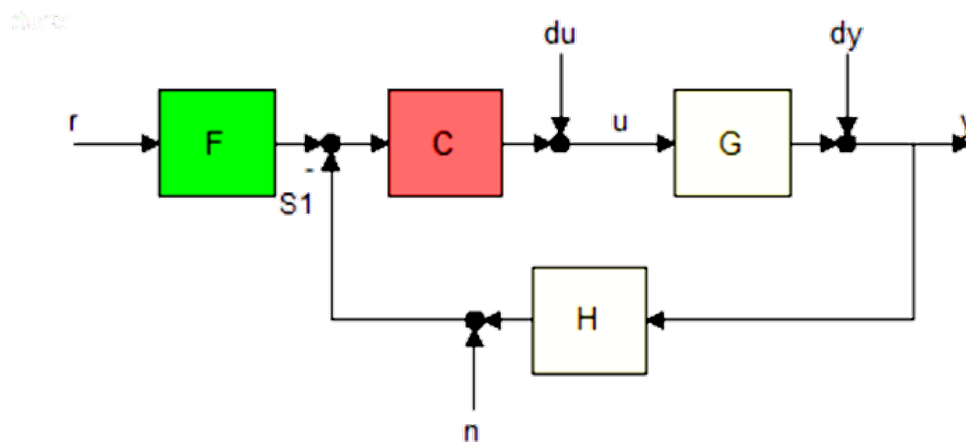


Рисунок 3.1 – Архітектура системи

Тут прийняті наступні позначення:

$G$  — *plant* (математична модель об'єкта);

$H$  — *sensordynamics* (давач, що вимірює вихідну величину);

$F$  — *prefilter* (фільтр);

$C$  — *compensator* (регулятор).

Налаштування було виконано за інтегральними квадратичними похибками.

Передатна функція ПІ-регулятора:



$$C = 0.43 \frac{(1 + 1.6s)}{s}$$

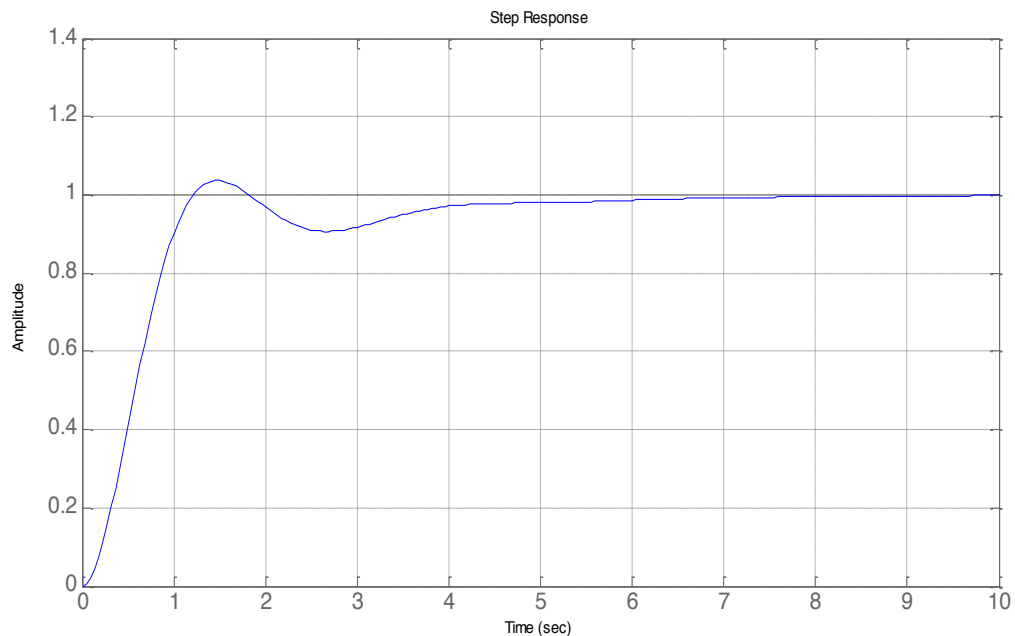
$$Kr = 0,43;$$

$$Ti = 1,6.$$

Передатна функція ПІ-регулятора:

$$W_{pez}(p) = \frac{Kr \cdot Ti \cdot s + Kr}{Ti} = \frac{0.688s + 0.43}{1.6}.$$

Результати настройки регулятора проілюстровано реакцією системи на ступінчатий сигнал (рис. 3.2).



**Рисунок 3.2** – Реакція налаштованої системи на ступінчатий сигнал

### 3.2. Налаштування ПІ-регулятора для дефлегматора

Проведемо налаштування ПІ-регулятора для керування витратою холодної води, що подається в дефлегматор. Скористаємося середовищем *MatLab* та бібліотекою *sisotool*.

Задамо передатну функцію об'єкта керування  $W_{кер}(p)$  у *tf*-формі:

$$w_{ker} = tf([-0.013], [7.077 \ 6.716 \ 1])$$

Після того, як ми ввели передатну функцію і програмне середовище її синтезувало – викликаємо інтерактивне середовище налаштування регулятора «*SISOTool*».

Перед нами відкриється вікно редактора з архітектурою системи, із закладками, що відкривають різноманітні налаштування, архітектури, регулятора, графічні та інші.

Спершу обираємо архітектуру системи. Показано на рис. 3.3.

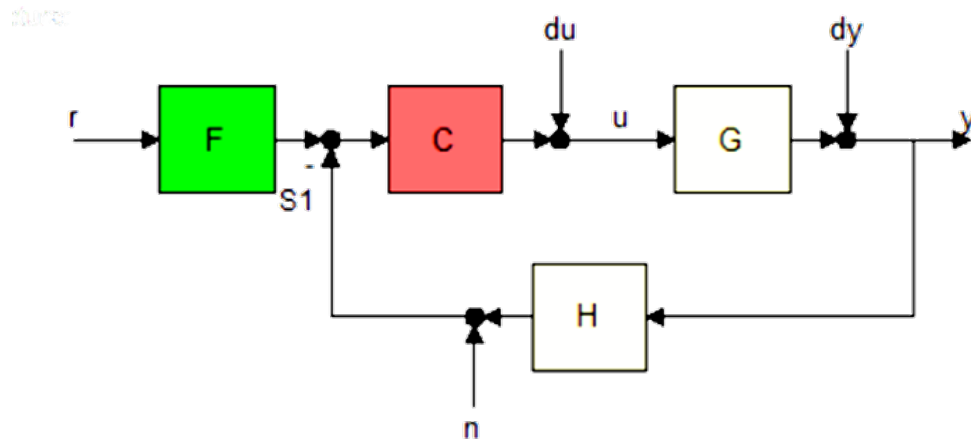


Рисунок 3.3 – Архітектура системи

Тут прийняті наступні позначення:

$G$  — *plant* (математична модель об'єкта);

$H$  — *sensordynamics* (давач, що вимірює вихідну величину);

$F$  — *prefilter* (фільтр);

$C$  — *compensator* (регулятор).

Налаштування було виконано за інтегральними квадратичними похибками.

Передатна функція ПІ-регулятора:

$$C = 0.54 \frac{(1 + 2s)}{s}$$

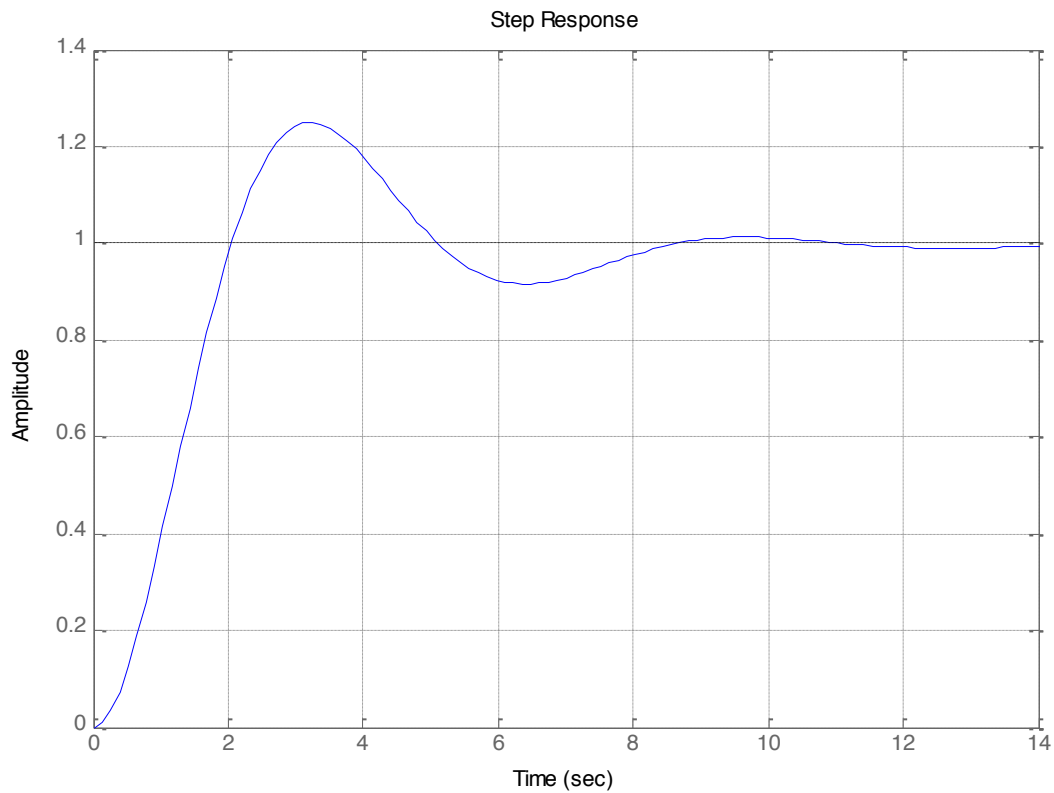
$Kr = 0,54$ ;

$Ti = 2$ .

Передатна функція ПІІ-регулятора:

$$W_{рег}(p) = \frac{Kr \cdot Ti \cdot s + Kr}{Ti} = \frac{1.08s + 0.54}{2}$$

Результати настройки регулятора проілюстровано реакцією системи на ступінчатий сигнал (рис. 3.4).



**Рисунок 3.4** – Реакція налаштованої системи на ступінчатий сигнал

## **4. СТВОРЕННЯ ПРИКЛАДНОГО НАВЧАЛЬНОГО ПАКЕТУ ДЛЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КОНТУРУ РЕГУЛЮВАННЯ**

### **4.1. Постановка задачі для створення навчальної програми**

Сучасні технічні засоби автоматизації і управління численні і різноманітні. До їх складу входять електричні, електромеханічні, пневматичні, гідравлічні і вентильні перетворювачі енергії, пристрої управління, передачі та обробки інформації та реєструючі прилади. Дослідження процесів функціонування ТЗАУ і їх елементів, розробка алгоритмів керування базуються на методах і технологіях математичного моделювання та обчислювального експерименту.

Моделювання - метод наукового дослідження реальних об'єктів шляхом побудови і дослідження моделі, тобто відтворення характеристик реального об'єкта на інший об'єкт (модель), спеціально створений для їх вивчення.

Основні етапи процесу моделювання: постановка проблеми, побудова (вибір) моделі, її дослідження та накладення отриманих результатів на оригінал.

Моделювання як процес містить у собі три елементи:

1. суб'єкт (дослідник),
2. об'єкт дослідження,
3. модель, що визначає (відображає) відносини пізнає суб'єкта і пізнаваного об'єкта.

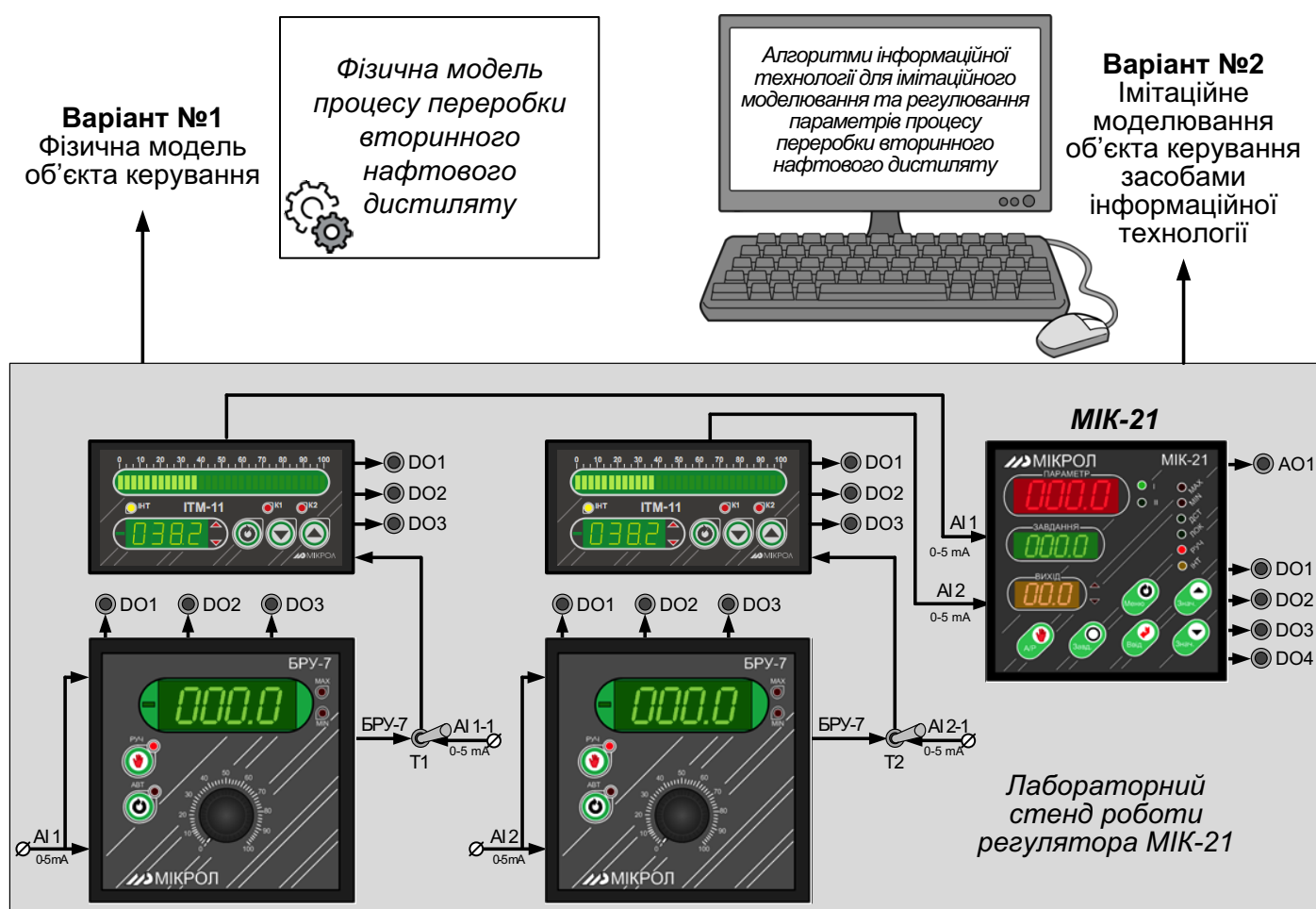
Процес моделювання технологічного процесу включає багато етапів та процедур. Умовно можна розділити моделювання на два блоки, які будуть істотно відрізнятися – це фізичне моделювання та комп'ютерно-інформаційна технологія.

Фізичне моделювання — метод експериментального вивчення фізичних явищ, який базується на їх фізичній подібності. Метод полягає у створенні лабораторної фізичної моделі явища у зменшеному масштабі і проведення експериментів на цій моделі. Висновки і результати, одержані на моделі розповсюджуються на явище у реальних масштабах.

Метод може дати надійні результати тільки у випадку наявності фізичної подібності реального явища і моделі. Подібність досягається за рахунок рівності для

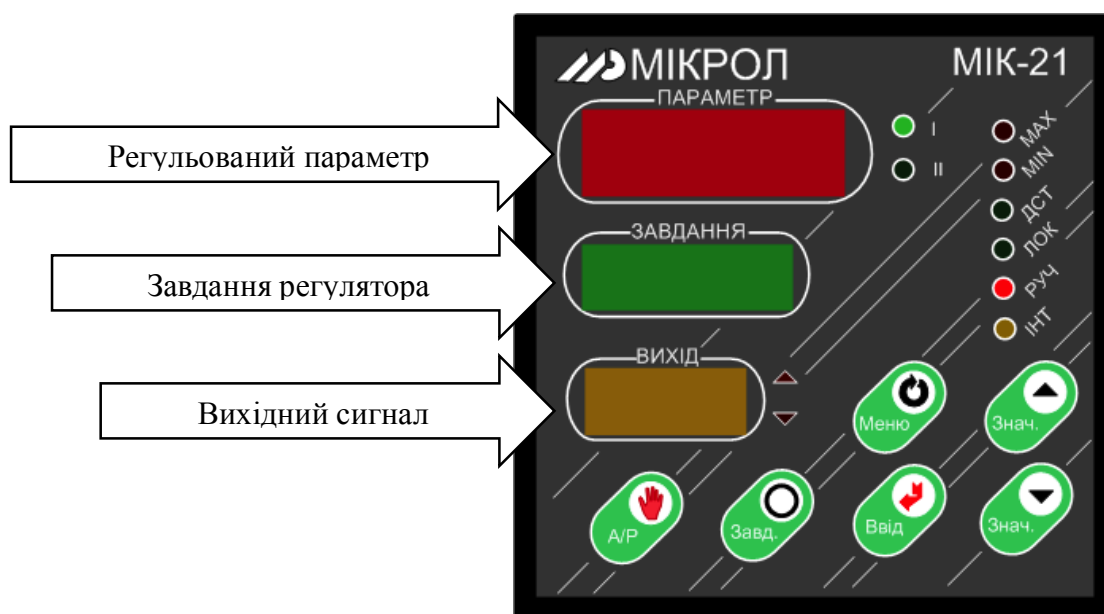
моделі і реального явища значень критеріїв подібності — безрозмірних чисел, що залежать від фізичних (у тому числі геометричних) параметрів, що характеризують явище. Експериментальні дані одержані на моделі розповсюджуються на реальний об'єкт з урахуванням критеріїв подібності (на практиці — з врахуванням певних коефіцієнтів)<sup>[14]</sup>.

Виходячи з того, що даний метод неможливо використовувати в лабораторних умовах, актуальним є створення алгоритму для імітаційного моделювання процесу з використанням комп'ютерно-інформаційної технології (рис. 4.1). Це дозволяє економити матеріальні ресурси та уникати можливих шкідливих наслідків проведення випробувань. За допомогою комп'ютера можна моделювати явища або процеси, які не відбувалися в реальності, дуже швидкоплинні або довготривалі процеси.



**Рисунок 4.1** – Актуальність створення алгоритму для імітаційного моделювання процесів об'єкта керування з використанням комп'ютерно-інформаційної технології

В якості об'єкта з імітаційного моделювання використано процес переробки вторинного нафтового дистилляту (див. п. 1), в якості регулятора обрано МІК-21, тому що панель даного регулятора має три поля: дисплей для зображення значень контрольованого технологічного параметру; дисплей для спостереження за змінами значень сигналу на виході з автоматичного регулятора; дисплей для показу значення встановленого завдання для автоматичного регулятора, які може фахівець чи дослідник відповідним чином змінювати завдання для контуру регулювання при імітаційному моделюванні роботи регулятора (рис. 4.2).



**Рисунок 4.2** – Зображення панелі автоматичного регулятора

Використання комп'ютерного-інформаційного моделювання має певні переваги, зокрема:

- моделювання з використанням комп'ютерних засобів є менш вартісним порівняно з експериментальними дослідженнями на лабораторному обладнанні;
- моделювання імітаційних процесів дає змогу наочно наблизитися до реальних умов;
- існує можливість багатократного повторення експерименту за допомогою комп'ютерних засобів.

Поточне науково-технічне забезпечення дає можливість використовувати програмні продукти з метою покращення та вдосконалення процесу викладання. Застосування програмних тренажерів з метою дослідження різних дій або способів сприяє зазвичай кращому сприйнятті і розумінню матеріалу, а крім того набагато кращому запам'ятовуванню. Програма була виконана на мові програмування C#. Середовищем програмування тренажера було обрано *Microsoft Visual Studio*. Розроблена програма демонструє в динаміці роботу ключових апаратів і керуючого оснащення в ході роботи процесу вторинного нафтового дистиляту.

Основною метою формування імітаційного програмного забезпечення було створення демонстраційної навчальної C# програми, що б цілком задовольняла потреби користувача в плані інтерактивного і динамічного відображення суті проблем з роботи пристроїв і приладів при управлінні процесом.

## **4.2. Програмний модуль імітації статичних режимів роботи технологічних апаратів з переробки нафтового дистиляту**

### **4.2.1. Структура меню команд програми, та знайомство з інтерфейсом**

Для запуску програмного пакету для імітаційного моделювання контуру регулювання температури необхідно запустити виконавчий файл з назвою «*RectificationProcess.exe*». Після запуску програми з'являється головне вікно програми, на якому розміщено зображення технологічного процесу, який вивчається, а також навігаційне меню для здійснення швидкого переходу між режимами роботи програми. Меню складається з таких пунктів:

- 1) «Процес»;
- 2) «Статичні характеристики»;
- 3) «Динамічні характеристики»;
- 4) «Імітація»;
- 5) «Регулювання».

Кожен із цих пунктів буде описано більш детально далі.

#### 4.2.2. Пункт меню «Процес» у прикладному навчальному пакеті

В якості об'єкта регулювання для прикладної програми з імітаційного моделювання роботи контуру автоматичного регулювання було обрано технологічну схему процесу ректифікації вторинних нафтових дистилятів з нафтопереробного виробництва (рис. 4.3).

Дана схема має три технологічних апарати: колонну ректифікації, кип'ятильник на трубопроводі рециркуляції потоку кубового залишку та дефлегматор для парів бінарної суміші компонент на виході з колони ректифікації. Апарати кип'ятильник та дефлегматор по конструкції є трубчастими теплообмінниками і мають по одному контуру регулювання на виході температури флегми та температури потоку рециркуляції кубового залишку. З цих причин програмний пакет для імітаційного моделювання роботи контуру регулювання параметру технологічного апарату був створений для автоматичного регулятора, що дозволяє спостерігати і досліджувати роботу контуру регулювання температури у кип'ятильника і у дефлегматора.

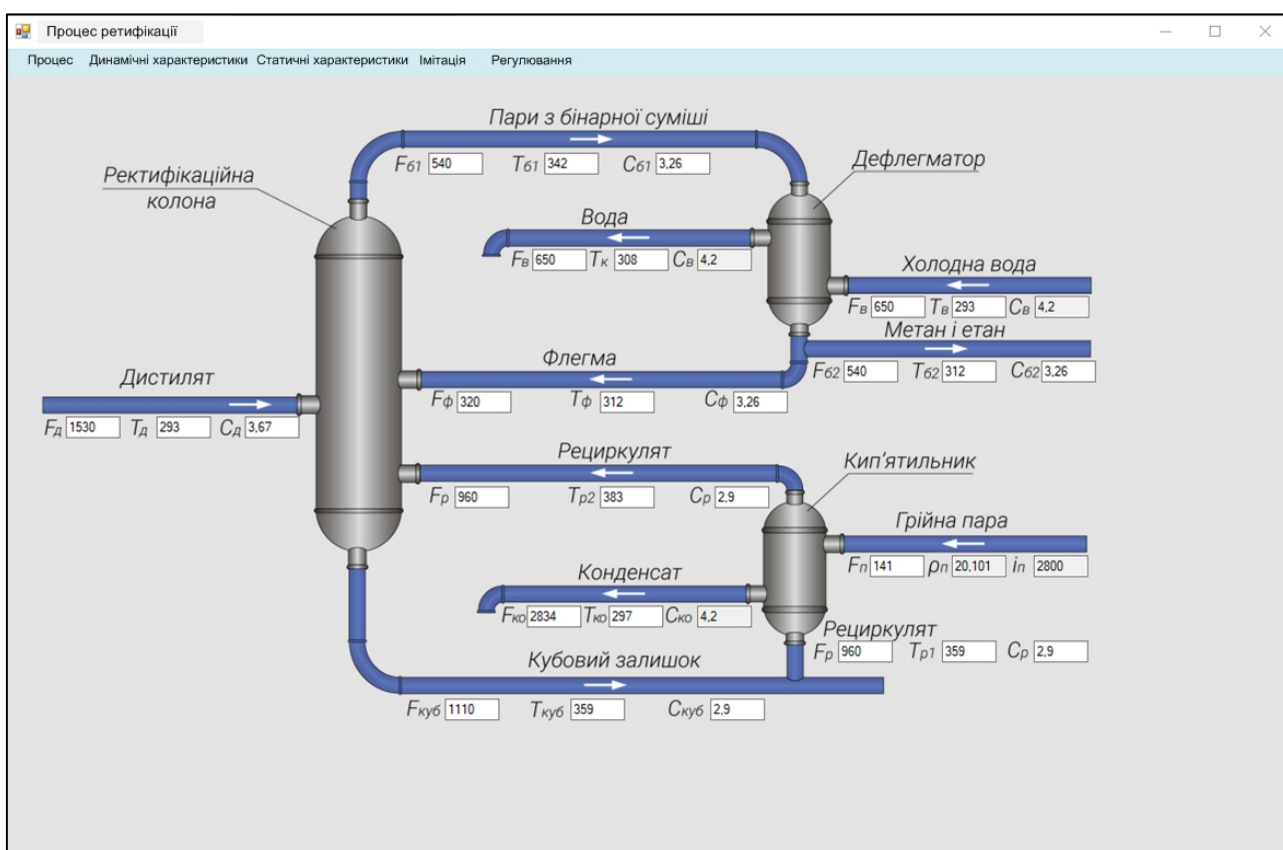
На нафтопереробних виробництвах в результаті первинної перегонки сирієї нафти отримують відгін у вигляді дистилятів і залишків. Дистиляти з низькими парафіновими вуглеводнями піддаються подальшій переробці з поділом на компоненти методом ректифікації в декількох однакових з'єднаних послідовно дистиляційних установках<sup>[15]</sup>. Актуальною проблемою є визначення для режимів роботи апаратів значень технологічних параметрів при змінах їх у часі. Використовуються методи комп'ютерно-інформаційних технологій, які передбачають імітацію режимів роботи апаратів, наприклад, при мінімальному навантаженні, максимальному навантаженні та робочому режимі. Актуальною проблемою є визначення для режимів роботи апаратів значень технологічних параметрів при змінах їх у часі<sup>[7]</sup>. На рисунку 4.3 зображено основне вікно C# програми, де виконуються основні дії користувача з підготовки і налаштування форми до роботи. Після відкриття вікна програми в поля *Edit*



завантажуються певні значення технологічних параметрів до яких розраховуються відповідні статичні характеристики згідно режиму, завданого користувачем.

Для зручності роботи користувача з програмою в неї додано систему інтерактивних підказок, яка працює таким чином, що при наведенні курсору мишки на зображення певного апарату змінюється загальний вигляд апарату на схему з зображенням внутрішньої конструкції. Такий режим роботи C# програми допомагає користувачу відчувати переваги комп'ютерно-інформаційних технологій з імітації роботи технологічного апарату.

На рис. 4.3 показані значення параметрів у технологічних апаратах процесу переробки вторинного нафтового дистилляту у робочому режимі.



**Рисунок 4.3** – Технологічна схема процесу ректифікації вторинних нафтових дистиллятів

### 4.2.3. Пункт меню «Статичні характеристики» та «Динамічні характеристики» у прикладному навчальному пакеті

Відповідно до пункту роботи 2.1 та 2.2 було розроблено алгоритм для побудови статичних і динамічних характеристик. Відповідно до роботи програмного модуля розроблений алгоритм у Додатку Д1.

В основному меню програми обирається пункт «Процес» і далі необхідно обрати команду «Статичні характеристики», де відповідно на екрані дисплея будуть показані зображення графіків. На рисунку 4.4 та 4.5 зображено вікно C# програми, де користувач може спостерігати графічне зображення розрахованих статичних характеристик для каналів взаємодії параметрів об'єкта керування кожного з апаратів: дефлегматора, кип'ятильника та ректифікаційної колони. Поряд з графіками виводиться таблиця зміни параметрів, а також коефіцієнт підсилення  $k$ .

При обранні пункту «Статичні характеристики» у меню команд прикладної програми (рис. 4.4, рис. 4.5) з імітаційного моделювання дослідник може спостерігати графіки статичних характеристик до технологічних апаратів.

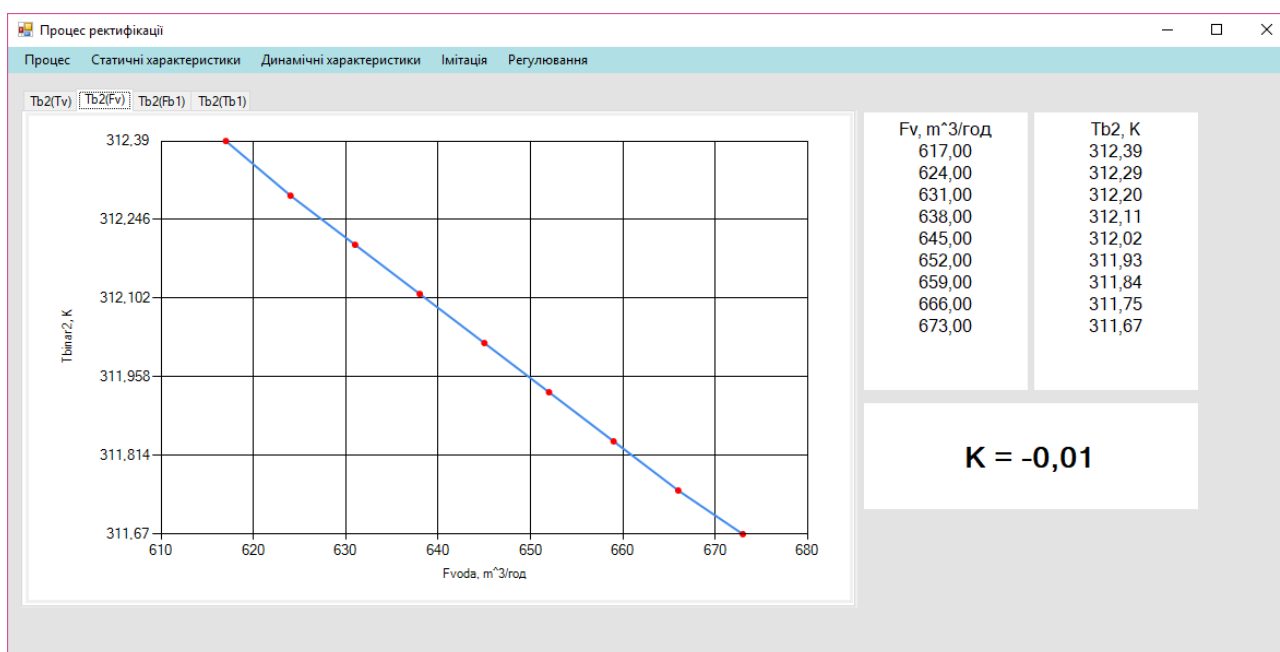
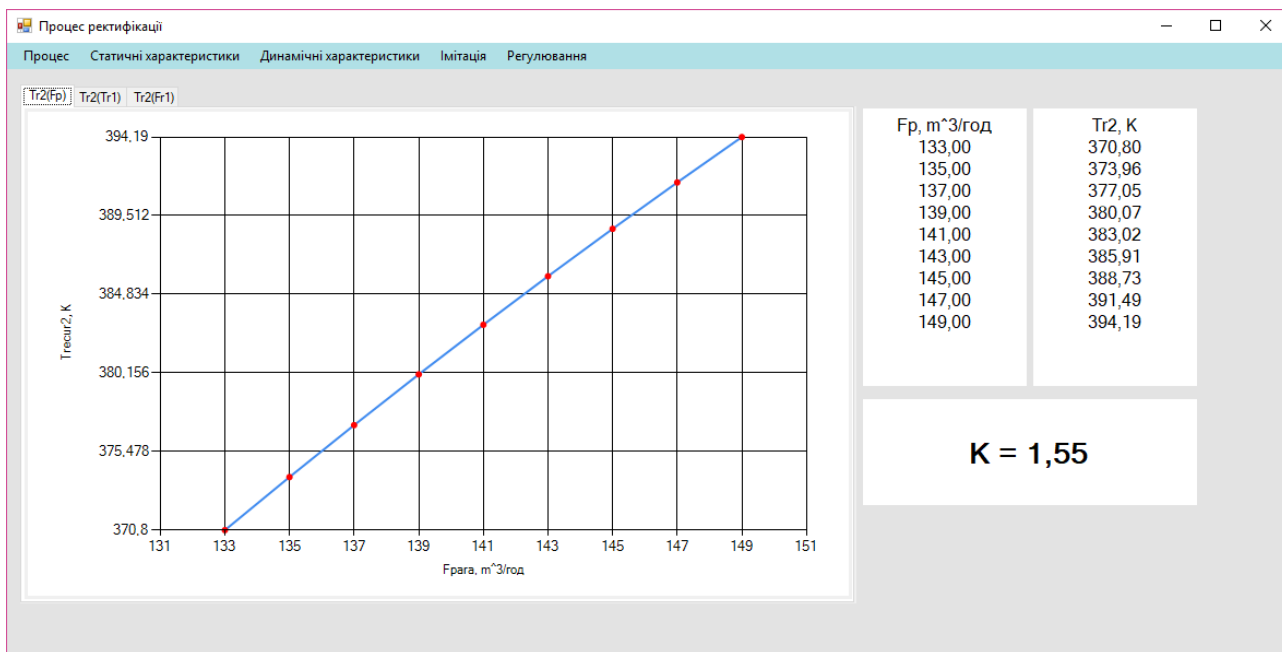
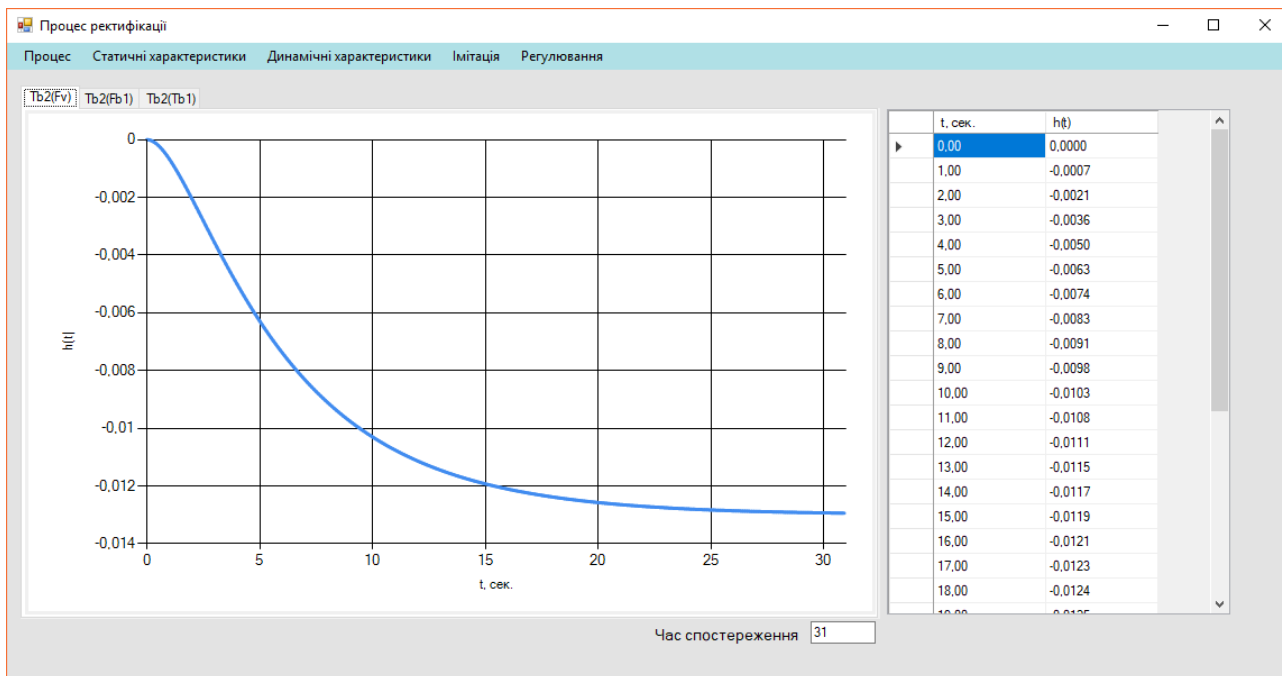


Рисунок 4.4 – Статична характеристика для дефлегматора по каналу  $F_B \rightarrow t_{B2}$



**Рисунок 4.5** – Статична характеристика для кип'ятильника по каналу  $F_p \rightarrow t_{r2}$

При обранні пункту «Динамічні характеристики» у меню команд прикладної імітаційної програми дослідник може спостерігати властивості перехідних характеристик технологічних апаратів (рис. 4.6 та рис. 4.7).



**Рисунок 4.6** – Перехідна характеристика для дефлегматора по каналу  $F_B \rightarrow t_{B2}$

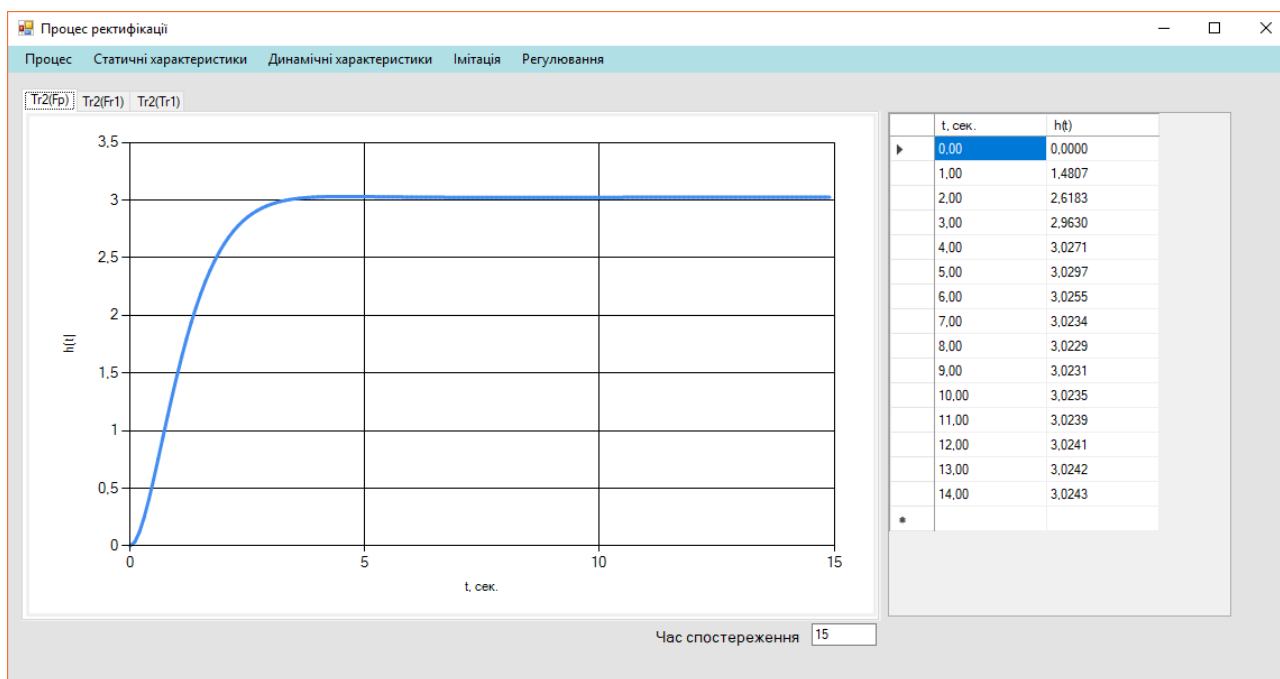


Рисунок 4.7 – Перехідна характеристика для кип’ятильника по каналу  $F_p \rightarrow t_{r2}$

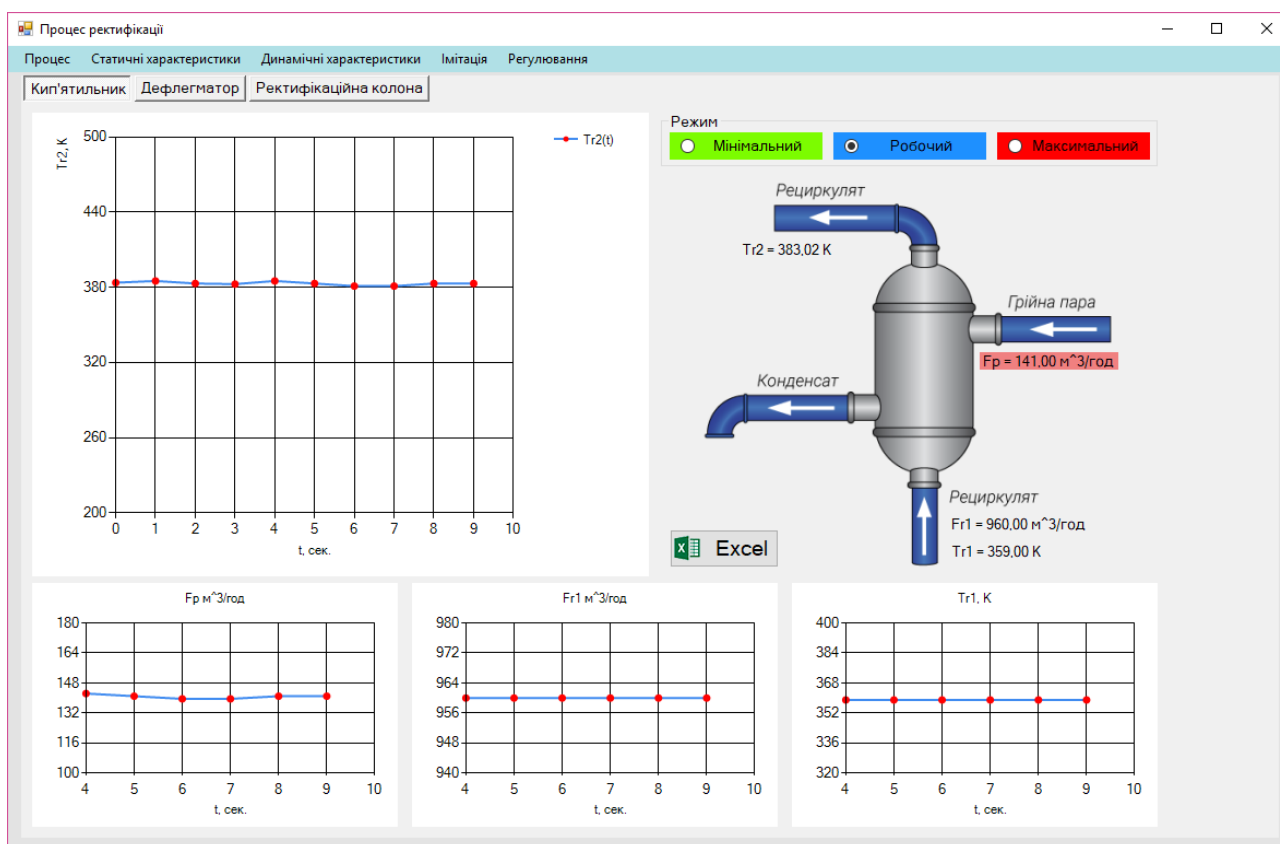
#### 4.2.4. Пункт меню «Імітація» у прикладному навчальному пакеті

Одним з етапів створення моделі передбачена її перевірка на відповідність поставленим вимогам. Згідно такої постановки задачі розроблялись і досліджувались алгоритми з імітації послідовності значень параметрів у вигляді графіків до відповідного статичного режиму процесу в апаратах. Тому були розроблені алгоритми для імітації значень параметрів та відповідне програмне забезпечення, яке реалізує побудову статичних характеристик у часі і дозволяє проводити дослідження на основі даних результатів.

Відображення інформації за допомогою графіків дозволяє краще зрозуміти як протікає процес при впливі збурень або керувального впливу, та як це вплине на подальшу роботу технологічного апарату. Відповідно до роботи програмного модуля розроблений алгоритм у Додатку Д2.

При обранні пункту «Імітація» у меню команд прикладної програми з імітаційного моделювання дослідник запускає у роботу алгоритм з імітаційного моделювання значень технологічних параметрів для спостереження графіків у часі статичного режиму роботи технологічних апаратів: «Кип’ятильник», «Дефлегматор» та «Ректифікаційна

колона» з урахуванням обраного режиму навантаження: «РОБОЧІЙ», «МІНІМАЛЬНИЙ» та «МАКСИМАЛЬНИЙ» (рис. 4.8).



**Рисунок 4.8** – Вікно програми для імітації процесів у кип'ятильнику

Імітація значень параметрів для процесу виконується для фіксованого інтервалу часу, а іноді потрібно виконувати аналіз даних за значно більший у декілька разів інтервал часу та ще у вигляді графіків та різних таблиць<sup>[8]</sup>. З цих причин було розроблено і досліджено програмний модуль для експорту у файли *Excel* даних з імітації значень параметрів до процесу кип'ятильника ректифікаційної колони з переробки нафтового дистилляту<sup>[10]</sup>.

На рис. 4.9 показано зображення вікна програми зі значеннями параметрів у вигляді графіків при спостереженні за змінами певних значень імітованих параметрів ( $F_p$ ,  $F_{r1}$ ,  $T_{r1}$ ) та імітація значень  $T_{r2}$  прикладною програмою для процесу нагрівання кубового залишку у кип'ятильнику. На рис. 4.9 зображення з таблиці даних в *Excel*. З таблиці чітко видно числові дані, як змінювались параметри та точний час, в який відбувалась зміна. Такий спосіб дозволяє провести повний аналіз імітаційної моделі та

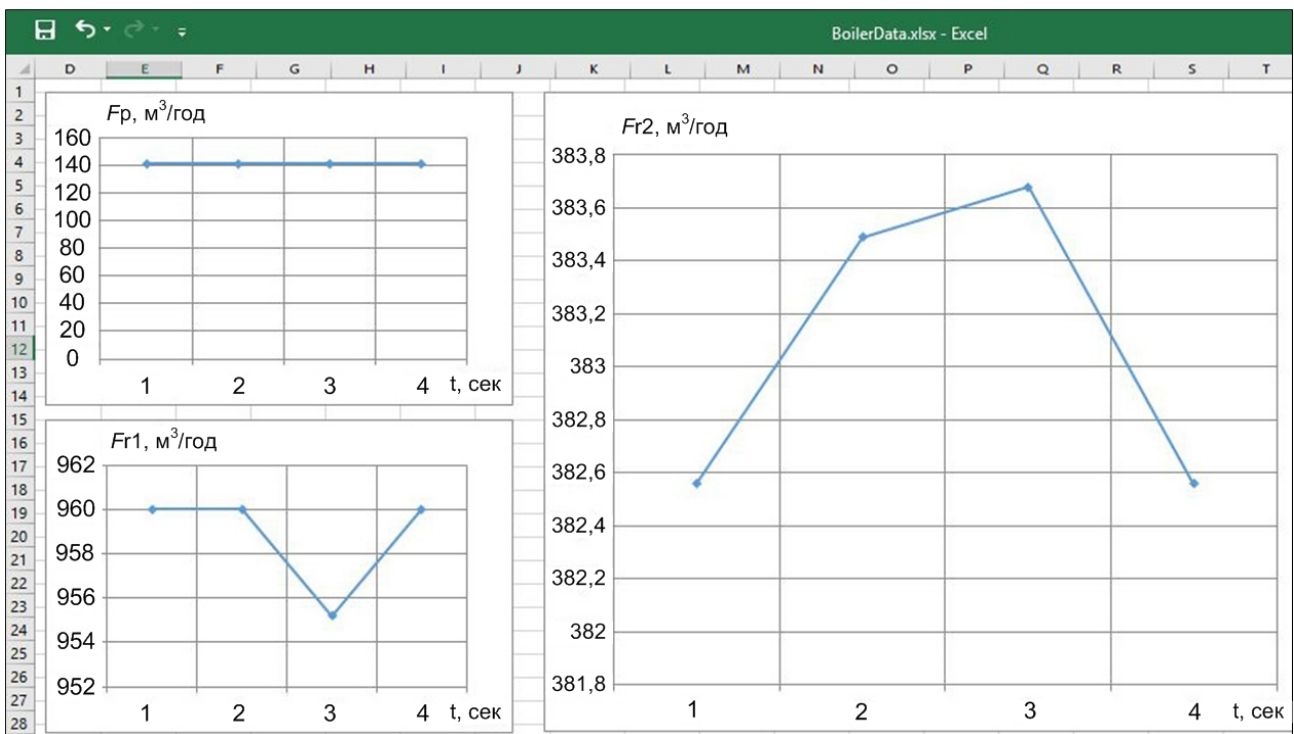
зробити висновок про вплив тих чи інших параметрів на величину  $Tr_2$  при максимальному, мінімальному та робочому режимі кип'ятильника.

	A	B	C	D	E
1	Час	$Fr_{para}$ , м <sup>3</sup> /год	$Fr_1$ , м <sup>3</sup> /год	$Tr_1$ , К	$Tr_2$ , К
2	15:37:14	141	960	355,41	382,56
3	15:37:15	141	960	362,59	383,49
4	15:37:16	141	955,2	359	383,68
5	15:37:17	141	960	355,41	382,56
6	15:37:18	141	955,2	359	383,68

**Рисунок 4.9** – Частина таблиці *Excel* з даними про зміну значень параметрів кип'ятильника

Для аналізу спостереження режиму кип'ятильника формуються в *Excel* графіки по зміні значень до кожного технологічного параметру (рис. 4.10).

За даними, представленими у вигляді графіка, можна побачити як змінюються значення параметрів, чи не перевищують вони допустимі мінімальні та максимальні значення, а також як залежать за рахунок впливів один від одного.



**Рисунок 4.10** – Графіки зміни значень імітаційних параметрів при спостереженні в програмі *Excel*

### **4.3. Програмний модуль імітації динамічного режиму роботи технологічних апаратів з перероби нафтового дистилляту**

#### **4.3.1. Постановка задачі до динамічного режиму роботи контуру регулювання параметра технологічного апарату**

Впровадження комп'ютерно-інформаційних технологій для вивчення систем керування процесами у технологічних апаратах є актуальним питанням сьогодення. Використання прикладного програмного забезпечення для імітаційного моделювання контуру регулювання параметру технологічного апарату сприяє кращому розумінню особливостей змінювання сигналу від автоматичного регулятора та вплив його значень на змінювання регулюючих впливів: витрата пари на вході у кип'ятильник та витрата холодної води на вході у дефлегматор. Алгоритм програмного пакету для імітаційного моделювання роботи контуру регулювання автоматичного регулятора дозволяє змодельовати і візуально спостерігати процес регулювання температури на виході технологічного апарату та зробити і зафіксувати оцінки якості отриманих результатів. Програмним пакетом для імітаційного моделювання всі результати досліджень показуються на графіках, які дозволяють досліднику візуально оцінити і зрозуміти якість роботи автоматичного регулятора.

Прикладний програмний пакет для імітаційного моделювання орієнтований на забезпечення навчання з роботи контуру регулювання і передбачає, щоб навчальний процес був цікавішим та насиченим, а також одночасно, дозволив оволодіти практичними навичками використання імітаційних моделей для підвищення ефективності знань по управлінню технологічними процесами у розв'язанні задач з проектування систем автоматичного регулювання параметрів у технологічних процесів.

Метою створення програмного алгоритму для імітаційного моделювання роботи контуру регулювання є отримання необхідних знань та вмінь по дослідженні процесів регулювання, властивості яких не можуть бути визначені інакше, ніж за допомогою імітаційного моделювання. Використання даного прикладного програмного пакету для імітаційного моделювання контуру регулювання температури у технологічного апарату дозволяє наочно оцінити можливості роботи контуру регулювання при відповідних

значеннях налаштування для автоматичного регулятора параметрів  $K_{reg}$  та  $T_i$ . Значення оцінок якості динаміки регулювання параметру на виході технологічного апарату визначаються через інтегральний показник, а також за допомогою розрахунків значень перерегулювання параметру технологічного апарату.

#### 4.3.2. Структура алгоритму програмного пакету для імітаційного моделювання

Відповідно до роботи програмного модуля розроблений алгоритм у Додатку ДЗ. При обранні пункту «Регулювання» у меню команд прикладної програми з імітаційного моделювання дослідник може досліджувати роботу контуру регулювання автоматичного регулятора температури на виході кип'ятильника (рис. 4.11) або роботу контуру регулювання автоматичного регулятора температури на виході дефлегматора (рис. 4.12). Розрахунок роботи для контуру регулювання температури кип'ятильника та дефлегматора описаний в пункті 3.1 та 3.2 відповідно.

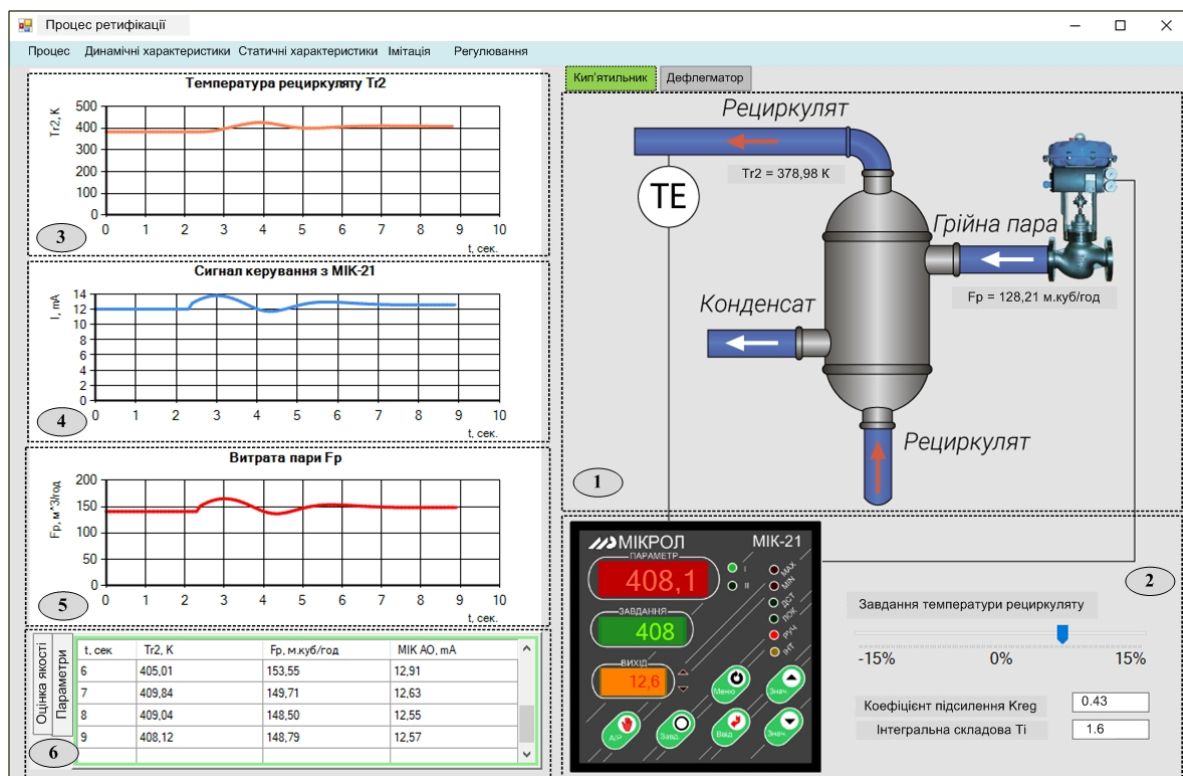
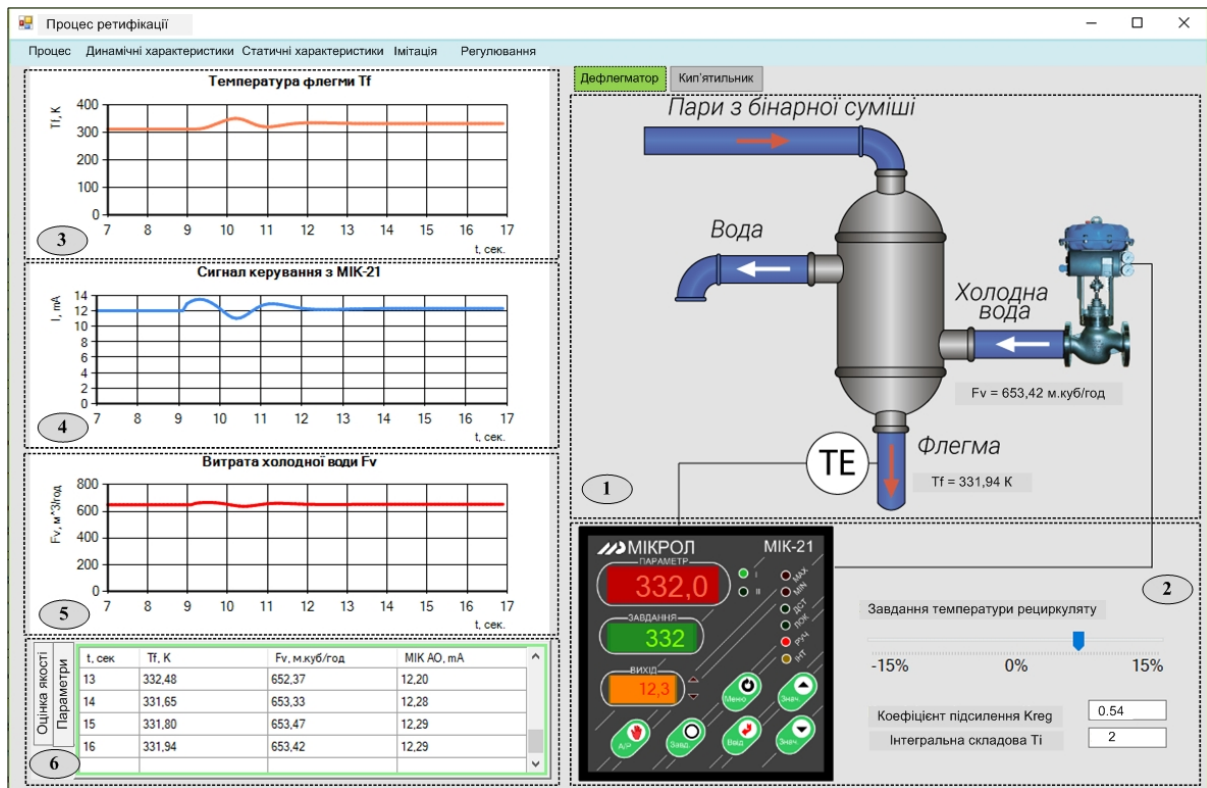


Рисунок 4.11 – Вікно програмного пакету до імітаційного моделювання роботи контуру регулювання температури на виході кип'ятильника



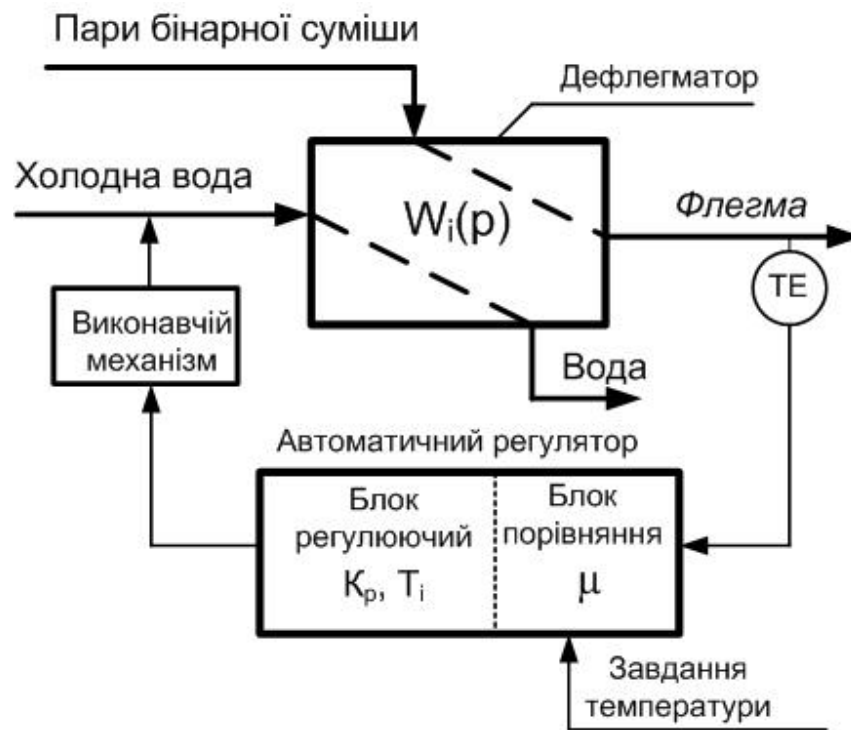


**Рисунок 4.12** – Вікно програмного пакету до імітаційного моделювання роботи контуру регулювання температури на виході дефлегматора

При дослідженні роботи контуру регулювання температури на виході кип'ятильника або при дослідженні роботи контуру регулювання температури на виході дефлегматора у полях № 2 дослідник при налаштованих коефіцієнтах  $K_{reg}$  та  $T_i$  у ПІ-регулятора може мишкою встановлювати різні значення завдання для регулятора температури на виході технологічного апарату.

Кожен контур автоматичного регулювання можна розглядати як деяку систему, що складається безпосередньо із самого об'єкта регулювання і автоматичного регулятора, який через виконавчий пристрій може впливати на регульований параметр технологічного апарату. Як відомо, якість роботи контуру регулювання визначається автоматичним регулятором на основі постійного вимірювання датчиком значень регульованого параметру, що характеризує стан об'єкта регулювання. Інформаційний зв'язок між датчиком, що вимірює регульований параметр, і входом автоматичного регулятора є зворотним зв'язком і таким чином утворюється замкнутий контур для схеми регулювання. Взагалі то поняття "зворотний зв'язок" (*feedback*) є фундаментальною

категорією в теорії автоматичного управління. Саме завдяки наявності зворотного зв'язку з об'єктом стає можливим реалізувати дійсно якісне регулювання технологічного параметру. контуру регулювання температури в теплообміннику. В схему імітаційного моделювання типового контур регулювання входять: об'єкт (технологічний апарат), автоматичний регулятор і виконавчий механізм (рис. 4.13 та рис. 4.14). Однак, набір цих елементів - ще не є системою. Для системи потрібні канали зв'язку, через які йде обмін інформацією між елементами. Відповідно до даної типової структури контуру регулювання температури був розроблений прикладний програмний пакет для імітаційного моделювання.

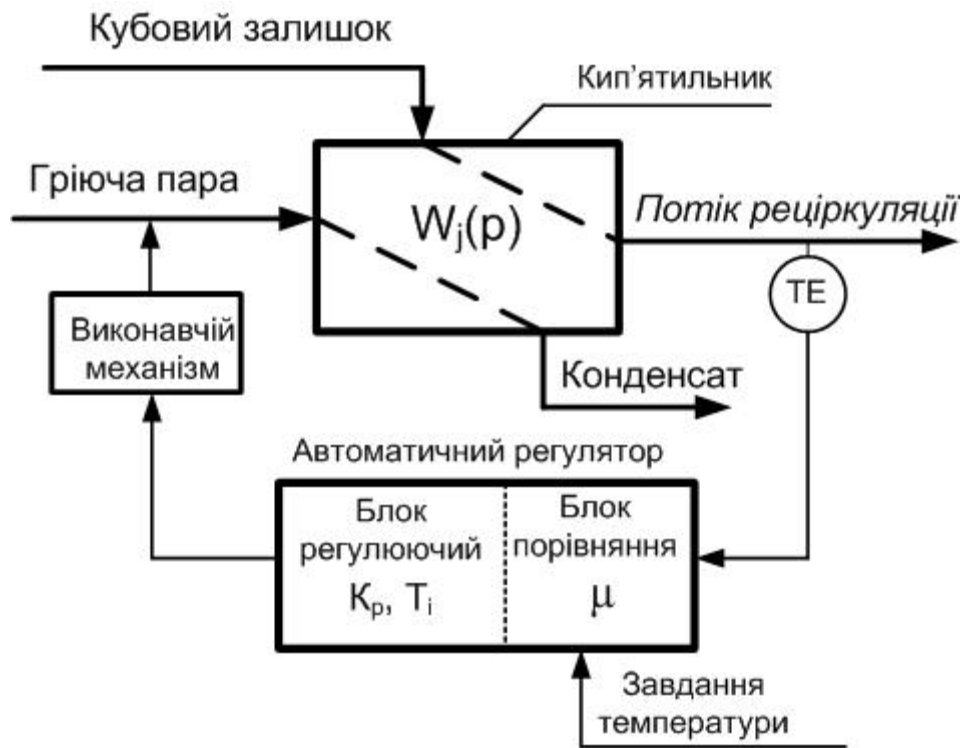


**Рисунок 4.13** – Схема до імітаційного моделювання роботи контуру регулювання температури на виході дефлегматора

Інформація в контурах регулювання температур (рис. 4.13 та рис. 4.14) «ходить по колу»: регулятор видає сигнал управління на виконавчий механізм, який впливає безпосередньо на об'єкт; потім інформація про об'єкт через датчики повертається назад до регулятора і цикл повторюється. В контурі регулювання є зворотний зв'язок, тобто

регулятор використовує інформацію про стан об'єкта для формування сигналу до процесу регулювання.

Об'єктами регулювання у технологічній схемі фактично є трубчасті теплообмінники. Показником ефективності регулювання технологічного параметру є значення співпадіння температури продукту на виході із теплообмінника зі значенням завдання автоматичному регулятору. Виходячи з цього температура продукту на виході технологічного апарату є регульовальною координатою.



**Рисунок 4.14** – Схема до імітаційного моделювання роботи контуру регулювання температури на виході кип'ятильника

Регулятор діє на об'єкт керування не прямо, а через виконавчий механізм з клапаном, який може перетворювати сигнал управління в переміщення клапана, що регулює витрату теплоносія чи потоку холодної води на вході апарату.

У зв'язку з цим в прикладному пакеті з імітаційного моделювання було розглянуто контур регулювання за відхиленням температури на виході апарату шляхом зміни витрати регулюючого впливу (грійна пара для кип'ятильника та потік холодної води для дефлегматора).

У задачі стабілізації значення технологічного параметра на виході технологічного апарату найбільш важливі властивості статичного та динамічного режиму роботи контуру регулювання. Для контуру регулювання температури в першу чергу потрібно забезпечити високу якість перехідних процесів при зміні сигналу завдання у автоматичного регулятора.

В цілому було виділено наступні основні вимоги до імітації роботи контуру регулювання температури на виході теплообмінника:

1. **Точність** - в сталому режимі роботи контур регулювання повинен підтримувати задане значення регулятора, причому значення відхилення (різниця між заданим і фактичним вимірюваним значенням) не повинна перевищувати допустиму похибку;

2. **Стійкість** – контур регулювання повинен залишатися стійким на всіх режимах навантаження технологічного апарату по вхідному потоку;

3. **Якість** перехідних процесів регулювання з точки зору технологічних особливостей процесу у апарату повинна бути допустимою при зміні значення завдання регулятора, тобто переходити в потрібний стан по можливості швидко і плавно без великих значень перерегулювання.

Основне вікно з виконання алгоритму програмного пакету з імітаційного моделювання роботи контуру регулювання температури на виході кип'ятильника зображено на рис. 4.11 і відповідно для контуру регулювання температури на виході дефлегматора зображено на рис. 4.12. В цих вікнах прикладної програми для зручності спостереження за результатами імітаційного моделювання подані у вигляді графіків та таблиці з оцінкою роботи контуру регулювання відповідно до вихідних значень сигналу з автоматичного регулятора (панель МІК-21).

Відповідно до поставленої задачі для програмного пакету схематично представлена така робота алгоритму з імітаційного моделювання. Якщо температура на виході об'єкту (кип'ятильник) дорівнює завданню регулятора, тобто сигнал  $X_1$  з датчика (ТЕ) дорівнює сигналу  $X_0$  (завдання) для «блока порівнянь» і відповідно сигнал відхилення на вході «блок регулювальний» буде визначено таким чином,  $\mu = X_1 - X_0 = 0$ ,

тобто сигнал на виході регулятора не треба змінювати, виконавчий механізм працює і клапан відкритий на величину, яка забезпечує задану температуру. Наприклад, якщо температура на виході об'єкту стане більшою ніж завдання, то одночасно збільшиться сигнал  $X_1$  з датчика (ТЕ), а значення відхилення  $\mu$  на вході у блок регулюючий буде не нульовим. Вихідний сигнал автоматичного регулятора відповідно до вхідного значення  $\mu$  повинен змінюватися згідно налаштованого закону блоку регулювання, щоб у виконавчого механізму відсоток відкриття клапану на трубопроводі утворив зменшення подачі тепла, а температура на виході об'єкта почала би зменшуватися. Даний процес взаємодії регулятора з об'єктом у програмному пакеті імітаційного моделювання роботи контуру регулювання описується такими рівняннями: математичною моделлю трубчатого теплообмінника; рівнянням для ПІ-закону блоку регулювання та математичною моделлю з впливу вихідного сигналу регулятора на зміну значень витрати пари у кип'ятильник.

#### 4.3.3. Математичні моделі і їх використання для імітаційного моделювання

При імітаційному моделюванні роботи контура регулювання передбачено спостереження перехідних процесів, тому в якості математичної моделі об'єкта потрібна передавальна функція теплообмінника. Наприклад, для кип'ятильника була визначена така передавальна функція:

$$W_o(p) = \frac{t_{r2}(p)}{F_p(p)}.$$

Числові значення коефіцієнтів  $k_1$ ,  $A_2$  та  $A_1$  для програмного пакету з імітаційного моделювання були визначені аналітичним методом побудови моделі об'єкта керування другого порядку (п. 2.2.2):

$$W_o(p) = \frac{k_1}{A_2 p^2 + A_1 p + 1} = \frac{3.024}{0.413 p^2 + 1.153 p + 1}.$$

Як відомо, ПІ-закон регулювання для регулятора описується таким рівнянням

$$y(t) = k_p \mu(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \mu(t) dt,$$

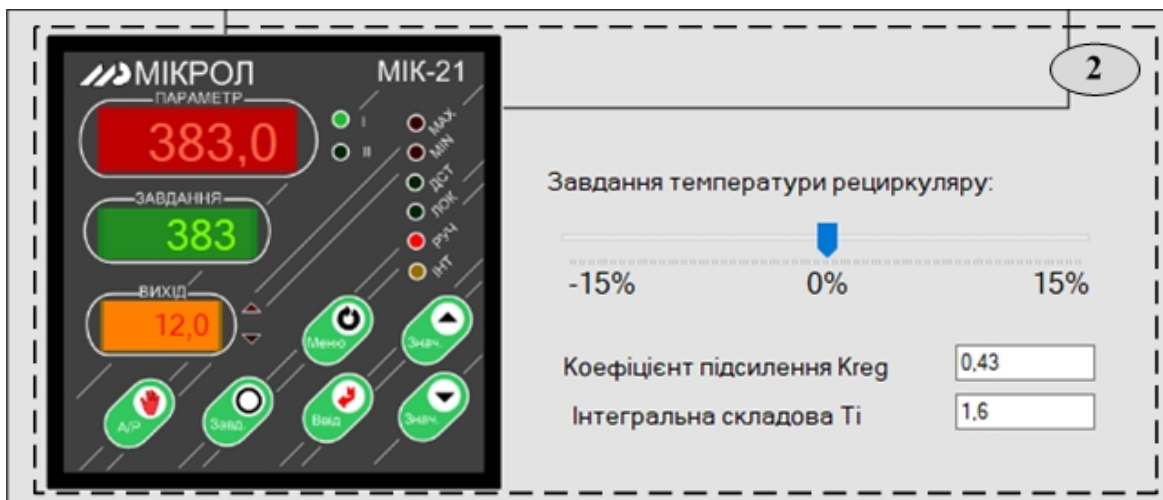
де  $T_i$  – час інтегрування регулятора;  $k_p$  – коефіцієнт пропорційності.

Коефіцієнт пропорційності  $k_p$  і постійна часу  $T_i$  є параметрами налаштування ПІ-регулятора. Передавальну функцію ПІ-регулятора з початковими налаштуваннями було записано у такому вигляді:  $W_{рег}(p)=y(p)/\mu(p)$  та з урахуванням по замовчання початкового налаштування коефіцієнтів для ПІ-закону регулятора використано наступну передавальну функцію (п. 3.1):

$$W_{рег}(p) = \frac{k_p \cdot T_i \cdot s + k_p}{T_i} = \frac{0.688s + 0.43}{1.6}.$$

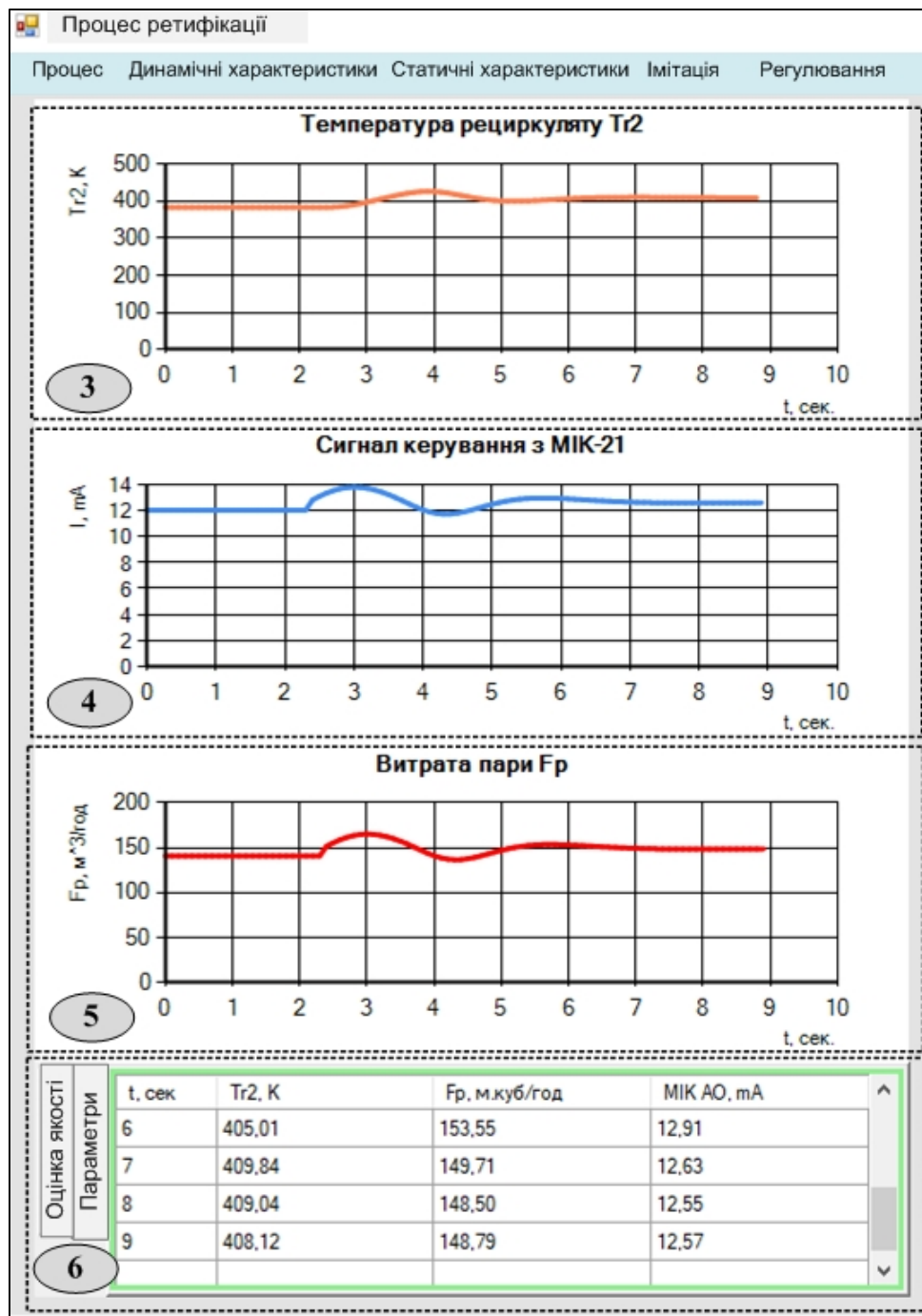
$$k_p = 0,43; \quad T_i = 1,6.$$

Для імітації роботи контуру регулювання температури на виході теплообмінника був розроблений типовий алгоритм регулювання де дослідник змінює завдання автоматичному регулятору, а вихідний сигнал регулятора змінюється по ПІ-закону відповідно до змінювання значення  $\mu(t)$ , яке залежить від змінювання значень до вихідного параметру - температура потоку на виході теплообмінника. На полі № 2 у вікні прикладної програми (рис. 4.11 та рис. 4.12) зміна значень для завдання ПІ-регулятора варіюється від оптимального значення (робочого) в межах від -15% до +15%. Такий діапазон було обрано для того, щоб оцінити роботу регулятора при різних навантаженнях на колону ректифікації по дистилляту. Також у полі № 2 на рис. 4.11 з технологічним апаратом – кип'ятильник зображені на дисплеях МІК-21 значення температура рециркуляту  $T_{r2}$  та значення вихідного сигналу з регулювального блоку автоматичного регулятора згідно до якого змінюються у часі значення регулювального впливу  $F_{II}$  (витрати пари). Відповідно до рис. 4.12 з технологічним апаратом – дефлегматор на полі № 2 зображені на дисплеях МІК-21 значення температура флегми  $T_f$  та значення вихідного сигналу з регулювального блоку автоматичного регулятора згідно до якого змінюються у часі значення регулювального впливу  $F_v$  (витрати холодної води).



**Рисунок 4.15** – Елементи поля № 2 у прикладній програмі з імітаційного моделювання

На панелі регулятора МІК-21 (рис. 4.15) на зображенні дисплея «ЗАВДАННЯ» прикладна імітаційна програма показує значення завдання, і зображення дисплея «ПАРАМЕТР», де змінюються значення технологічного параметру, згідно змінюваних значень у зображенні на дисплею «ВИХІД» (вихідного сигналу регулятора від 4 до 20 мА).

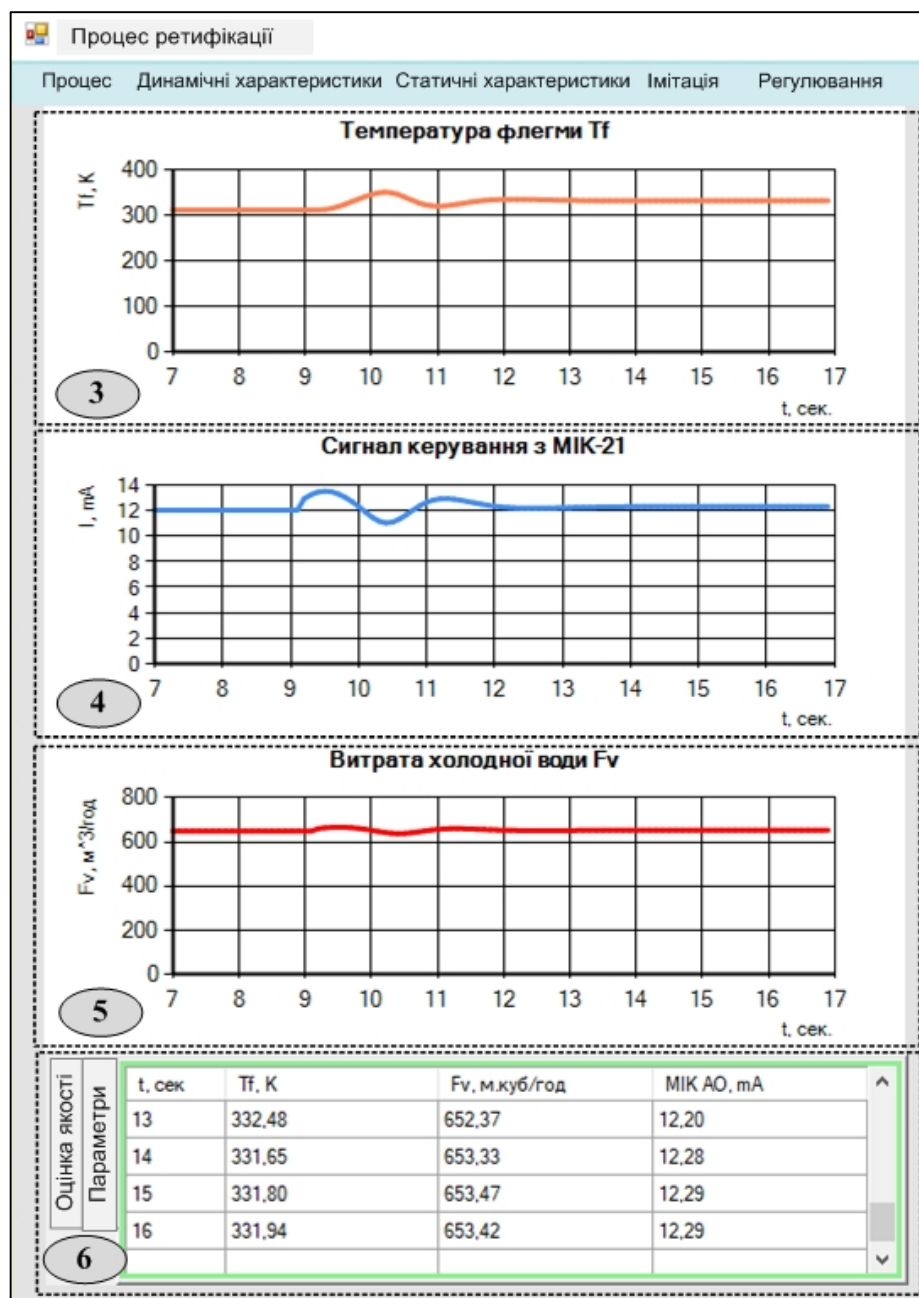


**Рисунок 4.16** – Графіки змінювання значень у віні прикладної імітаційної програми до моделювання роботи контуру регулювання температури рециркуляту на виході кип'ятильника

Для візуального спостереження за змінами значень у часі на дисплею «ПАРАМЕТР» панелі регулятора МІК-21 у вікні прикладної імітаційної програми з моделювання роботи контуру регулювання будується відповідний графік зміни значень температури на полі № 3 (рис. 4.16 та рис. 4.17) з відображенням точних чисельних



значень у таблиці на полі №6, якщо дослідник натиснув мишкою у таблиці кнопку «ПАРАМЕТРИ».

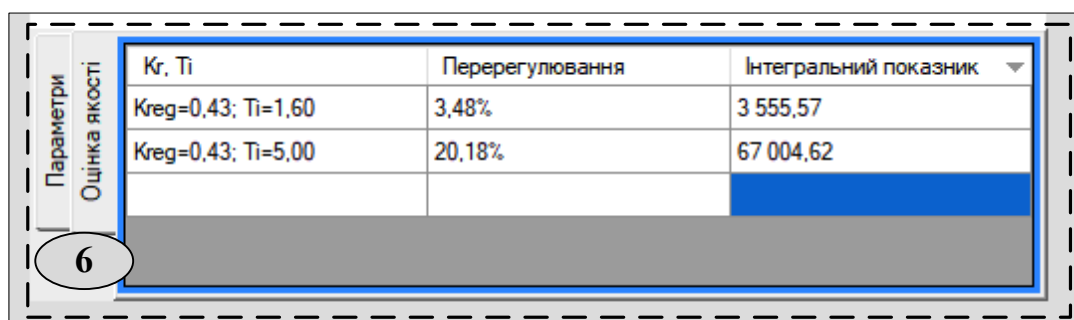


**Рисунок 4.17** – Графіки змінювання значень у віні прикладної імітаційної програми до моделювання роботи контуру регулювання температури флегми на виході дефлегматора

Також для візуального спостереження за змінами значень у часі на дисплею «ВИХІД» панелі регулятора МІК-21 у вікні прикладної імітаційної програми з моделювання роботи контуру регулювання буде створено відповідний графік зміни значень вихідного сигналу з регулятора на полі № 4 з відображенням точних чисельних значень

у таблиці на полі № 6, якщо дослідник натиснув мишкою у таблиці кнопку «ПАРАМЕТРИ».

Контури автоматичного регулювання повинні бути не тільки стійкими, але і забезпечувати якість процесу регулювання. Основні найбільш суттєві вимоги до якості регулювання, які дозволяють оцінити роботу майже всіх систем управління, називають показниками процесу регулювання. Вони характеризують поведінку регулятора в перехідному процесі. Після встановлення відповідних коефіцієнтів до налаштування автоматичного регулятора з'являється необхідність оцінити якість роботи контуру регулювання. Для цього був розроблений відповідний алгоритм, який дає змогу наочно проаналізувати роботу контуру регулювання з налаштованими коефіцієнтами ПІ-регулятора та відповідним завданням регулятора. Для цього використовуються такі показники: перерегулювання та інтегральний показник якості. У вікні прикладної імітаційної програми такі дані виводяться у таблицю на полі № 6 (рис. 4.18), якщо дослідник натиснув мишкою кнопку «Оцінка якості». В цьому випадку таблиця даних у полі № 6 змінюється на три колонки. Перша колонка таблиці показує значення коефіцієнтів налаштування автоматичного регулятора, друга – відсоток перерегулювання, остання колонка показує розрахований інтегральний показник якості при відповідних налаштуваннях коефіцієнтів ПІ-регулятора (рис. 4.18).



К <sub>p</sub> , Т <sub>i</sub>	Перерегулювання	Інтегральний показник
K <sub>рег</sub> =0,43; Т <sub>i</sub> =1,60	3,48%	3 555,57
K <sub>рег</sub> =0,43; Т <sub>i</sub> =5,00	20,18%	67 004,62

**Рисунок 4.18** – Блок оцінки якості отриманої системи

Перерегулювання розраховується прикладною імітаційною програмою, як максимальне відхилення значень керованого параметру технологічного апарату від нового заданого значення в бік, протилежний від початкового значення. У тих випадках, коли керована величина наближається до нового значення тільки з одного боку

перерегулювання відсутнє<sup>[18]</sup>. Перерегулювання  $\sigma$  показує, на скільки відсотків максимальне значення виходу  $Y_{max}$  перевищує усталене значення  $Y_{\infty}$ <sup>[16]</sup>:

$$\sigma = \frac{Y_{max} - Y_{\infty}}{Y_{\infty}} \cdot 100\%.$$

На перший погляд може здатися, що перерегулювання не припустиме, тому що воно збільшує час регулювання. Перерегулювання з'являється внаслідок того, що система до нового сталого стану підходить з визначеною швидкістю.

Чим більша ця швидкість, тим далі за нове стале положення пройде контур регулювання за інерцією. Тобто, для зменшення перерегулювання необхідно зменшити швидкість, з якою регулятор підходить до нового сталого стану. Це, вкінці кінців, приведе до збільшення часу регулювання. Якщо контур регулювання підходить до сталого стану з нульовою швидкістю, то перерегулювання взагалі не буде, але час регулювання значно збільшиться<sup>[17]</sup>.

Так як час регулювання характеризує швидкодію контуру регулювання, то намагаються, там де це необхідно, звести його до мінімуму. Це значить, що контур регулювання повинен відпрацьовувати процес регулювання з більшою швидкістю, що в результаті приводить до значень більшого перерегулювання. Крім того, оскільки перехідний процес коливальний, то будуть мати місце великі прискорення регульованої величини, що може викликати неприпустимо великі динамічні навантаження на елементи контуру регулювання. Таким чином, як відсутність, так і досить велике перерегулювання небажані. Тому в якості оптимального припускають перерегулювання в межах 20-30%<sup>[17]</sup>.

У прикладній імітаційній програмі з моделювання роботи контуру регулювання використовується квадратичний інтегральний критерій якості, який характеризує сумарну площу, обмежену кривою перехідного процесу. Площа буде тим менше, чим швидше згасає перехідний процес і чим менше величина відхилення. Тому параметри налаштування для контуру регулювання рекомендується вибирати таким чином, щоб домогтися мінімуму цієї інтегральної оцінки. Інтегральні критерії якості дають загальну

оцінку у часі регулювання і ступеня відхилення керованої величини від сталого значення в перехідному процесі в сукупності, без знаходження того чи іншого окремо. Для розрахунку інтегрального критерію застосовується формула:

$$I = \sum (y_{zav} - y_p)^2.$$

Для усунення статичної похибки вводиться інтегральна складова. Вона дозволяє регулятору «вчитися» на попередньому досвіді. Якщо система не відчуває зовнішніх збурень, то через деякий час регульована величина стабілізується на заданому значенні. При стабілізації пропорційна складова буде дорівнювати нулю, а вихідний сигнал буде повністю забезпечуватися інтегральною складовою. При постійному значенні неузгодженості інтегральна складова є лінійною величиною, яка збільшується з часом<sup>[19]</sup>.

Підтримка показників на заданому рівні має велике значення для будь-якого технологічного процесу.

#### 4.4. Програмна реалізація навчального пакету

Прикладна програма включає в собі набір методів для проведення обчислень та візуалізації отриманих результатів. Першим завданням було отримати метод для обчислення статичних характеристик для технологічного процесу. Для обчислення значень було реалізовано метод *getStaticCharacteristic*, який в якості аргументів приймає функцію залежності вихідного параметру від вхідного та середнє значення вхідного параметру, так як для обчислення статичної характеристики необхідно взяти діапазон значень в точках +5% від середнього та -5%. Результатом виконання методу є масив значень статичної характеристики та обчислений коефіцієнт підсилення *K*. Розрахований масив значень передається в якості аргументу до методу *drawStaticChart*, який будує графік на компоненті *Chart* способом перебору всіх точок вхідного масиву. Також метод розраховує максимальне і мінімальне значення осі ординат для коректного відображення графіку.

Для відображення динаміки роботи технологічних апаратів було реалізовано алгоритм розрахунку перехідної характеристики з передавальної функції. Методи для розрахунків реалізовані в класі *Laplace*. Метод *Transform* слугує для прямого перетворення Лапласа. *InverseTransform* реалізовує обернене перетворення, яке необхідне для отримання графічної залежності зміни параметру в часі. Вхідними аргументами методу є передавальна функція об'єкту керування  $W$  та момент часу  $t$ . Цей метод використовується для отримання поточного значення  $h(t)$  в методі *drawStepResponse*, який в свою чергу призначений для побудови графіку перехідного процесу та виведення масиву значень перехідної характеристики в компонент *dataGridView*. Метод *drawStepResponse* запрограмований таким чином, щоб автоматично визначати час перехідного процесу для об'єкту керування. Тобто, як тільки значення перехідної характеристики досягає усталеного рівня і перестає суттєво змінюватися, метод зупиняє обчислення на поточній точці і виводить отримані значення на графік та в таблицю. При цьому для осі ординат відбувається автоматичне налаштування мінімального та максимального значення для найбільш повного та детального відображення перехідного процесу. Якщо ж отриманий графік не задовольняє і необхідна більш повна картина до конкретного моменту часу, користувач може змінити кінцевий час спостереження у спеціальному полі *textbox* розміщеному під віссю абсцис. Після введення кінцевого моменту часу спостереження і натиснення клавіші *Enter* відбувається повторний виклик методу *drawStepResponse*, який наново проводить обрахунок значень перехідного процесу до вказаного моменту часу і виводить результати на графік та в таблицю.

Імітація роботи технологічних апаратів дозволяє наочно оцінити вплив зміни вхідних параметрів на значення вихідного параметру апарату при різних режимах навантаження (мінімальному, робочому, максимальному). В режимі імітації всі вхідні параметри змінюються випадковим чином з відхиленням від базового значення в діапазоні від 0 до 5 відсотків. На основі вхідних значень та статичних характеристик процесу відбувається обчислення вихідного контрольованого параметру. Поточні

значення вхідних та вихідних параметрів динамічно виводяться у вигляді графіків на компоненти *Chart*. Для реалізації можливості зміни режиму навантаження було використано компоненти *radioButton*. При зміні режиму навантаження змінюється значення керуючого параметру. Для мінімального режиму зменшується на 15%, для робочого використовується базове, а для максимального збільшується на 15%. Результати імітації можна отримати в вигляді документу *Excel*, в якому містяться дані про час фіксації параметрів та їх значення у вигляді таблиці та графіків. Це дозволяє оцінити як змінювалися параметри на протязі певного часу.

Режим регулювання в програмі дозволяє відтворити роботу замкненої системи керування з об'єктом керування та ПІ регулятором. Реалізовано даний алгоритм для двох апаратів: кип'ятильника та дефлегматора. Умовно можна розділити режим регулювання на чотири блоки. Перший включає технологічну схему об'єкта керування, другий – роботу регулятора, третій – результати роботи у графічному вигляді, четвертий – оцінку якості отриманої системи. Використовуючи компоненту *trackBar* можна змінювати завдання по вихідному параметру в межах від -15% до +15%. За замовчування коефіцієнти ПІ регулятора вказані в полях *TextBox*. При цьому є можливість задати власні значення коефіцієнта підсилення та інтегральної складової для дослідження поведінки системи. В якості регулятора було обрано МІК-21. На дисплей якого виводяться три значення: завдання, вихідний сигнал з регулятора та поточне значення вихідного параметру. Для того, щоб наочно оцінити і побачити як спрацьовує регулятор реалізовано вивід результатів на графіки. В динамічному режимі є можливість проаналізувати отримати систему з відповідними настройками. Для повного аналізу був розроблений алгоритм для розрахунку оцінки якості системи. В якості показників обрано квадратичний інтегральний показник та відсоток перерегулювання.

#### **4.5. Ресурсоспоживання програмного забезпечення**

Дослідження навчального пакету для імітаційного моделювання технологічного процесу перероби вторинного нафтового дистилляту виконувалося у операційній системі *Windows 10*. При роботі програми використовувалося від 50 Мб до 70 Мб оперативної

пам'яті. Навантаження на процесор становить від 0% до 5% в залежності від дій які відбуваються в програмі (тестування програми відбувалося на процесорі *Intel® Core(TM) i3-2370M CPU* з тактовою частотою 2,4 ГГц.). Необхідний об'єм постійної пам'яті для використання програми складає 1,5 Мб, більшу частину цього об'єму займають зображення у форматі “.bmp” для візуалізації технологічного обладнання та мікропроцесорних приладів.

Вимоги до ПК для використання програми:

**Операційна система:** *Windows XP/Vista/7/8/8.1/10*;

**Оперативна пам'ять:** 70 Мб;

**Пам'ять на жорсткому диску:** 10 Мб;

**Додаткове програмне забезпечення:** *.NET Framework* версії 4.0 або вище.

## 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОНТУРУ РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО АПАРАТУ»

### 5.1. Опис ідеї стартап-проекту

Інформаційні технології активно входять у сучасне життя, в тому числі в організацію виробничого процесу, діяльність якого неможлива без відповідної системи управління. Динамічність сучасної господарської діяльності вимагає обдуманого підходу до організації системи управління, підвищення ефективності якого можна досягти при своєчасному і раціональному використанні системи інформаційних технологій<sup>[20]</sup>.

Об'єктом дослідження даної роботи є інформаційні технології. Метою створення програмного алгоритму для імітаційного моделювання роботи контуру регулювання є отримання необхідних знань та вмінь по дослідженні процесів регулювання, властивості яких не можуть бути визначені інакше, ніж за допомогою імітаційного моделювання. Використання даного прикладного програмного пакету для імітаційного моделювання контуру регулювання температури у технологічного апарата дозволяє наочно оцінити можливості роботи контуру регулювання при відповідних значеннях налаштування для автоматичного регулятора параметрів  $K_{reg}$  та  $T_i$ . Значення оцінок якості динаміки регулювання параметру на виході технологічного апарату визначаються через інтегральний показник, а також за допомогою розрахунків значень перерегулювання параметру технологічного апарату.

Алгоритм програмного пакету для імітаційного моделювання роботи контуру регулювання автоматичного регулятора дозволяє змодельовати і візуально спостерігати процес регулювання температури на виході технологічного апарату та зробити і зафіксувати оцінки якості отриманих результатів.

В даний час інформативні технологічні процеси розглядаються так само як двигун з метою оптимізації бізнес-процесів компанії на базі наскрізної автоматизації елементів



їх бізнес-функцій. Інформаційні технологічні процеси стають провіантом здійснення на ринку, який передбачає собою помісь розрахунково-аналітичної роботи та специфічних послуг установам з метою автоматизації управління.

На сьогоднішній день є велика кількість програмних засобів з метою автоматизації того або іншого виробничого процесу, як загальних, так і спеціалізованих (галузевих). Залежно від потреб, фірма підбирає програмний продукт і інтегрує його в концепцію управління.

Компанія може підібрати єдиний або галузевий програмний продукт, а крім того створити особистий. Підбір залежить від специфіки використання і ціни продукту.

Таким чином, сучасна організація представляє суб'єкт, життєвий процес якого підтримується єдиним комплексом інформативних технологій.

**Таблиця 5.1** – Опис ідеї стартап-проекту

<b>Напрямки застосування</b>	<b>Вигоди для користувача</b>
Моніторинг роботи контуру регулювання температури кип'ятильника та дефлегматора	Оперативний доступ до інформації
Візуальне спостереження за станом роботи апарата: кип'ятильника та дефлегматора	Швидке реагування на проблеми та можливість екстреної зупинки
Можливість оцінити роботу регулятора МІК-21	Автоматична звітність в декілька кліків
Динамічне виведення значень вихідного параметру, сигналу керування з регулятора та	Оперативність в вирішуванні екстрених питань

## 5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
1.	Складність впровадження інновації	0,7	0,5	1	0,4		+	
2.	Програмне забезпечення	Прикладне ПЗ	Прикладне ПЗ	Прикладне ПЗ	Прикладне ПЗ			+
3.	Високий рівень сервісу	+	-	-	+			+
4.	Упровадження інноваційних та інформаційно-комунікаційних	+	+	+	-			+
5.	Патенти на продукти	+	-	+	-			+

## 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

В якості мови програмування обрано *C#* - об'єктно-орієнтована мова програмування з безпечною системою типізації для платформи *.NET*. Розроблена Андерсом Гейлсбергом, Скотом Вілтамутом та Пітером Гольде під егідою *Microsoft Research* (при фірмі *Microsoft*)<sup>[21]</sup>.

Синтаксис *C#* близький до *C++* і *Java*. Мова має строгу статичну типізацію, підтримує поліморфізм, перевантаження операторів, вказівники на функції-члени

класів, атрибути, події, властивості, винятки, коментарі у форматі XML. Переїнявши багато що від своїх попередників — мов C++, *Delphi*, Модуля і *Smalltalk* — C#, спираючись на практику їхнього використання, виключає деякі моделі, що зарекомендували себе як проблематичні при розробці програмних систем, наприклад множинне спадкування класів (на відміну від C++)<sup>[21]</sup>.

C# має «препроцесорні директиви» (хоча насправді він не має препроцесора) на основі препроцесора C, це дає можливість визначити символи, але не макроси. Умовні директиви, такі як *#if*, *#endif*, чи *#else* також можливі. Директиви типу *#region* дають натяк редактору для згортання фрагментів коду<sup>[21]</sup>.

C# — це повнофункціональна об'єктно-орієнтована мова, що підтримує всі три «стовпи» об'єктно-орієнтованого програмування: інкапсуляцію, успадкування і поліморфізм. Вона має прекрасну підтримку компонентів, надійний і стійкий завдяки використанню «складання сміття», обробки винятків, безпеки типів<sup>[22]</sup>.

Мова C# розроблялась «з нуля» і увібрала в себе багато корисних властивостей таких мов, як C++, *Java*, *Visual Basic*, а також *Pascal*. *Delphy* та ін При цьому необхідність зворотної сумісності з попередніми версіями відсутня, що дозволило мові C# уникнути багатьох негативних сторін своїх попередників<sup>[22]</sup>.

Як і *Java*, C# розроблявся для Інтернет і приблизно 75% його синтаксичних можливостей аналогічні мові програмування *Java*, його також називають «очищеною версією *Java*, 10% схожості з мовою програмування C++, а 5% — запозичені з мови програмування *Visual Basic*. Обсяг нових концептуальних ідей в мові C# близько 10%.

Виділення і об'єднання кращих ідей сучасних мов програмування робить мову C# не просто сумою їх достоїнств, а мовою програмування нового покоління<sup>[22]</sup>.

Режим регулювання в програмному пакеті дозволяє відтворити роботу замкненої системи керування з об'єктом керування та ПІ регулятором. Реалізовано даний алгоритм для двох апаратів: кип'ятильника та дефлегматора. Умовно можна розділити режим регулювання на чотири блоки. Перший включає технологічну схему об'єкта керування, другий – роботу регулятора, третій – результати роботи у графічному вигляді, четвертий

– оцінку якості отриманої системи. Використовуючи компоненту *trackBar* можна змінювати завдання по вихідному параметру в межах від -15% до +15%. За замовчування коефіцієнти ПІ регулятора вказані в полях *TextBox*. При цьому є можливість задати власні значення коефіцієнта підсилення та інтегральної складової для дослідження поведінки системи. В якості регулятора було обрано МІК-21. На дисплей якого виводяться три значення: завдання, вихідний сигнал з регулятора та поточне значення вихідного параметру. Для того, щоб наочно оцінити і побачити як спрацьовує регулятор реалізовано вивід результатів на графіки. В динамічному режимі є можливість проаналізувати отримати систему з відповідними настройками. Для повного аналізу був розроблений алгоритм для розрахунку оцінки якості системи. В якості показників обрано квадратичний інтегральний показник та відсоток перерегулювання.

#### **5.4. Характеристика потенційних клієнтів**

На цьому етапі проводиться маркетингове дослідження для виявлення характеристик і потреб потенційних клієнтів. Інформація, отримана в результаті проведення дослідження, дозволить визначити ті ознаки, за якими можна розділити ринок на сегменти.

Будь-які ознаки, за якими можна виділити групу споживачів, можуть бути використані для сегментування, оскільки єдиної схеми не існує.

Проводячи сегментування ринку необхідно правильно вибрати критерії та ознаки. Слід мати на увазі, що критерій - це спосіб оцінки обґрунтованості вибору того чи іншого сегмента ринку для даного підприємства, а ознака - це спосіб виділення даного сегмента на ринку.

Для поділу ринку на сегменти можуть використовуватися як один, так і в комбінації різні види ознак: психографічні, географічні, демографічні та поведінкові<sup>[23]</sup>.

Таблиця 5.3 – Характеристика потенційних клієнтів

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Реалізація підходу до автоматичного керування складними технологічними процесами за допомогою імітаційного моделювання	Всі галузі промисловості, виробництва і господарства, де потрібен постійний технологічний контроль оператора.	Державний стандарт України, GDS	Спрощення певних етапів виробництва; Зменшення ресурсовитрат; Обмін даними

### 5.5. Фактори загроз та можливостей

Загрози існують скрізь і при застосуванні даної технології також є загрози. Для попередження таких ситуацій необхідно встановлювати якісні та сучасні системи контролю та спостережень, а також працювати на виробництвах повинні висококваліфіковані фахівці. Також, періодично необхідно виконувати регулярний контроль та аналіз даних, щоб якомога швидше усунути несправність або помилки, у разі їх виникнення.

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища. Тому складаємо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 5.4)<sup>[24]</sup>.

Таблиця 5.4 – Фактори загроз

<b>№ п/п</b>	<b>Фактор</b>	<b>Зміст загрози</b>	<b>Можлива реакція компанії</b>
1.	Спад виробництва в галузях господарства	Потреба в продукті знижується	-
2.	Альтернативні способи надання послуг	Прихід сучасних технологій	Використання нових технологій
3.	Не відповідність даних, внаслідок виходу із ладу необхідного обладнання	Вихід із ладу обладнання	Ремонт або налагодження обладнання

Таблиця 5.5 – Фактори можливостей

<b>№ п/п</b>	<b>Фактор</b>	<b>Зміст можливості</b>	<b>Можлива реакція компанії</b>
1.	Застосування окремих комплексів для кожного з етапів виробництва.	Підхід реалізується для забезпечення меншого навантаження на сервери комплексу, а також для локальної звітності.	Збільшення ефективності роботи програмного комплексу.
2.	Розширення базового функціоналу комплексу, залежно від побажань замовника.	Дає можливість оптимізації під особливості окремих виробництв.	Створення нових алгоритмів і модулів для удосконалення і покращення роботи технології.

3.	Стимулювання розвитку інноваційного підприємства	Зменшення податкового тиму на стартап.	Масштабування стартапу.
----	--	--	-------------------------

### 5.6. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Проводимо аналіз (табл. 4.6) пропозиції: визначаємо загальні риси конкуренції на ринку з використання комп'ютерно-інформаційної технології для імітаційного моделювання.

Таблиця 5.6 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<b>Особливості конкурентного середовища</b>	<b>В чому проявляється дана характеристика</b>	<b>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</b>
Тип конкуренції	Монополістична конкуренція	Конкуренція, яка має місце на ринку з багатьма продавцями і покупцями та значною кількістю товарів, що реалізуються за різними цінами.
Рівень конкурентної боротьби	Національний рівень конкурентної боротьби	Відповідність технології та якості продукту вимогам законодавства України ринку.
За галузевою ознакою	Міжгалузєва	Урахування особливостей конкурентного середовища у кожній галузі, з якою взаємодіє. стартап. господарства.
Конкуренція за видами товарів	Товарно-видова конкуренція	Відстеження тенденцій на ринку з можливістю появи на ринку продуктів-замінників.

Продовження табл. 5.6 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

За характером конкурентних переваг	Цінова	1. Гнучке ціноутворення з урахуванням динаміки попиту. 2. Удосконалення технології, що спрямована на підвищення базових переваг.
За інтенсивністю	Не марочна інтенсивність	Забезпечення масштабованості стартапу в найближчій перспективі для створення стійкого сприйняття стартапу як окремої бізнес одиниці.

Проводимо оцінку привабливості стратегічної зони господарювання (СЗГ)<sup>[25]</sup> стартапу із застосуванням методу Дельфі. На першому етапі була проведена оцінка зміни в прогнозованому збільшенні стратегічної зони господарювання (G) методом Дельфі (табл. 5.7).

Таблиця 5.7 – Аналіз зміни в прогнозованому збільшенні СЗГ (G)

Параметри	Шкала інтенсивності											
	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	
1. Темп збільшення галузі												
2. Приріст числа споживачів												
3. Динаміка розширення ринку												
4. Ступінь оновлення продукції												
5. Ступінь оновлення технології												
6. Рівень насичення попиту												
7. Суспільне сприйняття товару												
8. Державне регулювання збільшення												
9. Збільшення числа конкурентів												
10. Ступінь застарівання продукції												
Загальна оцінка змін	+12											



На другому етапі проведено оцінку прогнозованих тенденцій зміни рентабельності СЗГ (Р) (табл. 5.8)<sup>[25]</sup>.

Таблиця 5.8 – Аналіз оцінки змін рентабельності СЗГ (Р)

Параметри	Шкала інтенсивності											
	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	
1. Коливання рентабельності												
2. Коливання цін												
3. Коливання об'ємів продажів												
4. Рівень попиту до потужностей												
5. Концепція ринку												
6. Стабільність структури ринку												
7. Оновлення складу продукції												
8. Вплив конкурентів												
9. Рівень задоволення замовником												
10. Державне регулювання діяльності організації												
Загальна оцінка змін рентабельності на перспективу	+19											

На третьому етапі визначимо рівень впливу загроз ( $-Q_i$ ) і використання можливостей ( $+Q_i$ ) зовнішнього середовища для підприємства в даній СЗГ (табл. 4.9). Оцінювання кожного чинника відбувається за шкалою від -5 до +5 балів. Зважена оцінка визначається як результат множення оцінки чинника, значущості групи факторів та значущості чинника в групі, до якої даний чинник належить. Негативна зважена оцінка розглядається як потенційна загроза, а позитивна - як можливість для організації в даній СЗГ<sup>[25]</sup>.

Таблиця 5.9 – Оцінка зовнішніх погроз і можливостей для підприємства

Група чинників	Чинники	Значущість групи чинників	Значущість чинника в групі	Оцінка чинника	Зважена оцінка	
					загрози	можливості
1	2	3	4	5	6	7
1. Економічні	Темпи інфляції	2.5	0.17	4		1.7
	Стабільність курсу гривни		0.38	3		2.85
	Тарифи на транспорт і енергоресурси		0.25	-3	-1.875	
	Податкові ставки		0.2	-2	-1	
2. Політичні	Державне регулювання ринків	0.5	0.21	4		0.42
	Інвестиційна політика		0.35	3		0.525
	Політична стабільність		0.18	-3	-0.27	
	Законодавча база для регулювання підприємницької діяльності		0.26	0	0	
3. Ринкові	Інтенсивність конкуренції	1.5	0.18	2		0.54
	Ціни на чинники виробництва		0.25	1		0.375
	Укладення прямих договорів		0.43	-4	-2.58	
	Динаміка попиту і пропозиції		0.14	3		0.63
4. Чинники конкуренції	Агресивність конкуренції	1.5	0.35	4		2,1
	Тенденції зміни числа конкурентів		0.45	-3	-2.025	
	Переваги лідерів галузі		0,2	3		0.9
5. Виробничо-технологічні	Стан виробництва	2.5	0.21	-2	-1.05	
	Можливість нових технологічних		0.32	1		0.8
	Рівень технології конкурентів		0.17	3		1.275
	Доступність ресурсів		0.3	-2	-1.5	

## Продовження таблиці 5.9 – Оцінка зовнішніх погроз і можливостей для підприємства

6. Соціальні	Соціальна напруженість в галузі	1.5	0.35	2		1.05
	Підвищення кваліфікації кадрів		0.27	4		1.62
	Юридичні обмеження в бізнесі		0.38	-2	-1.14	
	Підсумкова оцінка		10	-	-	-11.44

На підставі отриманих результатів розраховано значення привабливості СЗГ за формулою<sup>[25]</sup>:

$$\text{Привабливість СЗГ} = \alpha G + \beta P + \gamma (O - T),$$

де  $\alpha = 0.4$ ,  $\beta = 0.3$ ,  $\gamma = 0.3$ ;

$G$  - зміни в прогнозованому збільшенні СЗГ;

$P$  - зміни в рентабельності СЗГ;

$+Q_i$  та  $-Q_i$  - відповідно оцінки можливостей та загроз для організації.

$$\text{Привабливість СЗГ} = 0,4 \cdot 12 + 0,3 \cdot 19 + 0,3 \cdot (14,785 - 11,44) = 11.5035.$$

На четвертому етапі оцінюємо (табл. 4.10) рівень привабливості за відповідною шкалою.

Таблиця 5.10 – Шкала оцінювання привабливості СЗГ

Значення	Характеристика
-50...-46	Дуже неприваблива
-45...-36	Високо неприваблива
-35...-26	Достатньо неприваблива
-25...-16	Помірно неприваблива
-15...-6	Майже неприваблива
-5...+5	Відсутність привабливості
+6...+15	Майже приваблива
+16...+25	Помірно приваблива
+26...+35	Достатньо приваблива
+36...+45	Високо приваблива
+46...+50	Дуже приваблива

Значення привабливості СЗГ (11.5035) потрапляє в інтервал від 6 до 15, що може вважатися майже привабливим для підприємства. Позитивно слід оцінювати спрямованість показників  $G$  та  $P$ , які свідчать про непогані перспективи діяльності підприємства в даній СЗГ.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних та слабких сторін, загроз та можливостей (табл. 5.11)<sup>[24]</sup>.

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення<sup>[24]</sup>.

Таблиця 5.11 – SWOT- аналіз стартап-проекту

<p><i>Сильні сторони:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• контроль за здійсненням витрат, пошук можливостей щодо їхнього зниження;</li> <li>• інвестиційна привабливість підприємства;</li> <li>• зважена цінова політика;</li> <li>• врахування потреб споживачів.</li> </ul>	<p><i>Слабкі сторони:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• частка ринку;</li> <li>• результативність рекламної політики;</li> <li>• організація системи комунікацій.</li> </ul>
<p><i>Можливості:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• зростання грошових доходів населення;</li> <li>• застосування сучасних технологій організації товароруку;</li> <li>• впровадження різних форм організації торгівлі.</li> </ul>	<p><i>Загрози:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• недосконалість та змінюваність законодавства;</li> <li>• інфляційні процеси;</li> <li>• високий рівень безробіття.</li> </ul>

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок<sup>[24]</sup>.

Визначені альтернативи аналізуються (табл. 5.12) з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів<sup>[24]</sup>.

**Таблиця 5.12** – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу.	вище середньої	1 рік
2.	Стратегія підсилення сильних сторін за рахунок ринкових можливостей.	висока	6 місяців
3.	Стратегія компенсації слабких сторін наявними ринковими можливостями.	середня	2 роки
4.	Стратегія виходу з ринку	низька	не має

Обираємо стратегію нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу.

### 5.7. Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії (табл. 5.12) передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів<sup>[24]</sup>.

**Таблиця 5.12** – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Підприємства, де задіяна автоматична архітектура самої діяльності об'єкта, і потрібен постійний технологічний контроль оператора.	висока	специфічний	помірна	високий бар'єр входу у галузь

Проаналізувавши потенційні групи споживачів обираємо цільові групи та визначаємо стратегію охоплення ринку. Оскільки компанія працює із кількома сегментами, розробляючи для них окремо програми ринкового впливу, то використовуємо стратегію диференційованого маркетингу.

Для роботи в обраних сегментах ринку сформулюємо базову стратегію розвитку, а саме стратегію диференціації.

Таблиця 5.13 – Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи
Стратегія диференціації	Ринкове позиціонування	<ul style="list-style-type: none"> <li>• по відношенню до прямих конкурентів диференціація знижує ступінь замінності товару, посилює прихильність марці, зменшує чутливість до ціни і тим самим підвищує рентабельність;</li> <li>• прихильність клієнтів послабляє їх тиск на фірму і перешкоджає приходу на ринок нових конкурентів;</li> <li>• підвищена рентабельність збільшує стійкість до можливого зростання витрат в результаті дій сильного постачальника;</li> <li>• відмітні властивості товару і завойована прихильність клієнтів захищають фірму і від товарів-замінників.</li> </ul>

**Стратегія диференціації** передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмітних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Така відмінність може базуватися на об'єктивних або суб'єктивних, відчутних і невідчутних властивостях товару (у ширшому розумінні – комплексі маркетингу), бути реальною або уявною. Інструментом реалізації стратегії диференціації є ринкове позиціонування.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування (табл. 4.14), що

полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект<sup>[24]</sup>.

**Таблиця 5.13** – Визначення стратегії позиціонування

<b>Вимоги до товару цільової аудиторії</b>	<b>Базова стратегія розвитку</b>	<b>Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап- проекту</b>	<b>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)</b>
<p>Комп'ютерно-інформаційна технологія повинна мати можливість:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• графічного представлення даних;</li> <li>• зображення всіх необхідних компонентів (технологічний апарат та регулятор);</li> <li>• оцінки роботи отриманої системи;</li> <li>• поточне виведення всіх значень параметрів.</li> </ul>	<p>Стратегія диференціації</p>	<p>До конкурентних переваг слід віднести:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• оптимальна ціна за необхідний програмний пакет;</li> <li>• швидкодія роботи;</li> <li>• багаторівнева система безпеки;</li> <li>• більш мобільна система управління в порівнянні з конкурентами.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Доступний продукт в даному сегменті;</li> <li>• Використання інформаційних технологій для імітаційного моделювання контуру; регулювання температури;</li> <li>• Візуальна оцінка роботи системи з регулятором.</li> </ul>

### **5.8. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту**

Першим кроком є формування маркетингової концепції до товару, який отримає споживач. Для цього у таблиці 5.14 підсумовуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару<sup>[24]</sup>.

Таблиця 5.14 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Керування та моніторинг процесом переробки вторинного нафтового дистилляту, можливість отримувати та аналізувати технологічні параметри	Графічне представлення даних	Можливість в динамічному режимі спостереження за технологічним процесом
	Зображення всіх необхідних компонентів (технологічний апарат та регулятор)	Доступний і лаконічний інтерфейс
	Оцінка роботи отриманої системи	Можливість оцінити якість системи з новими налаштуваннями регулятора
	Поточне виведення всіх значень параметрів	Представлення в табличному вигляді всіх даних по зміні параметрів процесу

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій (табл. 5.15), що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів<sup>[24]</sup>.

Таблиця 5.15 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення
1.	Обережний вибір потенційних контрагентів, що зумовлено особливістю ринку з використання Інформаційних технологій	Інтернет-розсилки	Технологія	Привернути увагу до керування та моніторингу процесу шляхом використання інформаційної технології для імітаційного моделювання
2.		Спеціалізовані видання	Технологія	
3.		Спеціалізовані виставки, форуми	Технологія	

## 5.9. Висновки

Переглянувши всі плюси та мінуси використання інформаційної технології для імітаційного моделювання контуру регулювання параметру технологічного апарату, можемо зробити висновки, що ідея є актуальною та нагальною для застосування.



Використання програмного пакету для керування виробництвом має високу швидкодію. Технологія є доступною в плані ціни та застосування на власних підприємствах чи установах.

Бар'єри входу на ринок – високі. Наявна конкуренція високої концентрації середнього рівня інтенсивності. Для ринкової реалізації проекту обрано стратегію диференційованого маркетингу, яка передбачає чітку ідентифікацію окремих сегментів, з якими планує взаємодіяти стартап. Доцільна подальша імплементація проекту.

Так чи інакше розвиток проекту буде пов'язаний з можливістю інтенсифікації економічного розвитку в Україні, бо життєздатність стартапу визначатиметься темпами зростання хімічної промисловості та споріднених галузей, де необхідний моніторинг та управління процесами в апаратах.

## ВИСНОВКИ

При виконанні магістерської дисертації було розглянуто технологічний процес переробки вторинного нафтового дистиляту. Тема роботи: «Алгоритми інформаційної технології для імітаційного моделювання та регулювання параметрів процесу переробки вторинного нафтового дистиляту».

Для кип'ятильника, ректифікаційної колони та дефлегматора створено математичну модель, для кип'ятильника та дефлегматора синтезовано одноконтурну систему керування із ПІ-регулятором.

Було розроблено прикладний навчальний пакет для імітаційного моделювання та регулювання параметрів процесу переробки вторинного нафтового дистиляту.

Прикладний програмний пакет для імітаційного моделювання орієнтований на забезпечення навчання з роботи контуру регулювання і передбачає, щоб навчальний процес був цікавішим та насиченим, а також одночасно, дозволив оволодіти практичними навичками використання імітаційних моделей для підвищення ефективності знань по управлінню технологічними процесами у розв'язанні задач з проектування систем автоматичного регулювання параметрів у технологічних процесів.

Використання прикладного програмного забезпечення для імітаційного моделювання контуру регулювання параметру технологічного апарату сприяє кращому розумінню особливостей змінювання сигналу від автоматичного регулятора та вплив його значень на змінювання регулюючих впливів: витрата пари на вході у кип'ятильник та витрата холодної води на вході у дефлегматор. Алгоритм програмного пакету для імітаційного моделювання роботи контуру регулювання автоматичного регулятора дозволяє змоделювати і візуально спостерігати процес регулювання температури на виході технологічного апарату та зробити і зафіксувати оцінки якості отриманих результатів. Програмним пакетом для імітаційного моделювання всі результати досліджень показуються на графіках

## ЛІТЕРАТУРА

1. **Алексєєнко С. Ю., Ковалевський В. М.** Контури регулювання у схемі автоматизації процесу виділення нижчих парафінів з нафтового дистиляту [Текст] / С. Ю. Алексєєнко, В. М. Ковалевський // АКІТ – 2015: Матеріали конференції. Друга Міжнародна науково-практична конф. молодих учених, студентів та аспірантів; Київ, 15-16 квітня 2015 р. – К. :НТУУ «КПІ», 2015. – 128 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – с. 23-24. – 100 пр.
2. **Касаткин А.Г.** "Основные процессы и аппараты химической технологии", Химия, Москва 1971р.
3. **Юкельсон И. И.** Технология основного органического синтеза. – М.: Химия, 1989. – 368 с. : ил. – Библиогр.: с. 60–65. – 60 пр.
4. **Гельперин Н. И.** Основные процессы и аппараты химической технологии. Книга вторая. Серия «Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии» [Текст] / Н. И. Гельперин. – М. : Химия, 1981. – 812 с. Библиогр. : 804 - 805. – 20000 экз.
5. **Ковалевський В. М.** Методичні вказівки по виконанню розрахунково-графічної роботи курсу «Контроль та керування хіміко-технологічними процесами» до напрямку підготовки «Хімічна технологія» [Текст] / Уклад. В. М. Ковалевський // - К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 114 с. – Бібліогр.: с. 64–71.
6. **Алексєєнко С. Ю., Ковалевський В. М.** Динамічні властивості процесів у технологічній схемі переробки нафтового дистиляту [Текст] / С. Ю. Алексєєнко, В. М. Ковалевський // Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами», 25 листопада 2015 р. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2015 р. – 241 с. – Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>. – с. 15-16.
7. **Алексєєнко С. Ю., Ковалевський В. М.** Алгоритми для імітації значень технологічних параметрів процесу переробки нафтового дистиляту [Текст] / С. Ю.

Алексеевко, В. М. Ковалевський // Третя Міжнародна науково-практична конф. молодих учених, студентів та аспірантів АКІТ – 2016: Матеріали конференції. Київ, 20–21 квітня 2016 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 138 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – с. 34–35. – 150 пр.

8. **Алексеевко С. Ю., Ковалевський В. М.** Прикладна програма для імітації значень технологічних параметрів процесу переробки нафтового дистилляту / С. Ю. Алексеевко, В. М. Ковалевський // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 22 листопада 2017 р. – К: НУХТ, 2017 р. – 295 с. Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>

9. **Алексеевко С. Ю., Ковалевський В. М.** Програмний пакет для імітаційного моделювання роботи контура регулювання з візуальним спостереженням у часі зміни параметрів [Текст] / С. Ю. Алексеевко, В. М. Ковалевський // П'ята Міжнародна науково-практична конф. молодих учених, студентів та аспірантів АКІТ – 2018: Матеріали конференції. Київ, 11–12 квітня 2018 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2018. – 168 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – с. 79–80. – 60 пр.

10. **Алексеевко С. Ю., Ковалевський В. М.** Експорт у Excel даних з імітаційного моделювання значень параметрів до процесу технологічного апарату [Текст] / С. Ю. Алексеевко, В. М. Ковалевський // АКІТ – 2017: Матеріали конференції. Одинадцята науково-практична конференція студентів; Київ, 9-10 грудня 2017 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2017. – 95 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – с. 23-24. – 100 пр.

11. **Алексеевко С. Ю., Ковалевський В. М.** Прикладна програма для імітації значень параметрів процесу переробки нафтового дистилляту [Текст] / С. Ю. Алексеевко, В. М. Ковалевський // Четверта Міжнародна науково-практична конф. молодих учених, студентів та аспірантів АКІТ – 2017: Матеріали конференції. Київ, 19–20 квітня 2017 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2017. – 204 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – с. 97–98. – 60 пр.

12. **Александров И. А.**, Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования [Текст] / И. А. Александров. - 2-е изд., перераб. - М. : Химия, 1971. - 296 с.

13. **Алексєєнко С. Ю., Ковалевський В. М.** Прикладна програма для імітації значень параметрів процесу переробки нафтового дистиляту [Текст] / С. Ю. Алексєєнко, В. М. Ковалевський // Друга Міжнародна науково-практична конф. молодих учених, студентів та аспірантів АКІТ – 2015: Матеріали конференції. Київ, 15–16 квітня 2015 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 128 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – с. 23–24. – 100 пр.

14. Фізичне моделювання [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%96%D0%B7%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B5\\_%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%96%D0%B7%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B5_%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F).

15. **Алексєєнко С. Ю.**, Пожежна безпека процесу переробки вторинного нафтового дистиляту [Текст] / С. Ю. Алексєєнко, І. М. Ковтун // Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки: П'ятнадцята Всеукраїнська науково-методична конференція. Матеріали конференції. Київ, 14–15 листопада 2016 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 367 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – с. 142–144.

16. **Іванов А. О.** Теорія автоматичного керування: Підручник. / А. О. Іванов. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003. – 250 с.

17. Автоматизация технологических процессов легкой промышленности : учебник для вузов / Л. Н. Плужников [и др.] ; под ред. Л. Н. Плужникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Легпромбытиздат, 1993. – 368 с.: ил.

18. КИПИА портал – регуляторы [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://kipia-portal.ru/2016/02/23/regulatory/>.

19. Інтегральна складова. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [http://om.net.ua/7/7\\_6/7\\_69549\\_proporcionalnaya-sostavlyayushchaya.html](http://om.net.ua/7/7_6/7_69549_proporcionalnaya-sostavlyayushchaya.html).

20. Інформаційні технології [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://knuba.wcms.in.ua/>.

21. C Sharp [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/C\\_Sharp](https://uk.wikipedia.org/wiki/C_Sharp).

22. Мова програмування C# (Сі-шарп) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://damp.biz/mova-programuvannya-c-si-sharp-entsiklopediya/>.

23. Данченко Л.А. Маркетинг: підручник / Л.А. Данченко. - М.: МЕСИ, 2007. - 317 с.

24. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг.ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28с.

25. Шершньова З. Є. Стратегічне управління: [підруч. для студ.вищ. навч. закл.] / Шершньова З. Є. – К.: КНЕУ, 2004. – 699 с.

# ДОДАТКИ