

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Інститут Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад. І.С.Гулого**  
**Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки**

**«До захисту в ЕК»**

Директор інституту

\_\_\_\_\_ Сергій БЛАЖЕНКО  
(підпис) (ім'я та прізвище)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ лютого \_\_\_\_\_ 2024 р.

**«До захисту допущено»**

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Валентин ПЕТРЕНКО  
(підпис) (ім'я та прізвище)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ лютого \_\_\_\_\_ 2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності \_\_\_\_\_ 144 Теплоенергетика \_\_\_\_\_  
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми \_\_\_\_\_  
Теплоенергетика та енергоефективні технології

на тему: Перехідні процеси на випарній установці цукрового заводу, як результат нерівномірного пароспоживання вакуум-апаратами періодичної дії та зміни якості соку з дифузійного апарата

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ЗТЕ-2-7М

\_\_\_\_\_ Одуденко Юлія Миколаївна \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник \_\_\_\_\_ Петренко Валентин Петрович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище) (підпис)

Я, як здобувач Національного університету харчових технологій, розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела.

\_\_\_\_\_  
(підпис та прізвище здобувача)

Київ – 2024 р.

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім.акад. І.С.Гулого  
Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

Освітній ступінь \_\_\_\_\_ магістр \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 144 Теплоенергетика \_\_\_\_\_  
(код і назва)

Освітньо-професійна програма Теплоенергетика та енергоефективні  
технології

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ТЕХТ

\_\_\_\_\_ проф. Валентин ПЕТРЕНКО

“08” листопада 2023 року

## З А В Д А Н Н Я

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

**Одуденко Юлії Миколаївни**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Перехідні процеси на випарній установці цукрового заводу, як  
результат нерівномірного пароспоживання вакуум-апаратами періодичної дії  
та зміни якості соку з дифузійного апарата

керівник роботи \_\_\_\_\_ проф., д.т.н. Петренко Валентин Петрович \_\_\_\_\_  
( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “08”11.2023 року № 918-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 06.02.2024 року

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_  
матеріали переддипломної практики

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

Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. Загальні положення про теплове господарство та випарну установку  
цукрового заводу. Загальні положення про теплотехнологічну схему цукрового  
виробництва. Загальні положення про випарні установки цукрового  
виробництва. Закономірності зміни температурного напору на випарних



## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Пошук літературних джерел та підготовка аналітичного огляду.	09.11.23-01.12.23	
2	Упорядкування закономірності зміни температурного напору на випарних апаратах випарної установки при зміні тиску та витраті пари	01.12.23-10.12.23	
3	Узагальнення отриманих даних	10.12.23-27.12.23	
4	Дослідження зміни концентрації сиропу на випарних апаратах як функції відгуку на парове навантаження на корпус випарної установки	30.12.23-06.01.24	
5	Узагальнення отриманих даних	08.01.24-15.01.24	
6	Оформлення пояснювальної записки та презентації.	15.01.24-01.02.24	
7	Попередній захист роботи		
8	Захист роботи	Згідно графіку	

**Здобувач** \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Керівник роботи** \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Юлія ОДУДЕНКО**  
(ім'я та прізвище)

**Валентин ПЕТРЕНКО**  
(ім'я та прізвище)

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, скорочень, термінів .....	6
Анотація .....	8
Вступ .....	10
1. Загальні положення про теплове господарство та випарну установку цукрового заводу.....	11
1.1 Загальні положення про теплотехнологічну схему цукрового виробництва.....	11
1.2. Загальні положення про випарні установки цукрового виробництва ....	14
2. Закономірності зміни температурного напору на випарних апаратах випарної установки в перехідних режимах .....	16
2.1. Закономірності зміни температурного напору на випарних апаратах випарної установки при миттєвому зростанні тиску пари на першому корпусі ву .....	16
2.2. Закономірності зміни температурного напору на випарних апаратах випарної установки при миттєвому зростанні витрати пари на п'ятому (останньому) корпусі ву .....	27
2.3. Закономірності зміни температурного напору на випарних апаратах випарної установки при миттєвому зростанні витрати пари на третьому (середньому) корпусі ву .....	37
3. Функції відгуку концентрації сиропу з випарних апаратів на ступеневу зміну парового навантаження .....	42
3.1. Функції відгуку концентрації сиропу з випарних апаратів на ступеневу зміну парового навантаження на 1 корпус випарної установки .....	42
4. Залежність зміни концентрації сиропу на випарних апаратах як функції відгуку на парове навантаження на 3 корпус випарної установки з боку вакуум-апаратів періодичної дії .....	61

					<i>00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ</i>					
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата						
Розробив	Одуденко				Перехідні процеси на випарній установці цукрового заводу, як результат нерівномірного пароспоживання вакуум-апаратами періодичної дії та зміни якості соку з дифузійного апарата			Літера	Аркуш	Аркушів
Перевіри	Петренко						4		88	
Н. контр.					<b>НУХТ, гр. ЗТЕ-2-7М</b>					
Затвердив	Петренко									

Висновки .....	70
Список використаних джерел .....	72
Додаток А	
Список наукових праць та творчих досягнень .....	73

					00КРМ 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ВУ – випарна установка;

$\Delta t_i^{kop}$  – корисний температурний напір довільного випарного апарата, °С;

$\Delta_{фх}$ ,  $\Delta_{гд}$  – фізико-хімічна та гідродинамічна температурні депресії, відповідно;

$D_k$  – витрата пари на конденсатор з останнього корпусу ВУ, кг/с;

$W$  – випарена вода на ВУ, кг/с;

$\Delta E_p$  – витрата пари, що перепускається, кг/с;

$t_1^o$  – температура вторинної пари корпусу до нанесення збурення, °С;

$M_n, M_{mn}$  – маси розчину в корпусі та маса металу випарного апарату  $n$ -го ступеня випаровування, відповідно, кг;

$C_1, C_m$  – теплоємності розчину в  $n$ -му корпусі та металу, відповідно, Дж/кг·К;

$K$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$F$  – площа поверхні теплообміну випарного апарата, м<sup>2</sup>;

$\tau$  – час, с;

$t_n^{zp}$  – температура нагрівної пари  $n$ -го корпусу ВУ до нанесення збурення, °С;

$\delta t$  – миттєва зміна температури нагрівної пари, °С;

$B_n$  – параметр зміни швидкості температури вторинної пари для випарного апарата  $n$ -го ступеня випаровування;

$t_{no}$  – температура вторинної пари  $n$ -го корпусу до нанесення збурення, °С;

$t_n(\tau)$  – поточна температура вторинної пари, °С;

$\Delta Q_n$  – теплова потужність потоку пари з  $n$ -го корпусу на конденсатор в результаті відкриття засувки, Вт;

$Q_n$  – стаціонарне навантаження  $n$ -го корпусу ВУ, Вт;

$Bn$  – параметр теплової інерційності для  $n$ -го корпусу ВУ;

$G_{ex}$  – масова витрата рідини на апарат, кг;

$\Sigma E_l$  – сума стабільних безперервних паровідборів з корпусу випарного апарата;

$E_\tau$  – ступеневе миттєве навантаження, що виникає при вмиканні теплообмінного апарата;

					00КРМ 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

$G_o$  – витрата соку на ВУ, кг/с;

$C_o$  – концентрація соку, що поступає на головний корпус ВУ, %;

$W_i$  – випарена волога на  $i^{\text{ому}}$  корпусі випарної установки, без врахування навантаження на вакуум апарати 1 кристалізації, кг/с;

$E(\tau)$  – парове навантаження на ВУ з боку вакуум апаратів 1 кристалізації, Вт;

$G_{\text{сир}}$  – витрата сиропу, кг/с;

$G_{\text{клер}}$  – витрата клеровки, кг/с;

$G_{\text{бн}}$  – витрата білої патоки, кг/с;

$G_{\text{ен}}$  – водні підкачки, кг/с;

$CP_{\text{сир}}, CP_{\text{утф}}, CP_{\text{клер}}, CP_{\text{бн}}$  – масові концентрації сиропу, утфелю, клеровки та білої патоки, відповідно, %.

					00КРМ 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

## АНОТАЦІЯ

Магістерська робота на тему «Перехідні процеси на випарній установці цукрового заводу, як результат нерівномірного пароспоживання вакуум-апаратами періодичної дії та зміни якості соку з дифузійного апарата» містить 88 сторінок, 29 малюнків та 1 додаток.

В роботі представлені результати аналітичного моделювання розвитку температурних та концентраційних хвиль по корпусам багатокорпусної випарної установки в результаті нанесення збурення у вигляді теплового ступеневого навантаження, або зміни концентрації соку, що поступає на головний корпус випарної установки. Отримано відповідні аналітичні залежності для розрахунку концентраційних та теплових полів, надана графічна інтерпретація результатів.

Виконано аналітичне моделювання розвитку концентраційних хвиль по корпусам випарної установки в результаті змінного парового навантаження вакуум апаратами періодичної дії. Отримано відповідні аналітичні залежності для розрахунку концентраційних та теплових полів, надана графічна інтерпретація результатів.

**Ключові слова:** випарна установка, парове навантаження, вакуум апарат періодичної дії, концентраційні та теплові поля

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		1

## ANNOTATION

Master's thesis on the topic "Transient processes at the evaporation plant of a sugar factory, as a result of uneven steam consumption by intermittent vacuum devices and changes in the quality of juice from the diffusion device" contains 88 pages, 29 figures and 1 appendix.

The paper presents the results of analytical modeling of the development of temperature and concentration waves on the bodies of a multi-body evaporation plant as a result of applying a disturbance in the form of a thermal step load, or a change in the concentration of juice entering the main body of the evaporation plant. Appropriate analytical dependences for the calculation of concentration and thermal fields were obtained, and a graphical interpretation of the results was provided.

Analytical modeling of the development of concentration waves on the casings of the evaporation plant as a result of variable steam load by periodic vacuum devices was performed. Appropriate analytical dependences for the calculation of concentration and thermal fields were obtained, and a graphical interpretation of the results was provided.

**Key words:** evaporation plant, steam load, intermittent vacuum apparatus, concentration and thermal fields

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

## ВСТУП

Теплотехнологія виробництва цукру є системою взаємопов'язаних процесів виробництва та споживання теплової енергії. Цукрове виробництво є найбільш енергоємною галуззю в харчовій промисловості з розвинутою системою генерації та споживання теплової енергії. Але енергоємність виробництва залежить не тільки від повноти використання вторинних енергоресурсів та досконалості теплотехнологічних процесів, а і від ритмічності виробництва, від адекватності реагування системи управління теплотехнологічними процесами на збурення, що періодично мають місце під час протікання технологічного процесу.

Система збурень виникає внаслідок періодичної зміни потужності перероблення та якості сировини (буряків), та наявності періодичних споживачів пари – вакуум апаратів першої кристалізації. Коливання парового навантаження на корпуси випарної установки викликає реакцію з боку випарних апаратів – зміну концентрації, температурного режиму, що повинно враховуватись в системі управління технологічним процесом для підтримання заданого температурного режиму та прогнозування змін, що матимуть місце через певний час після нанесення збурень. Для вирішення задач інтелектуального управління випарною установкою і теплотехнологічною схемою в цілому необхідно мати математичні моделі реагування випарної установки на збурення – зміну витрати та концентрації на вході у ВУ, періодична зміна споживання пари вакуум-апаратами, періодичне додаткове навантаження з останнього корпусу ВУ на конденсатор [1].

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

# 1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРО ТЕПЛОВЕ ГОСПОДАРСТВО ТА ВИПАРНУ УСТАНОВКУ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ.

## 1.1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРО ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНУ СХЕМУ ЦУКРОВОГО ВИРОБНИЦТВА

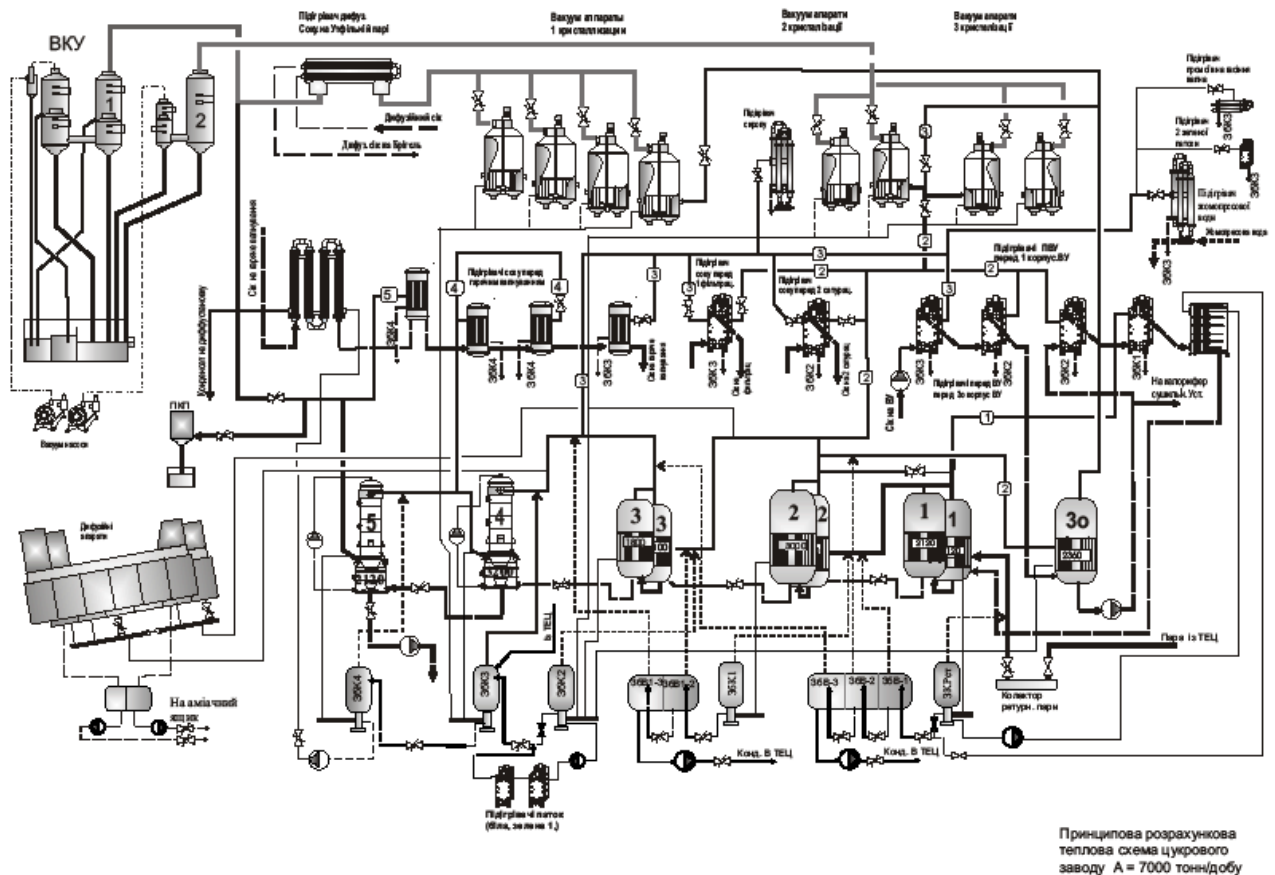


Рис. 1.1. Типова теплова схема цукрового заводу

Теплова схема цукрового заводу (рис. 1.1) забезпечує необхідний температурний режим станцій нагрівання соків відповідно до технологічного регламенту – у відділенні добування соку на дифузійному апараті, відділенні очищення соку на станції вапнування та сатурації, відділенні концентрування соку до сиропу на випарній установці та кристалізації цукру у вакуум-апаратах в продуктовому відділенні [1].

У відділенні добування соку пара витрачається на нагрівання стружки в камерах похилого дифапарата, або у підігрівачах циркуляційного соку в разі

застосування колонного дифапарата. Теплота витрачається ще на нагрівання жомопресової води та в пусковий період на нагрівання барометричної води.

Дифузійний сік підігрівається в теплообміннику, який споживає пару із вакуум-апаратів, яка відноситься до вторинних енергоресурсів. Підігрітий дифузійний сік поступає на попереднє вапнування в апараті Брігель Мюллера, де до нього підмішується частина не фільтрованого соку 1 сатурації, суспензія 2 сатурації в разі подавання вапна перед 2 сатурацією та незначна кількість вапнякового молока.

Сік після попереднього вапнування поступає в холодний дефекатор, звідки прокачується на станцію нагрівання перед гарячим вапнуванням. Нагрівання до температури 92 °С здійснюється послідовно:

- теплообміннику конденсатами з останнього збірника конденсатів конденсатної схеми;
- вторинною парою 5 корпусу випарної установки;
- вторинною парою 4 корпусу випарної установки;
- вторинною парою 3 корпусу випарної установки.

В дефекаторі до нагрітого соку додається вапно. Сік перетікає в апарат 1 сатурації, де відбувається продування соку сатураційним газом із вапнякової печі. Сік в результаті сатурації охолоджується на 5 – 7 °С. Частина не фільтрованого соку 1 сатурації у кількості 30 – 40 % до маси буряків поступає на апарат попереднього вапнування, а основна маса соку фільтрується з відведенням фільтрованого соку на 2 сатурацію, та суспензії, яка поступає на камерні фільтри. Фільтрований сік перед подаванням на 2 сатурацію, нагрівається в теплообміннику парою 3 та, за необхідності, 2 корпусів ВУ до температури 95 °С. Фільтрат з камерних фільтрів змішується із фільтрораним соком, а промії із фільтрів поступають на гасіння вапна. Сік після 2 сатурації фільтрується, сульфітується і поступає збірник соку перед випарною установкою (ВУ).

Сік перед ВУ нагрівається послідовно вторинною парою 3, 2, 1 корпусів ВУ та догрівається до температури кипіння у першому корпусі

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

відпрацьованою (ретурною) парою після турбіни та ОУ (охолоджувальної установки). У деяких схемах перша група підігрівачів перед ВУ нагрівається конденсатом ретурної пари. Сік на ВУ концентрується від початкової концентрації 14 – 16 % до сиропу з концентрацією 65 – 72 %. Сироп проходить стадії сульфитації, фільтрації, нагрівання в підігрівачі сиропу і накопичується в збірнику сиропу перед вакуум-апаратами.

У продуктовому відділенні розміщені вакуум-апарати 1, 2 та 3 кристалізації, як правило, з механічною циркуляцією розчину. Вакуум-апарати 1 кристалізації споживають вторинну пару 3 корпусу ВУ, або, в деяких схемах, 4 корпусу ВУ. Вакуум-апарати 2 та 3 кристалізації споживають, як правило, вторинну пару 3 корпусу ВУ, або, якщо відсутня механічна циркуляція – 2 корпусу ВУ. Зварений утфіль 1 кристалізації поступає на центрифуги, де відокремлюється перший відтік (1 зелена патока), далі 2 відтік (біла патока), яка утворена в результаті промивання цукру гарячим конденсатом. Біла патока повертається на вакуум-апарати 1 продукту. Білий цукор висушується в сушильній установці барабанного типу, в якій, на нагрівання повітря (сушильного агента) витрачається вторинна пара 1 корпусу ВУ. Зелена патока 1 продукту поступає на вакуум-апарати 2 продукту, після яких зварений утфіль подається в центрифуги 2 продукту, де відділяється зелена патока 2 продукту і жовтий цукор. Зелена патока 2 продукту поступає на вакуум-апарати 3 продукту, після яких зварений утфіль подається на центрифуги 3 продукту, де відділяється маляс та бурий цукор. Жовтий та бурий цукор розчиняється (клерується) очищеним соком, а утворена клеровка після сульфитації та нагрівання та фільтрації подається на вакуум-апарати 1 кристалізації. В деяких схемах передбачена клеровка сиропом після ВУ. Густі зелена патока 1 продукту, зелена патока 2 продукту, та біла патоки (другий відтік) нагріваються парою, або конденсатом у виносних підігрівачах циркуляційного типу. Розрідження на вакуум-апаратах створює вакуум-конденсаційна установка, яка складається з комбінованого конденсатора та вакуум-насосу.

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

## 1.2. Загальні положення про випарні установки цукрового виробництва

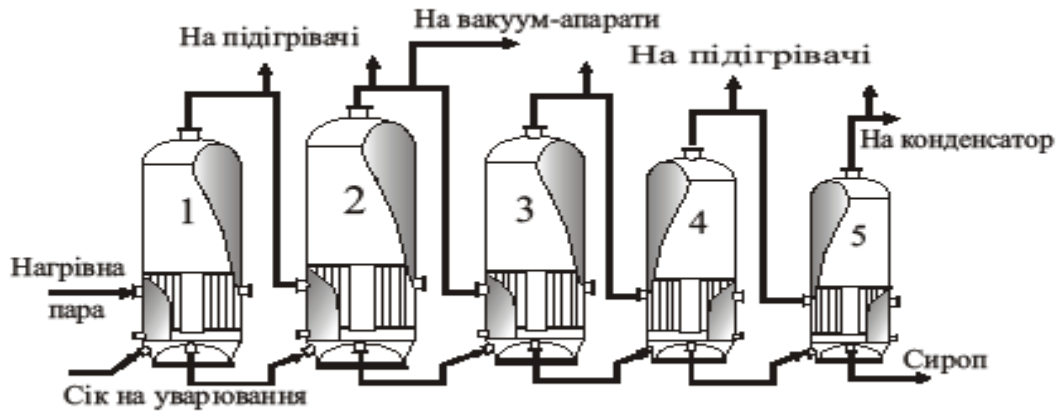


Рис. 1.2. П'ятикорпусна ВУ з випарними апаратами Роберта

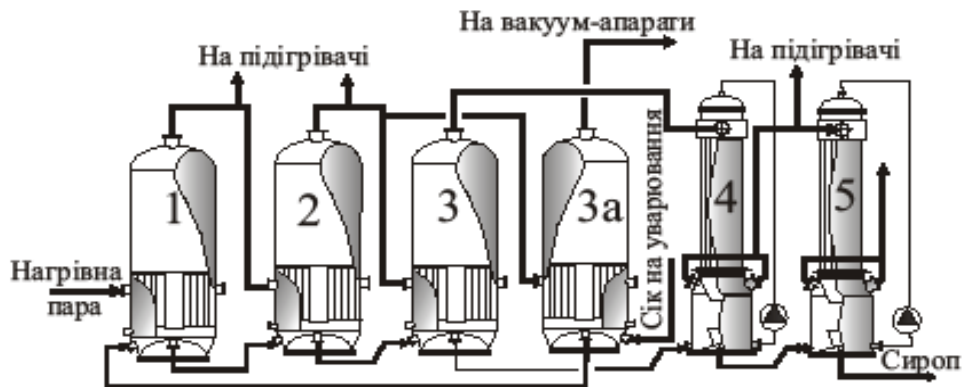


Рис. 1.3. П'ятикорпусна ВУ з випарними апаратами Роберта та плівковими ВА на хвостовій частині ВУ з «3а» корпусом, що забезпечує парою продуктове відділення

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



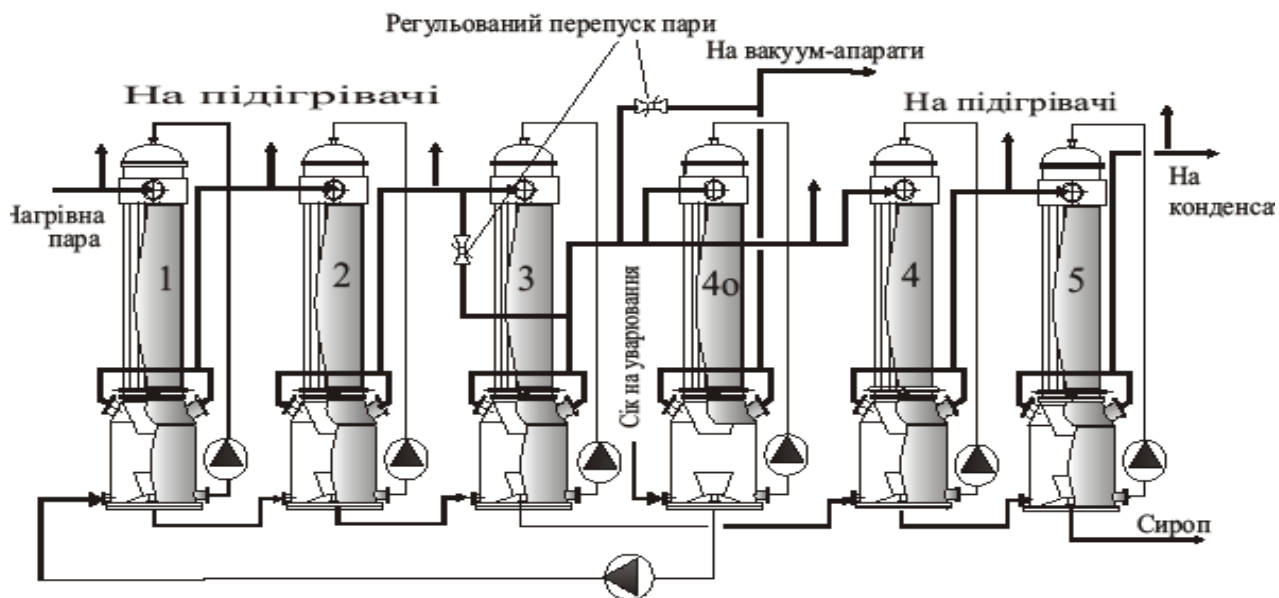


Рис. 1.6. П'ятикорпусна ВУ з плівковими апаратами з «4o» корпусом, що забезпечує пару продуктове відділення

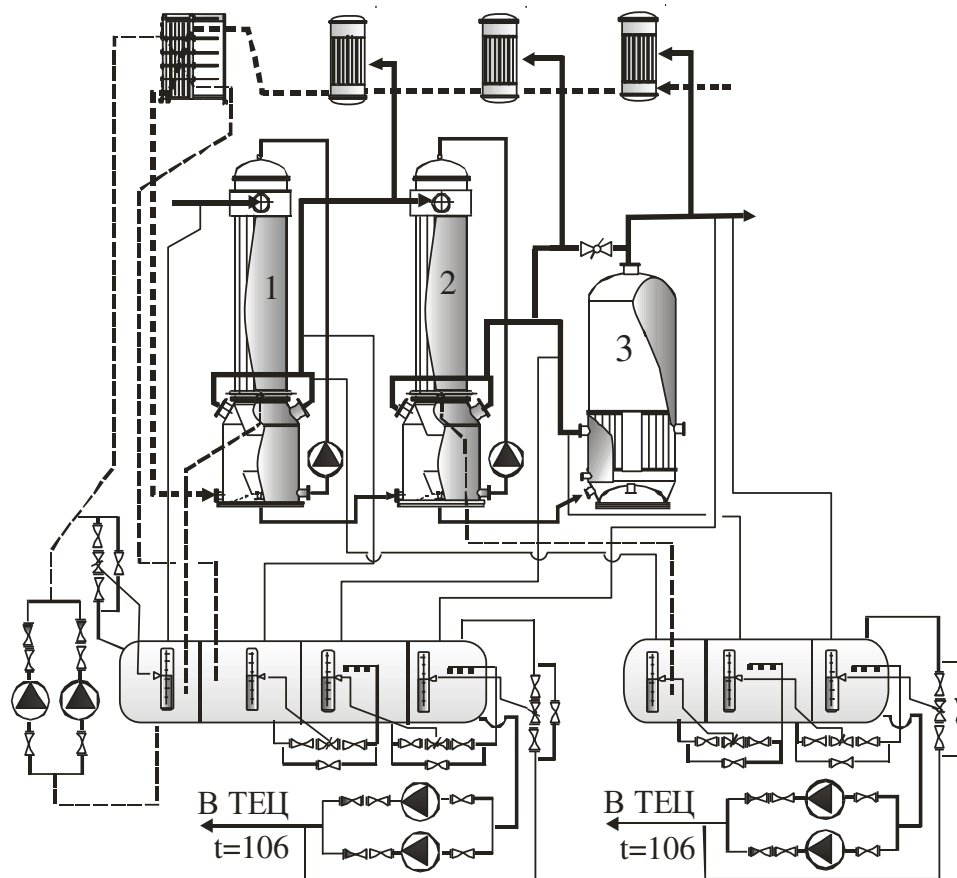


Рис. 1.7. Фрагмент охолодження конденсатів головної частини ВУ з комбінованим охолодженням конденсатів ретурної пари

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

## **2. ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАПОРУ НА ВИПАРНИХ АПАРАТАХ ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ**

### **2.1. ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАПОРУ НА ВИПАРНИХ АПАРАТАХ ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ ПРИ МИТТЄВОМУ ЗРОСТАННІ ТИСКУ ПАРИ НА ПЕРШОМУ КОРПУСІ ВУ**

Багатокорпусні випарні установки (ВУ), що експлуатуються на цукрових заводах інерційні в управлінні внаслідок значної ємності випарних апаратів і, як наслідок, часу релаксації під час роботи обладнання періодичної дії. В процесі експлуатації по-можливості підтримують задану концентрацію сиропу на виході із останнього корпусу ВУ, а також підтримують задану температуру вторинної пари 2, або 3 корпусу ВУ, за якого станції нагрівання соків забезпечать необхідні температури продуктів виробництва відповідно до вимог технологічного регламенту. Збуреннями є змінні в часі концентрація та витрата соку на ВУ і, головне – періодично діючі вакуум-апарати першого продукту, які є потужними споживачами пари з ВУ. В процесі експлуатації підтримують тиск нагрівної пари на 1 корпус ВУ, вихід пари на конденсатор, перепуски пари з головних корпусів ВУ на хвостові [2].

Прогнозування характеру розвитку концентраційних хвиль по ВУ пов'язано з двома експлуатаційними параметрами – швидкості передавання температурного напору по корпусам ВУ і концентраційних хвиль. Змоделюємо процес швидкості передавання температурного напору в результаті дії двох факторів регулювання – зміни температури нагрівної пари та зміни навантаження на конденсатор з останнього корпусу ВУ.

На випарних апаратах багатокорпусної ВУ в усталеному режимі залежно від навантаження та інтенсивності теплопередачі встановлюються корисні температурні напори по корпусам ВУ визначаються

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

$$\Delta t_1^{kop} = \frac{Q_1}{K_1 F_1}; \quad \Delta t_2^{kop} = \frac{Q_2}{K_2 F_2}; \quad \Delta t_3^{kop} = \frac{Q_3}{K_3 F_3}; \quad \Delta t_4^{kop} = \frac{Q_4}{K_4 F_4}; \quad \Delta t_5^{kop} = \frac{Q_5}{K_5 F_5},$$

де  $\Delta t_i^{kop} = t_i^{zp} - t_i^{kim} = t_i^{zp} - t_i^{sm} - \Delta_{\phi x} - \Delta_{\epsilon d}$  – корисний температурний напір довільного випарного апарата;  $\Delta_{\phi x}$ ,  $\Delta_{\epsilon d}$  – фізико-хімічна та гідродинамічна температурні депресії, відповідно.

Випарена волога по корпусам ВУ  $W_i$  визначена за формулами:

$$\text{випарена волога на 1 корпусі ВУ} \quad W_1 = \sum_1^5 E_i + D_{\kappa};$$

$$\text{випарена волога на 2 корпусі ВУ} \quad W_2 = W_1 - E_1 = \sum_2^5 E_i + D_{\kappa};$$

$$\text{випарена волога на 3 корпусі ВУ} \quad W_3 = W_2 - E_2 = \sum_3^5 E_i + D_{\kappa};$$

$$\text{випарена волога на 4 корпусі ВУ} \quad W_4 = W_3 - E_3 = \sum_4^5 E_i + D_{\kappa};$$

$$\text{випарена волога на 5 корпусі ВУ} \quad W_5 = W_4 - E_4 = E_5 + D_{\kappa};$$

$$\text{вагальна кількість випареної вологи на ВУ} \quad W = \sum_1^5 W_i = \sum_1^5 i E_i + 5 D_{\kappa},$$

а тепловидатності корпусів ВУ відповідно як :

$$Q_1 = W_1 r_1;$$

$$Q_2 = W_2 r_2;$$

$$Q_3 = W_3 r_3;$$

$$Q_4 = W_4 r_4;$$

$$Q_5 = W_5 r_5.$$

В наведених залежностях:  $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5$  – паровідбори відповідно з 1, 2, 3, 4, 5 корпусів ВУ,  $D_{\kappa}$  – витрата пари на конденсатор з останнього корпусу

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

ВУ,  $W$  – випарена вода на ВУ,  $r$  – теплота фазового перетворення. За наявності перепусків пари продуктивність ВУ відповідає виразу:

$$W = \sum_1^5 W_i = \sum_1^5 i E_i + p \Delta E_p - (p+1(2,3)) \Delta E_p + 5 D_k,$$

де  $\Delta E_p$  – витрата пари, що перепускається; «р» – номер корпусу ВУ з якого здійснюється перепускання пари; «р+1(2,3)» – номер корпусу ВУ в який здійснюється перепускання пари.

В період усталеної роботи ВУ за відсутності змін навантажень встановлюється певний тиск та температура насичення нагрівної пари  $t_1^{sp}$  залежно від навантаження корпусів  $Q_i$ , поверхні теплообміну  $F_i$  та коефіцієнтів теплопередачі  $K_i$ . Стабілізується певний температурний режим, за якого температури вторинної пари корпусів мають конкретні значення, а саме

$$t_1^o, t_2^o, t_3^o, t_4^o, t_5^o.$$

Розглянемо, яким чином реалізується температурна хвиля по корпусам випарної установки в разі миттєвого збільшення температури нагрівної пари на 1 корпус випарної установки.

Якщо в якийсь момент часу змінити (збільшити) температуру нагрівної пари на величину  $\delta t$ , то температурна реакція першого корпусу на дане збурення (зміна температури вторинної пари) виразиться рівнянням.

$$K_1 F_1 [t_1^{sp} + \delta t - t_1(\tau)] d\tau = (M_1 C_1 + M_{m1} C_m) dt_1 + K_1 F_1 (t_1^{sp} - t_1^o) d\tau, \quad (2.1)$$

або, після спрощення

$$K_1 F_1 [t_1^o + \delta t - t_1(\tau)] d\tau = (M_1 C_1 + M_{m1} C_m) dt_1, \quad (2.2)$$

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

де  $t_1^o$  – т-ра вторинної пари 1 корпусу до нанесення збурення,

$M_1, M_{m1}$  – маси розчину в корпусі та маса металу випарного апарату 1 ступеня випаровування, відповідно;

$C_1, C_m$  – теплоємності розчину в 1 корпусі та металу, відповідно;

$K_1, F_1$  – коефіцієнт теплопередачі та поверхні теплообміну випарного апарату, відповідно;

$\tau$  – час,  $t_1^{2p}$  – температура нагрівної пари 1 корпусу ВУ до нанесення збурення,  $\delta t$  – миттєва зміна температури нагрівної пари, як результат відкриття парової засувки на перший корпус ВУ.

При цьому вважаємо, що теплове навантаження по корпусам ВУ в період зростання температур (2 – 3 хвилини) не змінюється. Зрозуміло, що надалі, в результаті підвищення температури пари по корпусам відбудеться перерозподіл навантаження на випарні апарати в бік хвостової частини випарної установки, і температурні напори по корпусам ВУ зміняться.

Інтегрування (2.2) за початкових умов  $\tau = 0$ ;  $t_1 = t_1^o$  дає залежність для температури вторинної пари 1<sup>го</sup> корпусу ВУ в часі

$$t_1(\tau) = t_1^o + \delta t [1 - \exp(-B_1\tau)], \quad (2.3)$$

де  $B_1 = \frac{K_1 F_1}{M_1 C_1 + M_{m1} C_m}$  – параметр зміни швидкості температури вторинної пари для випарного апарату першого ступеня випаровування.

На 2<sup>ому</sup> корпусі ВУ температура нагрівної пари змінюється в часі відповідно до виразу (2.3), тому температурна реакція 2 корпусу на дане збурення виразиться рівнянням:

$$K_2 F_2 [t_1(\tau) - t_2(\tau)] d\tau = (M_2 C_2 + M_{m2} C_m) dt_2 + KF(t_1^o - t_2^o) d\tau. \quad (2.4)$$

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Підставимо вираз (2.3) для  $t_1(\tau)$  в (2.4)

$$K_2 F_2 [\delta t (1 - e^{-B_1 \tau}) + t_2^o - t_2(\tau)] d\tau = (M_2 C_2 + M_{m2} C_m) dt_2, \quad (2.5)$$

Інтегруємо (2.5) за початкових умов  $\tau = 0$ ;  $t_2 = t_2^o$  і отримуємо залежність зміни в часі температури вторинної пари 2 корпусу ВУ при миттєвому зростанні тиску (температури) пари на 1 корпус ВУ.

$$t_2(\tau) = t_2^o + \delta t - \delta t \left( \frac{B_2}{B_2 - B_1} \right) \exp(-B_1 \tau) + \delta t A_o \exp(-B_2 \tau), \quad (2.6)$$

де  $B_2 = \frac{K_2 F_2}{M_2 C_2 + M_{m2} C_m}$  – параметр зміни швидкості температури вторинної

пари для випарного апарата другого ступеня випаровування;  $A_o = \frac{B_1}{B_2 - B_1}$ .

Відповідно для 3 корпусу ВУ маємо:

$$K_3 F_3 [t_2(\tau) - t_3(\tau)] d\tau = (M_3 C_3 + M_{m3} C_m) dt_3 + K_3 F_3 (t_2^o - t_3^o) d\tau. \quad (2.7)$$

Підставимо (2.6) для  $t_2(\tau)$  в (2.7) та інтегруємо за початкових умов  $\tau = 0$ ;  $t_3 = t_3^o$ . В результаті отримуємо залежність зміни температури вторинної пари 3<sup>го</sup> корпусу ВУ:

$$t_3(\tau) = t_3^o + \delta t - \delta t A_1 \exp(-B_1 \tau) + \delta t A_2 \exp(-B_2 \tau) + \delta t A_3 \exp(-B_3 \tau), \quad (2.8)$$

де  $B_3 = \frac{K_3 F_3}{M_3 C_3 + M_{m3} C_m}$  – параметр зміни швидкості температури вторинної

пари для випарного апарата третього ступеня випаровування.

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

$$A_1 = \frac{B_2 B_3}{(B_2 - B_1)(B_3 - B_1)}; \quad A_2 = \frac{B_1 B_3}{(B_2 - B_1)(B_3 - B_2)}; \quad A_3 = A_1 - A_2 - 1.$$

Аналогічно для 4 корпусу ВУ

$$K_4 F_4 [t_3(\tau) - t_4(\tau)] d\tau = (M_4 C_4 + M_{m4} C_m) dt_4 + KF(t_3^o - t_4^o) d\tau. \quad (2.9)$$

Підставимо вираз (2.8) для  $t_3(\tau)$  в (2.9).

Виконаємо інтегрування за початкових умов  $\tau=0$ ;  $t_4 = t_4^o$ ; в результаті отримаємо залежність зміни температури вторинної пари 4 корпусу ВУ:

$$t_4(\tau) = t_4^o + \delta t - \delta t A_1 \left( \frac{B_4}{B_4 - B_1} \right) \exp(-B_1 \tau) + \delta t A_2 \left( \frac{B_4}{B_4 - B_2} \right) \exp(-B_2 \tau) + \\ + \delta t A_3 \left( \frac{B_4}{B_4 - B_3} \right) \exp(-B_3 \tau) + \delta t A_4 \exp(-B_4 \tau), \quad (2.10)$$

де  $B_4 = \frac{K_4 F_4}{M_4 C_4 + M_{m4} C_m}$  – параметр зміни швидкості температури вторинної

пари для випарного апарата четвертого ступеня випаровування;

$$A_4 = \left( \frac{B_4}{B_4 - B_1} \right) A_1 - \left( \frac{B_4}{B_4 - B_2} \right) A_2 - \left( \frac{B_4}{B_4 - B_3} \right) A_3 - 1.$$

Аналогічно для 5 корпусу ВУ:

$$K_5 F_5 [t_4(\tau) - t_5(\tau)] d\tau = (M_5 C_5 + M_{m5} C_m) dt_5 + KF(t_4^o - t_5^o) d\tau. \quad (2.11)$$

Підставивши вираз (10) для  $t_4(\tau)$  в (11) та зробивши інтегрування за початкових умов  $\tau=0$ ;  $t_5 = t_5^o$ , отримаємо залежність зміни температури вторинної пари 5 корпусу ВУ:

										Лист
										22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ					



в апаратах становить відповідно 12, 17, 14, 15, 10 тонн, а маса металу самих випарних апаратів – відповідно 51,4, 71, 48,8, 43,56, 12,16 тонн.

Оскільки прийнято, що парове навантаження по корпусам не змінюється, весь температурний режим збільшиться на величину  $\delta t$ , але кожний корпус змінить даний температурний рівень за різний час.

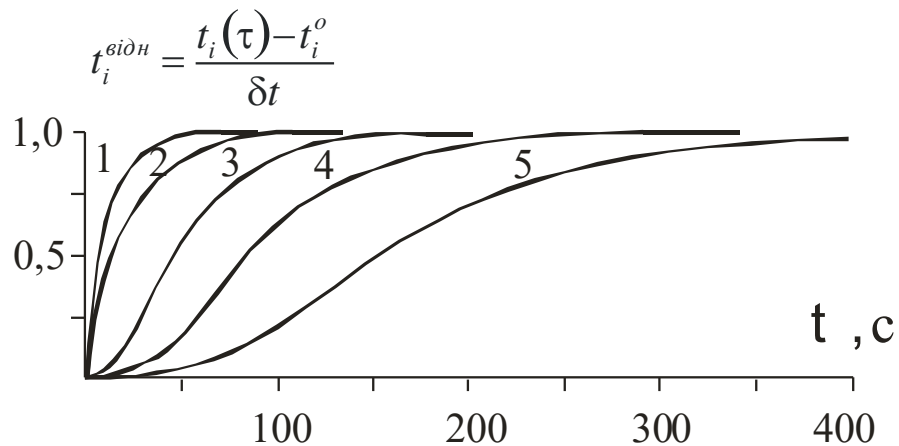


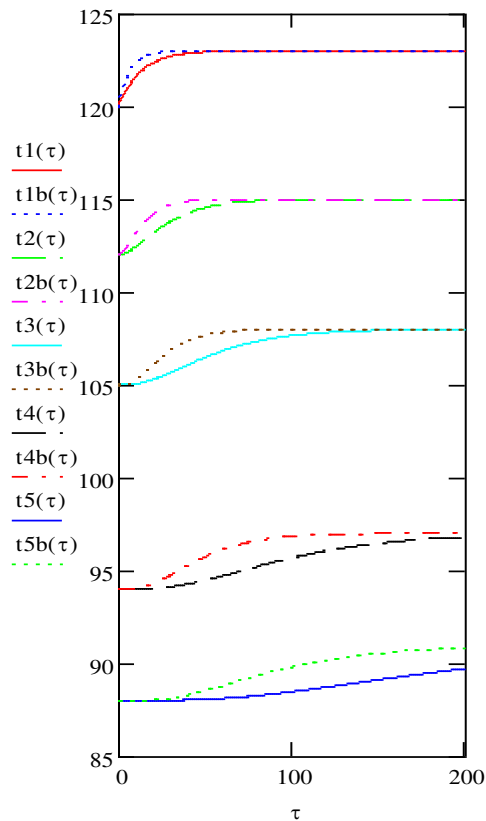
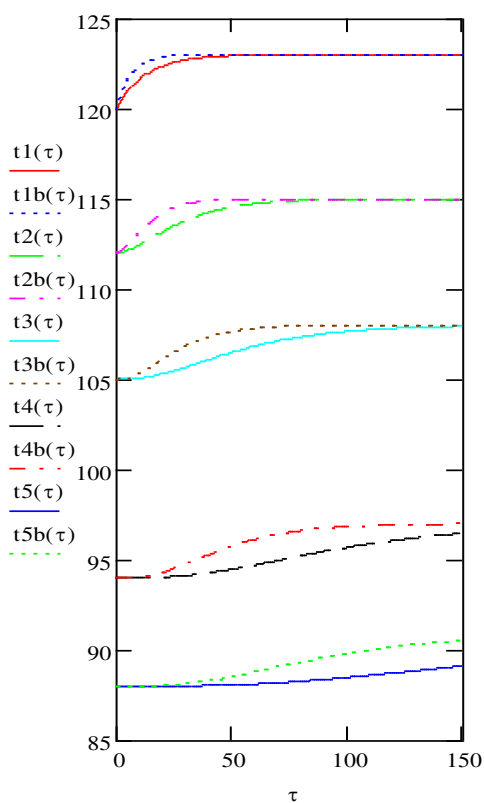
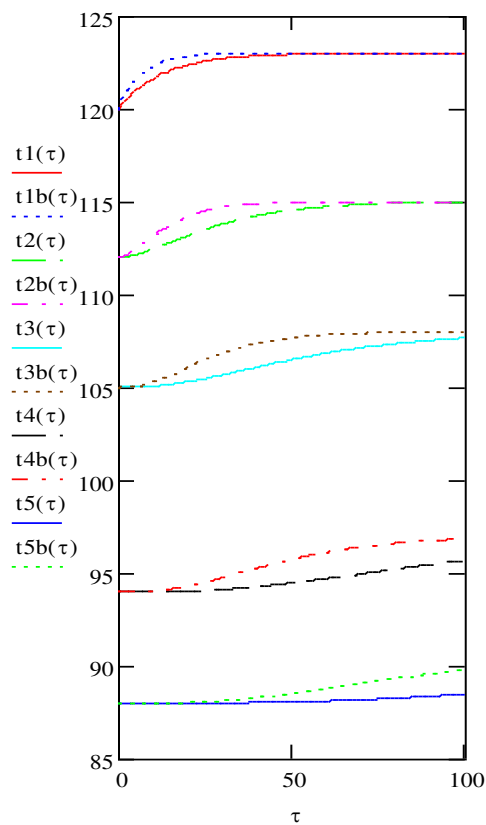
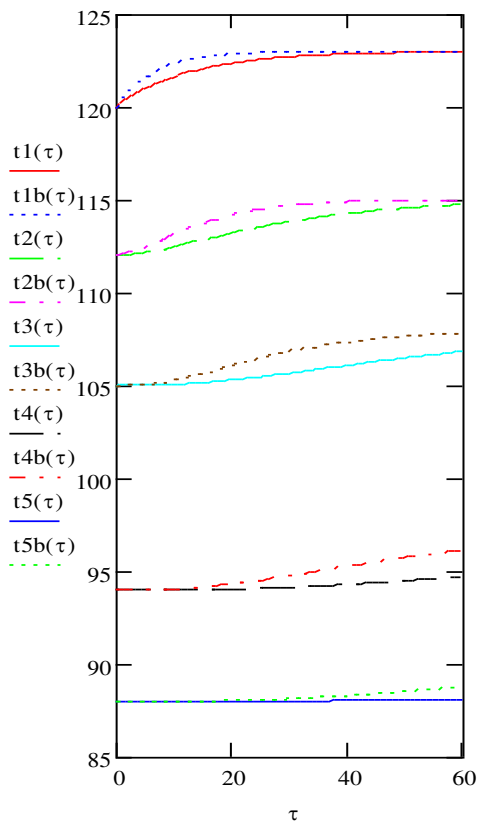
Рис.2.1. Графіки відносної зміни температурного режиму  $t_i^{відн} = \frac{t_i(\tau) - t_i^o}{\delta t}$

по корпусам ВУ:

1 – 1 корпус ВУ; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 5.

Приклад вирівнювання температурного режиму при збільшенні температури нагрівної пари на 1 корпус ВУ на 3 °С наведено на рис.2.2.

Розрахунки виконані для заводу потужністю 3000 тонн з випарними апаратами системи Роберта, поверхнею відповідно 2360, 3000, 2120, 1500, 1000 м<sup>2</sup> і масою рідини в апаратах відповідно 13, 15, 13, 11, 9 тон.



Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



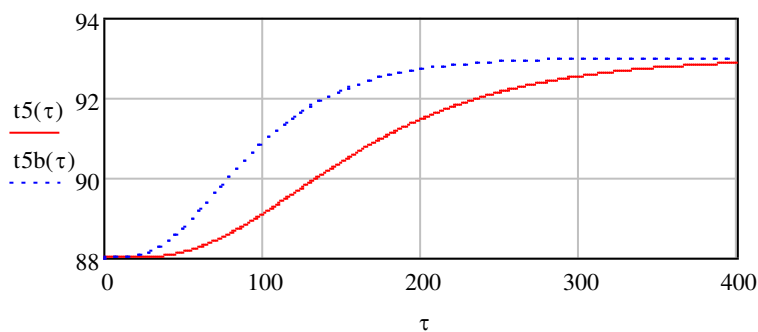


Рис. 2.3. Графіки зміни в часі температури вторинної пари 5 корпусу ВУ при ступеневій зміні температури нагрівної пари на 1 корпус ВУ на 3 °С.

1 – ВУ комплектована апаратами Роберта

2 – ВУ комплектована плівковими випарними апаратами.

## 2.2. ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАПОРУ НА ВИПАРНИХ АПАРАТАХ ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ ПРИ МИТТЄВОМУ ЗРОСТАННІ ВИТРАТИ ПАРИ НА П'ЯТОМУ (ОСТАННЬОМУ) КОРПУСІ ВУ

Розглянемо характер розповсюдження теплової хвилі у зворотному напрямку – коли температурне збурення *отримав 5 корпус ВУ*, але не в результаті прямої зміни температури пари, а за рахунок зміни *виходу пари на конденсатор*. За даного збурення 5 корпус отримує миттєве парове навантаження, а зміна температури сокової пари є реакцією на нього. Аналогічно попередньому аналізу, якщо в певний момент часу змінити (збільшити) парове навантаження 5 корпусу ВУ, що відповідає зміні теплового навантаження на величину  $\Delta Q_5$ , то температурна реакція 5 корпусу на дане збурення (зміна температури вторинної пари) виразиться рівнянням

$$\Delta Q_5 d\tau = -(\sum M_5 C_5) dt + K_5 F_5 [t_{5o} - t_5(\tau)] d\tau, \quad (2.13)$$

де  $(\Sigma M_5 C_5) = M_5 C_5 + M_{m5} C_m$ ;  $M_5, M_{m5}$  – маси розчину в корпусі та маса металу випарного апарату 5 ступеня випаровування, відповідно;  $t_{5o}$  – температура вторинної пари п'ятого корпусу до нанесення збурення;  $t_5(\tau)$  – поточна температура вторинної пари;  $\Delta Q_5 = \frac{\Delta W_5}{r_5}$  – теплова потужність потоку пари з п'ятого корпусу на конденсатор в результаті відкриття засувки. Знак  $(-)$  в першому члені правої частини рівняння означає падіння температури кипіння з часом. Розв'язком (2.13) за умови  $\tau = 0$ ;  $t_5 = t_{5o}$  буде вираз:

$$t_5(\tau) = t_{5o} - \frac{\Delta Q_5}{K_5 F_5} [1 - \exp(-B_5 \tau)] = t_{5o} - \delta t_{5m} [1 - \exp(-B_5 \tau)], \quad (2.14)$$

де  $\delta t_{5m} = \frac{\Delta Q_5}{K_5 F_5}$  – максимальна зміна температурного напору п'ятого корпусу ВУ при  $\tau = \infty$ .

Позначимо  $\delta t_5(\tau) = t_{5o} - t_5(\tau)$ , яка змінюється від 0 до  $\delta t_{5m} = \frac{\Delta Q_5}{K_5 F_5}$  при  $\tau = \infty$ . Тоді розв'язок (2.14) виразимо через зміну температурного напору на 5 корпусі ВУ як

$$\delta t_5(\tau) = \frac{\Delta Q_5}{K_5 F_5} [1 - \exp(-B_5 \tau)] = \delta t_{5m} [1 - \exp(-B_5 \tau)]. \quad (2.15)$$

Оскільки температурний напір по корпусам змінюється, інші випарні апарати ВУ також отримують навантаження, за рахунок навантаження попереднього корпусу ВУ, але не миттєво, а поступово, пропорційно степеню зміни температурного напору на п'ятому корпусі ВУ.

Відповідно, четвертий корпус навантажиться по закону, який визначається навантаженням 5 корпусу ВУ

$$\Delta Q_4(\tau) = \Delta Q_5 \frac{\delta t_5(\tau)}{\delta t_{5m}} = \Delta Q_5 [1 - \exp(-B_5 \tau)] . \quad (2.16)$$

Четвертий корпус корпусу відреагує на дане збурення (2.16) зміною температурного напору, яке визначиться з рівняння (2.17), тобто:

$$\Delta Q_5 [1 - \exp(-B_5 \tau)] d\tau = -(\Sigma M_4 C_4) dt_4(\tau) + K_4 F_4 [t_{4o} - t_4(\tau)] d\tau , \quad (2.17)$$

або, враховуючи, що  $-dt_4(\tau) = d[t_{4o} - t_4(\tau)] = d(\delta t_4(\tau))$ , отримаємо

$$\Delta Q_5 (1 - e^{-B_5 \tau}) d\tau = (\Sigma M_4 C_4) d(\delta t_4(\tau)) + K_4 F_4 \delta t_4(\tau) d\tau . \quad (2.18)$$

Розв'язок (2.18) за умови  $\tau = 0$ ;  $\delta t_4(\tau) = 0$  має вигляд:

$$\delta t_4(\tau) = \delta t_{4m} \left( 1 + \left( \frac{B_4}{B_5 - B_4} \right) \exp(-B_5 \tau) - \left( \frac{B_4}{B_5 - B_4} \right) \exp(-B_4 \tau) \right) , \quad (2.19)$$

де  $\delta t_{4m} = \frac{\Delta Q_4}{K_4 F_4}$  - максимальна зміна температурного напору

четвертого корпусу ВУ при  $\tau = \infty$ .

Відповідно для третього корпусу функція зміни парового навантаження:

$$\Delta Q_3(\tau) = \Delta Q_5 \frac{\delta t_4(\tau)}{\delta t_{4m}} = \Delta Q_5 \left( 1 + \left( \frac{B_4}{B_5 - B_4} \right) \exp(-B_5 \tau) - \left( \frac{B_5}{B_5 - B_4} \right) \exp(-B_4 \tau) \right) . \quad (2.20)$$

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Температурна реакція 3 корпусу на збурення (2.20) виразиться рівнянням

$$\Delta Q_3(\tau)d\tau = K_3 F_3 [\delta t_3(\tau)]d\tau + (\Sigma M_3 C_3)d(\delta t_3(\tau)), \quad (2.21)$$

де  $\delta t_3(\tau) = t_{3o} - t_3(\tau)$ .

Розв'язок (21) за умови  $\tau = 0$ ;  $\delta t_3(\tau) = 0$  має вигляд

$$\delta t_3(\tau) = \delta t_{3m} [1 - S_5 \exp(-B_5\tau) + S_4 \exp(-B_4\tau) - (1 - S_5 + S_4) \exp(-B_3\tau)], \quad (2.22)$$

де  $S_5 = \left( \frac{B_3}{B_5 - B_3} \right) \left( \frac{B_4}{B_5 - B_4} \right)$ ;  $S_4 = \left( \frac{B_3}{B_4 - B_3} \right) \left( \frac{B_5}{B_5 - B_4} \right)$ ;

$\delta t_{3m} = \frac{\Delta Q_5}{K_3 F_3}$  – максимальна зміна температурного напору третього

корпусу ВУ при  $\tau = \infty$ .

Відповідно для другого корпусу ВУ функція зміни теплового навантаження

$$\Delta Q_2(\tau) = \Delta Q_5 \frac{\delta t_3(\tau)}{\delta t_{3m}} = \Delta Q_5 \left[ \frac{1 - S_5 \exp(-B_5\tau) + S_4 \exp(-B_4\tau) - (1 - S_5 + S_4) \exp(-B_3\tau)}{\delta t_{3m}} \right]. \quad (2.23)$$

Температурна реакція 2 корпусу на збурення (23) виразиться

$$\Delta Q_2(\tau)d\tau = K_2 F_2 (\delta t_2(\tau))d\tau + \Sigma M_2 C_2 d(\delta t_2(\tau)), \quad (2.24)$$

де  $\delta t_2(\tau) = t_{2o} - t_2(\tau)$ .

Розв'язок (2.24) за умови  $\tau = 0$ ;  $\delta t_2(\tau) = 0$  має вигляд

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

$$\delta t_2(\tau) = \delta t_{2m} \left[ 1 + \left( \frac{B_2 S_5}{B_5 - B_2} \right) \exp(-B_5 \tau) - \left( \frac{B_2 S_4}{B_4 - B_2} \right) \exp(-B_4 \tau) + \left( \frac{B_2}{B_3 - B_2} \right) (1 - S_5 + S_4) \exp(-B_3 \tau) - S_3 \exp(-B_2 \tau) \right], \quad (2.25)$$

$$\text{де } S_3 = \left[ 1 + \left( \frac{B_2 S_5}{B_5 - B_2} \right) - \left( \frac{B_2 S_4}{B_4 - B_2} \right) + \left( \frac{B_2}{B_3 - B_2} \right) (1 - S_5 + S_4) \right];$$

$\delta t_{2m} = \frac{\Delta Q_5}{K_2 F_2}$  – максимальна зміна температурного напору другого корпусу

ВУ при  $\tau = \infty$ .

Відповідно для першого корпусу ВУ функція зміни навантаження

$$\Delta Q_1(\tau) = \Delta Q_5 \frac{\delta t_2(\tau)}{\delta t_{2m}} = \Delta Q_5 \left[ 1 + \left( \frac{B_2 S_5}{B_5 - B_2} \right) e^{-B_5 \tau} - \left( \frac{B_2 S_4}{B_4 - B_2} \right) e^{-B_4 \tau} + \left( \frac{B_2}{B_3 - B_2} \right) (1 - S_5 + S_4) e^{-B_3 \tau} - S_3 e^{-B_2 \tau} \right]. \quad (2.26)$$

Температурна реакція 1 корпусу на збурення (26) виразиться рівнянням

$$\Delta Q_1(\tau) d\tau = K_1 F_1 (\delta t_1(\tau)) d\tau + \Sigma M_1 C_1 d(\delta t_1(\tau)). \quad (2.27)$$

Розв'язок (2.27) за умови  $\tau = 0$ ;  $\delta t_2(\tau) = 0$  має вигляд:

$$\delta t_1(\tau) = \delta t_{1m} \left[ \frac{1 - S_2 S_5 e^{-B_5 \tau} + S_1 S_4 e^{-B_4 \tau} - S_0 (1 - S_5 + S_4) e^{-B_3 \tau} + \frac{B_1 S_3}{B_2 - B_1} e^{-B_2 \tau}}{1 - S_2 S_5 + S_1 S_4 - S_0 + S_0 S_5 - S_0 S_4 + \frac{B_1 S_3}{B_2 - B_1}} e^{-B_1 \tau} \right], \quad (2.28)$$

$$\text{де} \quad S_0 = \frac{B_1 B_2}{(B_3 - B_2)(B_3 - B_1)}; \quad S_1 = \frac{B_1 B_2}{(B_4 - B_2)(B_4 - B_1)};$$

$$S_2 = \frac{B_1 B_2}{(B_5 - B_2)(B_5 - B_1)};$$

$$\delta t_{1m} = \frac{\Delta Q_5}{K_1 F_1} - \text{максимальна зміна температурного напору першого корпусу}$$

ВУ при  $\tau = \infty$ .

Графічна інтерпретація відносної зміни температурного режиму по корпусам ВУ  $t_i^{\text{відн}} = \frac{t_i^o - t_i(\tau)}{\delta t_m}$  на п'ятикорпусній випарній установці при

миттєвому збільшенні навантаження на 5 корпус ВУ за співвідношеннями (14 – 28) наведена на рис.2.4 Розрахунки виконано для заводу потужністю 3000 тон за добу з випарними апаратами Роберта, поверхнею теплообміну відповідно 2360, 3000, 2120, 1800, 1000 м<sup>2</sup>. За оптимального п'єзометричного рівня маса рідини в апаратах становить відповідно 12, 17, 14, 15, 10 тонн, а маса металу самих випарних апаратів – відповідно 51,4, 71, 48,8, 43,56, 12,16 тонн.

Графіки зміни температурного режиму п'ятикорпусної випарної установки, навантаженої виходом пари на конденсатор, розрахованого за співвідношеннями (2.13 – 2.28) ля заводу потужністю 3000 тон з випарними апаратами системи Роберта, поверхнею теплообміну відповідно 2360, 3000, 2120, 1500, 1000 м<sup>2</sup> і масою рідини в апаратах відповідно 13, 15, 13, 11, 9 тонн наведені на рис.2,4. Графіки відповідають ступеневій зміні витрати пари з п'ятого корпусу на конденсатор у кількості 0,63% до маси буряків, що еквівалентно тепловій потужності в 500 кВт [1].

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

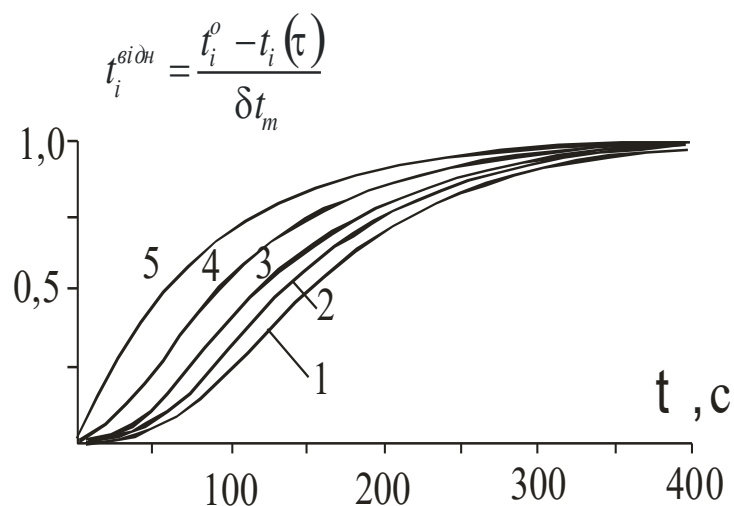


Рис. 2.4. Відносна зміна температурного напору по корпусам при відкритті засувки на конденсатор:  
1 – 1 корпус ВУ; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 5.

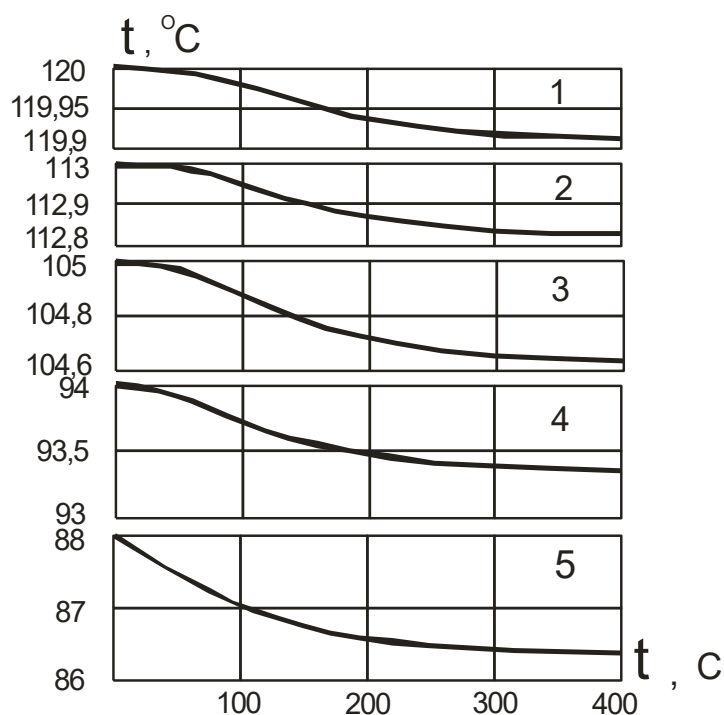


Рис. 2.5. Графіки зміни температур вторинної пари корпусів ВУ при ступеневій зміні витрати пари на конденсатор. Криві 1,2,3,4,5 – відповідають номеру корпусу випарної установки.

Графіки зміни температурного режиму п'ятикорпусної випарної установки, навантаженої виходом пари на конденсатор, розрахованого за співвідношеннями (17 – 21) для заводу потужністю 3000 тонн з випарними апаратами системи Роберта, поверхнею теплообміну відповідно 2360, 3000, 2120, 1500, 1000 м<sup>2</sup> і масою рідини в апаратах відповідно 13, 15, 13, 11, 9 тонн при ступеневій зміні витрати пари з п'ятого корпусу на конденсатор у кількості 0,63% до маси буряків, що еквівалентно тепловій потужності в 500 кВт.

В разі, якщо ВУ укомплектована плівковими випарними апаратами коефіцієнт теплопередачі хвостових корпусів ВУ зростає, а кількість соку в корпусах ВУ суттєво зменшується, і відповідно зменшується їх теплова інерційність.

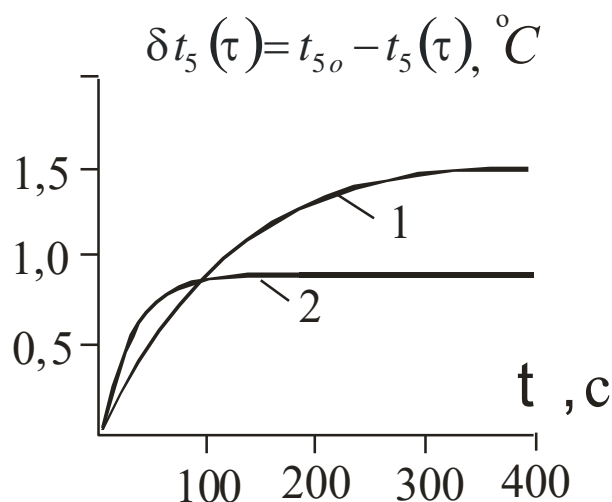


Рис. 2.6. Порівняння зміни температури 5 корпусу ВУ при відкритті засувки на конденсатор:

- 1 – випарний апарат Роберта,  $M = 10$  тонн  $K = 600 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ ;
- 2 – плівковий,  $M = 2,5$  тонни,  $K = 1200 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ .

В разі підняття температури нагрівної пари на 1 корпус без нанесення парового навантаження температурний напір по корпусах змінюється на однакову величину. В разі ж нанесення навантаження на конденсатор то і

кожний корпус отримує додаткове навантаження, і кожний корпус отримує додатковий температурний напір.

Сумарна зміна температури вторинної пари 5 корпусу складатиме суму змін на всіх попередніх корпусах ВУ. Тобто температуру вторинної пари з корпусів ВУ можна визначити як:

$$t_5(\tau) = t_{5o} - \delta t_5(\tau) - \delta t_4(\tau) - \delta t_3(\tau) - \delta t_2(\tau) - \delta t_1(\tau) = t_{5o} - \sum_1^5 \delta t_i, \quad (2.29)$$

$$t_4(\tau) = t_{4o} - \delta t_4(\tau) - \delta t_3(\tau) - \delta t_2(\tau) - \delta t_1(\tau) = t_{4o} - \sum_1^4 \delta t_i(\tau), \quad (2.30)$$

$$t_3(\tau) = t_{3o} - \delta t_3(\tau) - \delta t_2(\tau) - \delta t_1(\tau) = t_{3o} - \sum_1^3 \delta t_i(\tau), \quad (2.31)$$

$$t_2(\tau) = t_{2o} - \delta t_2(\tau) - \delta t_1(\tau) = t_{2o} - \sum_1^2 \delta t_i(\tau), \quad (2.32)$$

$$t_1(\tau) = t_{1o} - \delta t_1(\tau), \quad (2.33)$$

де  $t_{1o}, t_{2o}, t_{3o}, t_{4o}, t_{5o}$  – температури вторинної пари з відповідних корпусів ВУ до початку нанесення збурення.

На рис. 2.6 надані графіки зміни температури для 5 корпусу з врахуванням змін температури на всіх інших корпусах за співвідношеннями (29 – 33) за умови, що маса соку в плівкових корпусах складає 25% від апаратів Роберта, а коефіцієнти теплопередачі на 3, 4, 5 корпусах ВУ для апаратів Роберта –  $K_3 = 1300$ ;  $K_4 = 900$ ;  $K_5 = 600$  Вт/м<sup>2</sup>К, а для плівкових випарних апаратів відповідно –  $K_3 = 1800$ ;  $K_4 = 1500$ ;  $K_5 = 1200$  Вт/м<sup>2</sup>К.

Абсолютні значення зміни температурного напору по корпусах ВУ при відкритті засувки на конденсатор наведені на рис. 2.7.



що викликає необхідність збільшення п'єзометричного рівня і, відповідно, маси рідини в апараті. Тому час релаксації в апаратах Роберта зростає.

В плівкових випарних апаратах вміст рідини не залежить від теплового потоку, тому час релаксації не змінюється [3].

### 2.3. ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАПОРУ НА ВИПАРНИХ АПАРАТАХ ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ ПРИ МИТТЄВОМУ ЗРОСТАННІ ВИТРАТИ ПАРИ НА ТРЕТЬОМУ (середньому) КОРПУСІ ВУ

Якщо відбулася ступенева зміна навантаження на середню частину випарної установки, наприклад, на 3 корпус 5<sup>ти</sup> корпусної випарної установки, то температурна хвиля з певною швидкістю рухається і на головну частину ВУ і на хвостову.

Розглянемо задачу розповсюдження температурної хвилі по корпусам випарної установки при вмиканні в роботу додаткового теплообмінного апарата, наприклад, на парі з **третього корпусу ВУ**.

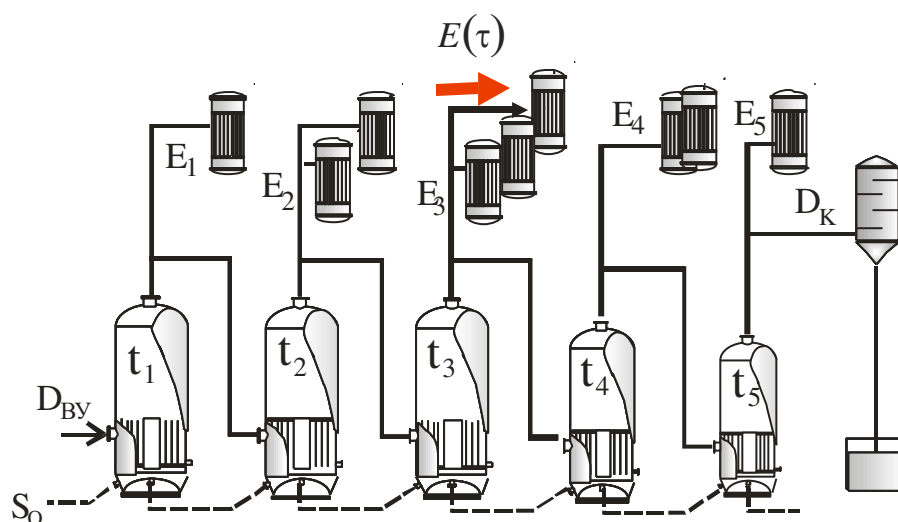


Рис.2.8. Схема зміни парового навантаження на 3 корпус ВУ

Миттєве ступеневе збурення на 3 корпус ВУ дорівнює тепловому навантаженню теплообмінного апарата і дорівнює  $\Delta Q_3 = GC\delta t$ .

Якщо знехтувати маловпливовими факторами – масою конденсату та ізоляції – теплова ємність випарного апарата визначатиметься масою соку та металу апарата.

Залежність зміни температури вторинної пари випарного апарата при миттєвому збільшенні парового навантаження, 3 корпусу, виразиться рівнянням:

$$\Delta Q_3 d\tau = -(\Sigma M_3 C_3) dt + K_3 F_3 [t_{3o} - t_3(\tau)] d\tau, \quad (2.34)$$

де  $(\Sigma M_3 C_3) = M_{3c} C_{3c} + M_{3m} C_{3m}$ ;  $M_{3c}$  – маса соку в 3<sup>му</sup> випарному апараті;  $M_{3m}$  – маса металу 3<sup>го</sup> апарата;  $C_{3c}$  – теплоємність соку в 3 випарному апараті;  $C_{3m}$  – теплоємність металу труб та корпусу випарного апарата.  $t_{3o}$  – температура вторинної пари 3 корпусу до нанесення збурення.  $t_3(\tau)$  – поточна температура вторинної пари 3 корпусу ВУ.

Розв'язання (34) при граничних умовах  $\tau = 0$ ;  $t_3 = t_{3o}$  буде

$$t_3(\tau) = t_{3o} - \frac{\Delta Q_3}{K_3 F_3} (1 - e^{-B_3 \tau}) = t_{3o} - \delta t_{3m} (1 - e^{-B_3 \tau}), \quad (2.35)$$

де  $\delta t_{3m} = \frac{\Delta Q_3}{K_3 F_3}$  – максимальна зміна температурного напору 3<sup>го</sup> корпусу

ВУ при  $\tau = 0$ ,  $B_3 = \frac{K_3 F_3}{\Sigma M_3 C_3}$  – параметр теплової інерційності для 3 корпусу ВУ.

Як видно з (35), швидкість зміни температурного напору обернено пропорційна до параметра інерційності, тобто зростає зі збільшенням коефіцієнта теплопередачі та поверхні, та уповільнюється зі збільшенням маси розчину та металу.

Температурна хвиля, що виникла на 3 корпусі ВУ розповсюджується на хвостову та головну частини ВУ. Апарати хвостової частини ВУ не отримують додаткового навантаження, тому температурний напір змінюється по певному закону відповідно до зміни температури нагрівної пари  $t_3(\tau)$ .

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Для 4 корпусу маємо:

$$Q_4 d\tau = K_4 F_4 [t_3(\tau) - t_4(\tau)] d\tau - (\Sigma M_4 C_4) dt, \quad (2.36)$$

де  $Q_4 = K_4 F_4 (t_{3o} - t_{4o})$  – стаціонарне навантаження 4 корпусу ВУ;  $t_4(\tau)$  – поточна температура вторинної пари 4 корпусу ВУ.  $t_{4o}$  – температура вторинної пари 4 корпусу до нанесення збурення.

Розв'язок (36) з врахуванням (35) при граничних умовах  $\tau = 0$ ;  $t_4 = t_{4o}$

$$t_4(\tau) = t_{4o} - \delta t_{3m} (1 - e^{-B_4 \tau}) + \frac{B_4 \delta t_{3m}}{(B_4 - B_3)} (e^{-B_3 \tau} - e^{-B_4 \tau}), \quad (2.37)$$

де  $B_4 = \frac{K_4 F_4}{\Sigma M_4 C_4}$  – параметр теплової інерційності для 4 корпусу ВУ.

Відповідно, для 5 корпусу

$$Q_5 d\tau = K_5 F_5 [t_4(\tau) - t_5(\tau)] d\tau - (\Sigma M_5 C_5) dt, \quad (2.38)$$

де  $Q_5 = K_5 F_5 (t_{4o} - t_{5o})$  – стаціонарне навантаження 5 корпусу ВУ;  $t_5(\tau)$  – поточна температура вторинної пари 5 корпусу ВУ.  $t_{5o}$  – температура вторинної пари 5 корпусу до нанесення збурення.

Розв'язком (38) з врахуванням (37) при граничних умовах  $\tau = 0$ ;

$t_5 = t_{5o}$  буде:

$$t_5(\tau) = t_{5o} + \frac{B_4 B_5 \delta t_{3m}}{(B_4 - B_3)(B_5 - B_3)} (e^{-B_3 \tau} - e^{-B_5 \tau}) - \left[ \frac{B_3 B_5 \delta t_{3m}}{(B_4 - B_3)(B_5 - B_4)} \right] (e^{-B_4 \tau} - e^{-B_5 \tau}) - \delta t_{3m} (1 - e^{-B_5 \tau}), \quad (2.39)$$

де  $B_5 = \frac{K_5 F_5}{\Sigma M_5 C_5}$  – параметр теплової інерційності для 5 корпусу ВУ.

Графіки температурної реакції випарних апаратів хвостової частини ВУ на ступеневе збурення на 3 корпусі наведено на рис.2.8

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

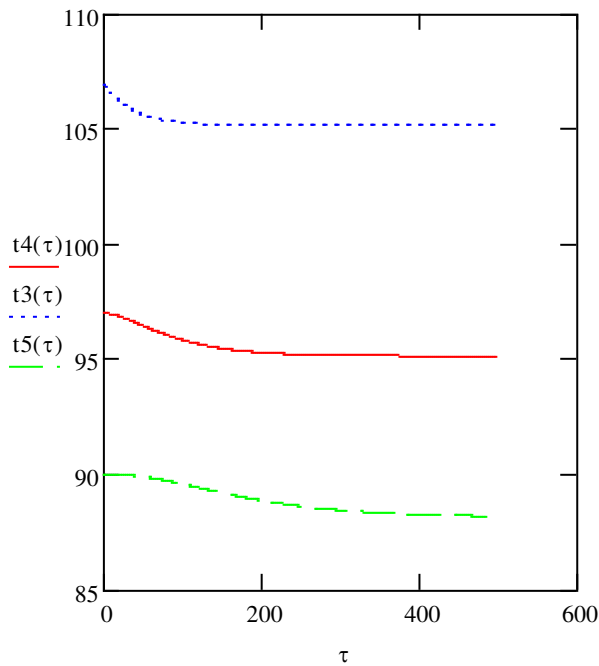


Рис.2.9. Графіки температурної реакції випарних апаратів хвостової частини ВУ на ступеневе збурення на 3 корпусі

Випарні апарати головної частини ВУ, як і 3 корпус, отримують додаткове навантаження, яке змінюється відповідно до степеню зміни температури пари 3 корпусу ВУ. Для 2 корпусу ВУ теплове навантаження з 3 корпусу передається по закону:

$$\Delta Q_2(\tau) = \Delta Q_3 \frac{t_{3o} - t_3(\tau)}{t_{3o} - t_3(\infty)} = \Delta Q_3 (1 - e^{-B_3\tau}), \quad (2.40)$$

Тоді для 2 корпусу маємо:

$$\Delta Q_2(\tau) d\tau = K_2 F_2 [t_{2o} - t_2(\tau)] d\tau - (\Sigma M_2 C_2) dt, \quad (2.41)$$

Розв'язком (41) з врахуванням (40) при граничних умовах  $\tau = 0$ ;

$t_2 = t_{2o}$  буде

$$t_2(\tau) = t_{2o} - \frac{\Delta Q_3}{\Sigma M_3 C_3} \left[ \frac{1}{B_2} (1 - e^{-B_2\tau}) - \frac{1}{B_2 - B_3} (e^{-B_3\tau} - e^{-B_2\tau}) \right], \quad (2.42)$$

де  $B2 = \frac{K_2 F_2}{\Sigma M_2 C_2}$  – параметр теплової інерційності для 2 корпусу ВУ.  $t_{2o}$  –

температура вторинної пари 2 корпусу до нанесення збурення.

Відповідно для 1 корпусу ВУ:

$$\Delta Q_1(\tau) = \Delta Q_3 \frac{t_{2o} - t_2(\tau)}{t_{2o} - t_2(\infty)} = \Delta Q_3 \left[ (1 - e^{-B2\tau}) - \frac{B2}{B2 - B3} (e^{-B3\tau} - e^{-B2\tau}) \right], \quad (2.43)$$

$$\Delta Q_1(\tau) d\tau = K_1 F_1 [t_{1o} - t_1(\tau)] d\tau - (\Sigma M_1 C_1) dt, \quad (2.44)$$

$$t_1(\tau) = t_{1o} - \frac{\Delta Q_3}{\Sigma M_1 C_1} \left[ \frac{1}{B1} (1 - e^{-B1\tau}) + \frac{1}{B1 - B2} (e^{-B1\tau} - e^{-B2\tau}) + \frac{B2}{(B2 - B3)(B1 - B3)} (e^{-B1\tau} - e^{-B3\tau}) + \frac{B2}{(B2 - B3)(B1 - B2)} (e^{-B2\tau} - e^{-B1\tau}) \right], \quad (2.45)$$

де  $B1 = \frac{K_1 F_1}{\Sigma M_1 C_1}$  – параметр теплової інерційності для 1 корпусу ВУ;  $t_{1o}$  –

температура вторинної пари 1 корпусу до нанесення збурення.

Графіки температурної реакції випарних апаратів головної частини ВУ на ступеневе збурення на 3 корпусі наведено на рис.2.9.

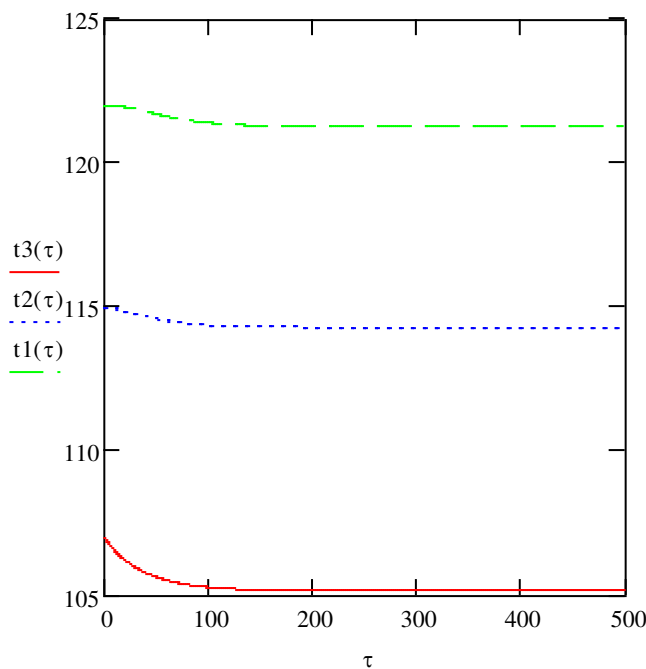


Рис.2.10. Графіки температурної реакції випарних апаратів головної частини ВУ на ступеневе збурення на 3 корпусі

### **3. ФУНКЦІЇ ВІДГУКУ КОНЦЕНТРАЦІЇ СИРОПУ З ВИПАРНИХ АПАРАТІВ ПО НА СТУПЕНЕВУ ЗМІНУ ПАРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

Сучасні системи автоматичного регулювання по-суті допомагають оператору управляти випарною установкою, виходячи з наявної поточної інформації по витратам та концентраціям соку та сиропу до та після ВУ, та її температурному режиму. Концентрація сиропу з ВУ коливається по певному закону в залежності від зміни парового навантаження на довільний корпус ВУ, витрати соку та його концентрації перед ВУ, або від сукупності названих факторів. При цьому, на виході з ВУ має місце повільна зміна концентрації сиропу, значення якої не прогнозоване. В цій ситуації рішення щодо відкриття або закриття засувки виходу пари на конденсатор, або подавання аміачної води в останній корпус ВУ, а також величини зміни тиску ретурної пари на 1 корпус приймає оператор ВУ із інтуїтивних міркувань, покладаючись на власний досвід. Причина у відсутності динамічної моделі ВУ, на базі якої розробляється алгоритм управління.

#### **3.1. ФУНКЦІЇ ВІДГУКУ КОНЦЕНТРАЦІЇ СИРОПУ З ВИПАРНИХ АПАРАТІВ НА СТУПЕНЕВУ ЗМІНУ ПАРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА 1 КОРПУС ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ**

Розглядається випадок, коли на працюючій ВУ миттєво вмикається додатковий теплообмінник, який споживає вторинну пару 1 корпусу ВУ.

Випарними апаратами з багатократною природною циркуляцією системи Роберта обладнана переважна кількість випарних установок цукрових заводів. Режим їх експлуатації полягає в підтримуванні оптимального п'єзометричного рівня за якого при відсутності оголення верхньої трубної дошки має місце достатньо інтенсивна циркуляція розчину в апараті. За даних умов згідно класифікації математичних моделей типових процесів хімічних технологій [1

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Кафаров], процес концентрування розчину в апараті Роберта наближений до моделі ідеального змішування. Згідно цієї моделі концентрація розчину рівномірно розподілена в потоці, а залежність між концентрацією субстанції на вході  $C_{вх}$  та вихіді  $C_{вих}$  з апарата виражається залежністю:

$$M \frac{dC_{вих}(\tau)}{d\tau} = G_{вх} (C_{вх} - C_{вих}(\tau)), \quad (3.1)$$

де  $M$  – маса рідини в апараті,  $G_{вх}$  – масова витрата рідини на апарат.

Чим більша ємність апарата, що характерно для випарних апаратів системи Роберта, тим повільніше вирівнюється концентрація після збурення.

Випарна установка цукрового заводу має переважно 5 ступенів випаровування, кожна з яких отримує навантаження на сторонні споживачі пари – теплообмінні апарати. До того, головні корпуси випарної установки отримують періодичне навантаження на вакуум апарати, режим пароспоживання яких суттєво нерівномірний. За даних умов має місце постійна зміна навантаження на відповідні корпуси випарної установки, що зумовлює нестационарний режим роботи випарних апаратів. Крім того, нерівномірний характер можуть мати витрата та концентрація соку, що поступають на випарну установку [3].

Для оцінки часу релаксації від ступеневих збурень по паровому навантаженню, витраті чи концентрації на вході в апарат потрібно проінтегрувати рівняння (4.1) для кожного випарного апарата, вважаючи вихідні параметри попереднього апарата вхідними для наступного. Для прямоочних випарних установок витримується умова рівності кількості випареної та введеної в апарат пари  $W_i = D_i$ , що дозволяє використовувати спрощений метод розрахунку випарної установки без громіздких повних теплових балансів. Кожний випарний апарат має навантаження  $W_i$  ( $i = 1 \dots 5$ ), а на 1 корпус поступає  $G_o$  розчину з концентрацією  $C_o$ . Концентрація розчину після кожного випарного апарата до моменту виникнення збурення дорівнює:

$$C_1 = \frac{G_o C_o}{G_o - W_1}; C_2 = \frac{G_o C_o}{G_o - W_1 - W_2} \dots C_5 = \frac{G_o C_o}{G_o - W_1 - W_2 - W_3 - W_4 - W_5}.$$

Якщо в момент часу  $\tau$  виникає ступенева зміна парового навантаження  $E_\tau$ , викликаного введенням в експлуатацію підігрівача, або вмиканням в роботу пароструминного компресора, а п'єзометричний рівень в апараті підтримується постійним, то зміна в часі концентрації соку на виході із 1 ВА виразиться рівнянням:

$$M_1 \frac{dC(\tau)}{d\tau} = G_o C_o - (G_o - \Sigma E_1 - E_\tau) C(\tau), \quad (3.2)$$

де  $C(\tau)$  – поточна концентрація розчину на виході із апарата.

$M_1$  – маса рідини у випарному апараті;  $G_o$  – витрата соку на випарний апарат;  $C_o$  – концентрація соку на вході у випарний апарат;  $\Sigma E_1$  – сума стабільних безперервних паровідборів з корпусу випарного апарата.  $E_\tau$  – ступеневе миттєве навантаження, що виникає при вмиканні теплообмінного апарата, рис. 3.1.

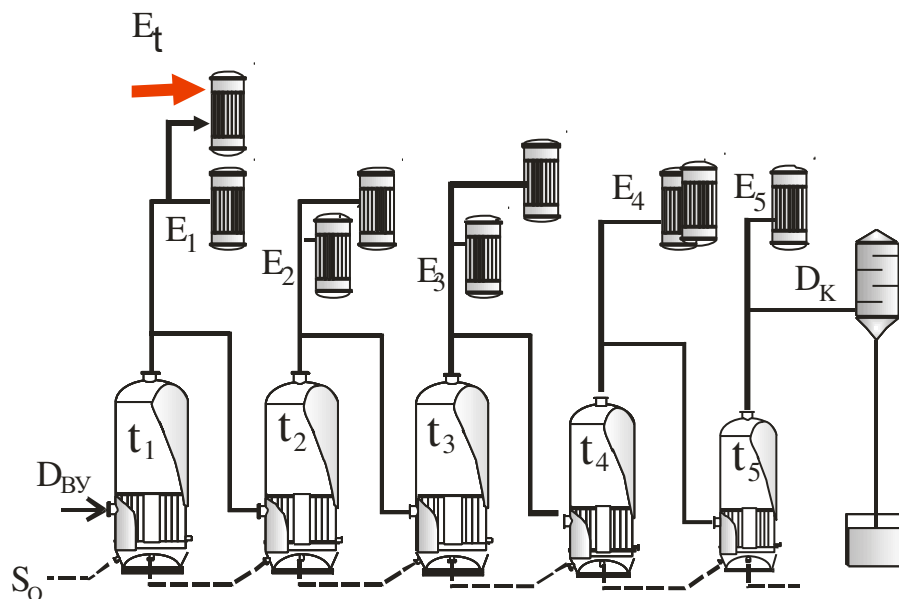


Рис.3.1. Схема паровідборів з ВУ та позиція миттєвого збурення на ВУ

Для випарного апарата з багатократною циркуляцією концентрація розчину в апараті співпадає з концентрацією на виході з нього.

Для спрощення розв'язку позначимо:

$$b = C_o \frac{G_o}{M_1}, \quad m = \frac{G_o - \Sigma E_1}{M_1}, \quad a = \frac{E_\tau}{M_1},$$

Тоді (4.2) запишеться як:

$$\frac{dC(\tau)}{d\tau} = b - (m - a)C(\tau). \quad (3.3)$$

Розв'язок (3.3) за граничних умов

$$\tau = 0; \quad C(\tau) = C_o \frac{G_o}{G_o - \Sigma E_1}$$

Дає функцію залежності в часі концентрації сиропу на виході із 1 ступеня випаровування

$$C(\tau) = \left( \frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1} - \frac{b}{m - a} \right) \exp[-(m - a)\tau] + \frac{b}{m - a}. \quad (3.4)$$

Розв'язок:

Приймаємо  $C(\tau) = u(\tau)v(\tau)$ . Запишемо (3.4):

$u'v + uv' + (m - a)uv - b = 0$  або  $u'v + u[v' + (m - a)v] - b = 0$  (а) Величину  $v$  знаходимо із співвідношення  $[v' + (m - a)v] = 0$ . Звідки  $v = \exp[-(m - a)\tau]$ .

Підставляємо в рівняння (а)  $u'e^{-(m-a)\tau} - b = 0$ . Звідки

$$u = \int b e^{(m-a)\tau} d\tau + A = \frac{b}{m-a} e^{(m-a)\tau} + A.$$

Враховуючи, що  $C(\tau) = u(\tau)v(\tau)$ , отримаємо  $C(\tau) = \left[ \frac{b}{m-a} e^{(m-a)\tau} + A \right] e^{-(m-a)\tau}$ .

з граничних умов знаходимо константу інтегрування  $A = \frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1} - \frac{b}{m-a}$ ,

звідки 
$$C(\tau) = \left( \frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1} - \frac{b}{m-a} \right) \exp[-(m-a)\tau] + \frac{b}{m-a}.$$

Проілюструємо зміну концентрації розчину з 1 корпусу випарної установки в результаті збільшення ступеневого навантаження на перший корпус типової випарної установки цукрового заводу потужністю 2400 т/добу з випарним апаратом Роберта А2-ПВД-1800, поверхня теплообміну якого складає: 1800м<sup>2</sup>. Витрата розчину на перший корпус ВУ становить 130 % до м.бур., або 36 кг/с. з масовою концентрацією сухих речовин 11%. Кількість випареної води 14 кг/с [1].

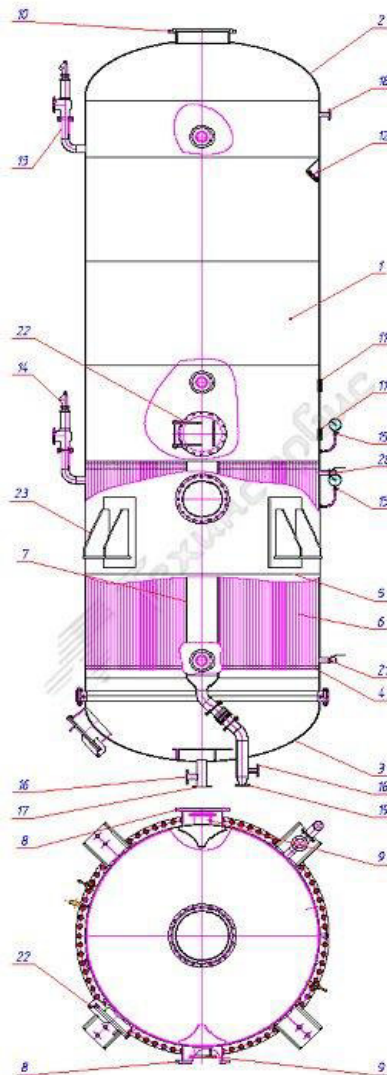


Рис. 3.2. Випарний апарат Роберта

Концентрація соку на виході відповідає концентраціям розчину на виході із випарного апарату  $C_1 = \frac{G_o C_o}{G_o - W_1} = \frac{36 \cdot 11}{36 - 14} = 18\%$ . Маса розчину в апараті з урахуванням густини соків відповідно становлять 10300 кг. В довільний момент часу для збільшення концентрації сиропу вмикається, наприклад, пароструминний компресор потужністю 2 кг/с, який відсмоктує вторинну пару 1 корпусу ВУ. Крива відгуку, що розрахована за співвідношенням (3.4), наведена на рис. 3.3.

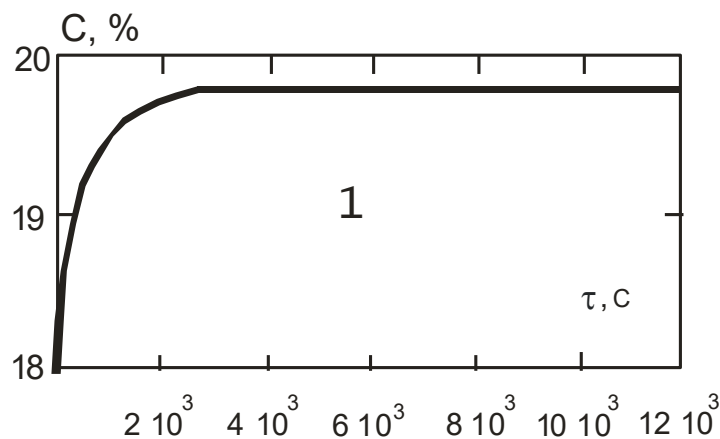


Рис. 3.3. Графік залежності концентрації соку на виході із 1 корпусу ВУ в часі при вмиканні пароструминного компресора

Змоделюємо вихідну концентрацію з 2 корпусу ВУ, на який поступає сік із 1 корпусу, на якому вихідна концентрація змінюється за законом (3.4) (рис.4.3). Позначимо витрату соку, що поступає на 2 корпус  $G_1$ , а змінну в часі концентрацію соку, що поступає на 2 корпус ВУ як  $C_1(\tau)$ ,

Сік у кількості  $G_1 = G_o - \Sigma E_1 - E\tau$  із змінною в часі концентрацією  $C_1(\tau)$ , якій відповідає функція ( 3.4 ), поступає на вхід наступного випарного апарата, з якого безперервно відбираються паровідбори  $\Sigma E_2$ . Маса рідини, що знаходиться в другому випарному апараті –  $M_2$ .

Зміна в часі концентрації соку на виході із другого ВА з багатократною циркуляцією виразиться рівнянням:

$$M_2 \frac{dC(\tau)}{d\tau} = G_1 C_1(\tau) - (G_1 - \Sigma E_2) C(\tau) . \quad (3.5)$$

Підставивши (3.4) в (3.5), отримаємо:

$$\frac{dC(\tau)}{d\tau} = \frac{G_1}{M_2} \left[ \left( \frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1} - \frac{b}{m-a} \right) e^{-(m-a)\tau} + \frac{b}{m-a} \right] - \left( \frac{G_1 - \Sigma E_2}{M_2} \right) C(\tau) . \quad (3.6)$$

Позначимо  $A = \frac{G_1}{M_2} \left( \frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1} - \frac{b}{m-a} \right)$  ;  $B = \frac{b}{m-a} \frac{G_1}{M_2}$  ;  $K = \frac{G_1 - \Sigma E_2}{M_2}$ ,

$$n = m - a .$$

Рівняння (3.6) набуває вигляду

$$\frac{dC(\tau)}{d\tau} = A e^{-n\tau} + B - KC(\tau) . \quad (3.7)$$

Аналогічно попередньому рівнянню розв'язок (3.7) за граничних умов

$$\tau = 0 ; C(\tau) = \frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1 - \Sigma E_2} \text{ дає}$$

$$C(\tau) = \left\{ \frac{A}{K-n} [e^{(K-n)\tau} - 1] + \frac{B}{K} [e^{K\tau} - 1] + \frac{G_o C_o}{G_o - \Sigma E_1 - \Sigma E_2} \right\} \exp(-K\tau) . \quad (3.8)$$

Розв'язок:

Приймаємо  $C(\tau) = u(\tau)v(\tau)$ .

Запишемо (4.7)  $u'v + uv' + Kuv - B = Ae^{-n\tau}$  або

$u'v + u[v' + Kv] = B + Ae^{-n\tau}$  (а) Величину  $v$  знаходимо із співвідношення

$[v' + Kv] = 0$ . Звідси,  $v = \exp[-K\tau]$ . Підставляємо в (а) та інтегруємо:

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

$$u = \int \frac{B}{e^{-K\tau}} d\tau + \int \frac{Ae^{-n\tau}}{e^{-K\tau}} d\tau = \frac{B}{K} e^{K\tau} + A \int e^{\tau(K-n)} d\tau =$$

$$= \frac{B}{K} e^{K\tau} + \frac{A}{(K-n)} e^{\tau(K-n)} + D.$$

Звідси,

$$C(\tau) = \left[ D + \frac{B}{K} e^{K\tau} + \frac{A}{(K-n)} e^{\tau(K-n)} \right] (e^{-K\tau}).$$

Константу інтегрування D знаходимо із граничних умов:

$$\frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1 - \Sigma E_2} = \left( D + \frac{B}{K} + \frac{A}{K-n} \right),$$

$$D = \frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1 - \Sigma E_2} - \frac{B}{K} - \frac{A}{K-n}.$$

Підставивши величину D в розв'язок  $C(\tau)$ , отримаємо залежність в часі концентрації соку на виході із другого випарного апарата (3.8).

Проілюструємо зміну концентрації розчину з 2<sup>го</sup> корпусу випарної установки в результаті збільшення ступеневого навантаження на перший корпус типової випарної установки цукрового заводу потужністю 2400 т/добу з випарним апаратом Роберта А2-ПВД-1800, поверхня теплообміну яких відповідно складає: 1800м<sup>2</sup> як першим корпусом та А2-ПВД-2360 як другим корпусом. Витрата розчину на перший корпус ВУ становить 130 % до м.бур., або 36 кг/с. з масовою концентрацією сухих речовин 11%. Кількість випареної води 14 кг/с.

Концентрація соку на виході із 1<sup>го</sup> корпусу до початку збурення відповідає концентраціям розчину на виході із випарного апарату

$$C_1 = \frac{G_o C_o}{G_o - W_1} = \frac{36 \cdot 11}{36 - 14} = 18\%. \text{ Маса розчину в апараті з врахуванням густини соків}$$

відповідно становлять 10300 кг.

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Кількість випареної води на 1, 2 корпусі відповідно: 14 кг/с, другому 9 кг/с. Концентрація соку на виході із 2 корпусу до початку збурення відповідає концентрації  $C_2 = \frac{G_o C_o}{G_o - W_1 - W_2} = \frac{36 \cdot 11}{36 - 14 - 9} = 30,5\%$ . Маса розчину в 2 апараті з врахуванням густини соку становить 15400 кг.

Крива відгуку, що розрахована за (3.8).

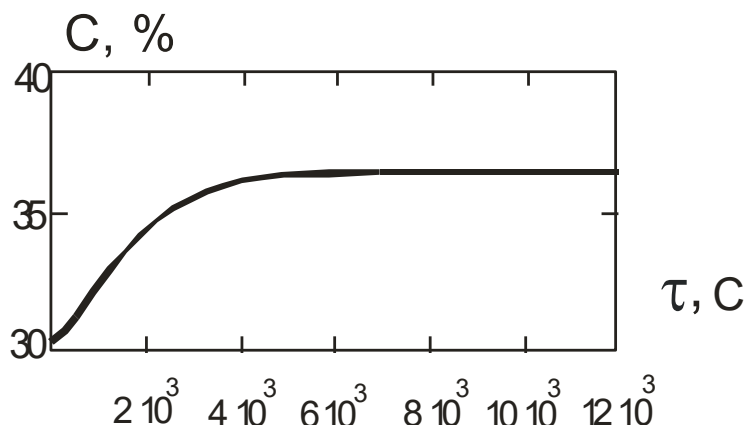


Рис.3.4. Графік залежності концентрації соку на виході із 2 корпусу ВУ в часі при вмиканні пароструминного компресора

Змоделюємо вихідну концентрацію з 3<sup>го</sup> корпусу ВУ, на який поступає сік із 2<sup>го</sup> корпусу, на якому вихідна концентрація змінюється за законом (3.8) (рис.3.4). Позначимо витрату соку, що поступає на 3 корпус  $G_2$ , а змінну в часі концентрацію соку, що поступає на 3 корпус ВУ як  $C_2(\tau)$ .

Сік у кількості  $G_2 = G_o - \Sigma E_1 - E\tau - \Sigma E_2$  із змінною в часі концентрацією  $C_2(\tau)$ , якій відповідає функція (3.8), поступає на вхід наступного, третього випарного апарата, з якого безперервно відбираються паровідбори  $\Sigma E_3$ . Маса рідини, що знаходиться в третьому випарному апараті –  $M_3$ .

Зміна в часі концентрації соку на виході із третього ВА з багатократною циркуляцією виразиться рівнянням:

$$M_3 \frac{dC(\tau)}{d\tau} = G_2 C_2(\tau) - (G_2 - \Sigma E_3) C(\tau) . \quad (3.9)$$

Підставивши концентрацію  $C_2$  із ( 3.8 ) в ( 3.9 ) , отримаємо:

$$\frac{dC(\tau)}{d\tau} = \left\{ \frac{G_2}{M_3} \frac{A}{K-n} [e^{\tau(K-n)} - 1] + \frac{G_2}{M_3} \frac{B}{K} [e^{K\tau} - 1] + \frac{G_2}{M_3} \frac{G_o C_o}{G_o - \Sigma E_1 - \Sigma E_2} \right\} e^{-K\tau} - \frac{G_2 - \Sigma E_3}{M_3} C(\tau) . \quad (3.10)$$

Позначимо  $\frac{G_2}{M_3} \frac{A}{K-n} = A_2$  ;  $\frac{G_2}{M_3} \frac{B}{K} = B_2$  ;  $\frac{G_2}{M_3} \frac{G_o C_o}{G_o - \Sigma E_1 - \Sigma E_2} = R_2$  ;

$$\frac{G_2 - \Sigma E_3}{M_3} = K_2 ,$$

тоді рівняння (3.10) набуває вигляду

$$\frac{dC(\tau)}{d\tau} = \left\{ A_2 [e^{\tau(K-n)} - 1] + B_2 [e^{K\tau} - 1] + R_2 \right\} e^{-K\tau} - K_2 C(\tau) , \quad (3.11)$$

Або, розкривши дужки, отримаємо:

$$\frac{dC(\tau)}{d\tau} + K_2 C(\tau) = B_2 + A_2 e^{-n\tau} + (R_2 - A_2 - B_2) e^{-K\tau} . \quad (3.12)$$

Аналогічно попередньому рівнянню, розв'язок (3.12) за граничних умов

$$\tau = 0 ; C(\tau) = \frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1 - \Sigma E_2 - \Sigma E_3}$$
 дає функцію залежності зміни концентрації

сиропу з 3<sup>го</sup> корпусу ВУ при ступеневій зміні навантаження на 1<sup>ий</sup> корпус ВУ

$$C(\tau) = \left\{ \begin{aligned} & \frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1 - \Sigma E_2 - \Sigma E_3} + \frac{B_2}{K_2} [e^{K_2 \tau} - 1] + \frac{A_2}{K_2 - n} [e^{(K_2 - n)\tau} - 1] + \\ & + \frac{R_2 - A_2 - B_2}{K_2 - K} [e^{(K_2 - K)\tau} - 1] \end{aligned} \right\} \exp(-K_2 \tau). \quad (3.13)$$

Розв'язок:

Приймаємо  $C(\tau) = u(\tau)v(\tau)$ . Запишемо (3.12) як

$$u'v + uv' + K_2 uv = B_2 + A_2 e^{-n\tau} + (R_2 - A_2 - B_2)e^{-K\tau}, \text{ або}$$

$$u'v + u(v' + K_2 v) = B_2 + A_2 e^{-n\tau} + (R_2 - A_2 - B_2)e^{-K\tau}$$

Величину  $v$  знаходимо із співвідношення  $[v' + K_2 v] = 0$ ; Звідки  $v = \exp[-K_2 \tau]$ .

$$u' = B_2 e^{K_2 \tau} + A_2 e^{\tau(K_2 - n)} + (R_2 - A_2 - B_2)e^{\tau(K_2 - K)}$$

інтегрування дає

$$u = \frac{B_2}{K_2} e^{K_2 \tau} + \frac{A_2}{K_2 - n} e^{\tau(K_2 - n)} + \frac{R_2 - A_2 - B_2}{K_2 - K} e^{\tau(K_2 - K)} + D, \text{ звідки}$$

$$C(\tau) = uv = \left( \frac{B_2}{K_2} e^{K_2 \tau} + \frac{A_2}{K_2 - n} e^{\tau(K_2 - n)} + \frac{R_2 - A_2 - B_2}{K_2 - K} e^{\tau(K_2 - K)} + D \right) e^{-K_2 \tau}$$

Константу інтегрування знаходимо з умови:

$$\tau = 0; C(\tau) = \frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1 - \Sigma E_2 - \Sigma E_3},$$

$$D = \frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1 - \Sigma E_2 - \Sigma E_3} - \frac{B_2}{K_2} - \frac{A_2}{K_2 - n} - \frac{R_2 - A_2 - B_2}{K_2 - K}.$$

Звідки розподіл в часі концентрації на виході з третього ВА:

$$C(\tau) = \left\{ \begin{aligned} & \frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1 - \Sigma E_2 - \Sigma E_3} + \frac{B_2}{K_2} [e^{K_2 \tau} - 1] + \frac{A_2}{K_2 - n} [e^{(K_2 - n)\tau} - 1] + \\ & + \frac{R_2 - A_2 - B_2}{K_2 - K} [e^{(K_2 - K)\tau} - 1] \end{aligned} \right\} \exp(-K_2 \tau).$$

Проілюструємо зміну концентрації розчину з 3<sup>го</sup> корпусу випарної установки в результаті збільшення ступеневого навантаження на перший корпус типової випарної установки цукрового заводу потужністю 2400 т/добу з випарним апаратом Роберта А2-ПВД-1800, поверхня теплообміну яких відповідно складає: 1800м<sup>2</sup> як першим корпусом, А2-ПВД-2360 як другим

					00КРМ 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

корпусом та А2-ПВД-1500 як третім корпусом ВУ. Витрата розчину на перший корпус ВУ становить 130 % до м.бур., або 36 кг/с. з масовою концентрацією сухих речовин 11%. Кількість випареної води на 1, 2, 3 корпусі відповідно: 14 кг/с, на другому 9 кг/с, на третьому 2,5 кг/с. Концентрація соку на виході із 3 корпусу до початку збурення відповідає концентрації  $C_3 = \frac{G_o C_o}{G_o - W_1 - W_2 - W_3} = \frac{36 \cdot 11}{36 - 14 - 9 - 2,5} = 37,7\%$ . Маса розчину в 3 апараті з врахуванням густини соку становить 11500 кг.

Крива відгуку, що розрахована за (3.13), має вигляд:

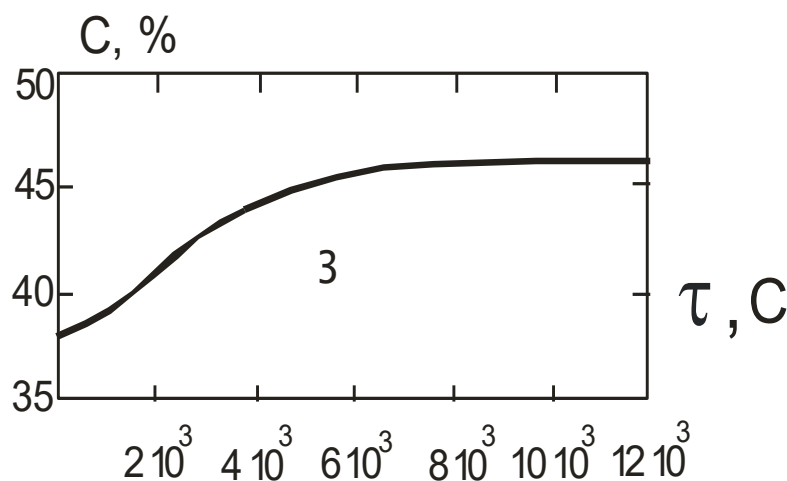


Рис.3.5. Графік залежності концентрації соку на виході із 3 корпусу ВУ в часі при вмиканні пароструминного компресора

Змоделюємо вихідну концентрацію з 4<sup>го</sup> корпусу ВУ, на який поступає сік із 3<sup>го</sup> корпусу, на якому вихідна концентрація змінюється за законом (3.13) (рис.3.5). Позначимо витрату соку, що поступає на 4 корпус  $G_3$ , а змінну в часі концентрацію соку, що поступає на 4 корпус ВУ як  $C_3(\tau)$ .

Сік у кількості  $G_3 = G_o - \Sigma E_1 - E\tau - \Sigma E_2 - \Sigma E_3$  із змінною в часі концентрацією  $C_3(\tau)$ , якій відповідає функція (3.13), поступає на вхід наступного, четвертого випарного апарата, з якого безперервно відбираються

паровідбори  $\Sigma E_4$ . Маса рідини, що знаходиться в четвертому випарному апараті –  $M_4$ .

Зміна в часі концентрації сиропу на виході із четвертого ВА з багатократною циркуляцією розчину виразиться рівнянням

$$M_4 \frac{dC(\tau)}{d\tau} = G_3 C_3(\tau) - (G_3 - \Sigma E_4) C(\tau). \quad (3.14)$$

Підставивши концентрацію  $C_3$  із (3.13) в (3.14), отримаємо:

$$\frac{dC(\tau)}{d\tau} = \frac{G_3}{M_4} \left\{ \frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1 - \Sigma E_2 - \Sigma E_3} + \frac{B_2}{K_2} [e^{K_2 \tau} - 1] + \frac{A_2}{K_2 - n} [e^{(K_2 - n)\tau} - 1] + \frac{R_2 - A_2 - B_2}{K_2 - K} [e^{(K_2 - K)\tau} - 1] \right\} e^{-K_2 \tau} - \frac{G_3 - \Sigma E_4}{M_4} C(\tau). \quad (3.15)$$

Позначимо  $\frac{G_3}{M_4} \frac{A_2}{K_2 - n} = A_3$ ;  $\frac{G_3}{M_4} \frac{B_2}{K_2} = B_3$ ;  $\frac{G_3}{M_4} \frac{G_o C_o}{G_o - \Sigma E_1 - \Sigma E_2 - \Sigma E_3} = R_3$ ;

$$\frac{G_3 - \Sigma E_4}{M_4} = K_3,$$

$$\frac{G_3}{M_4} \frac{R_2 - A_2 - B_2}{K_2 - K} = L, \text{ і підставивши в (3.15), отримаємо}$$

$$\frac{dC(\tau)}{d\tau} + K_3 C(\tau) = R_3 e^{-K_2 \tau} + B_3 - B_3 e^{-K_2 \tau} + A_3 e^{-n\tau} - A_3 e^{-K_2 \tau} + L e^{-K\tau} - L e^{-K_2 \tau}. \quad (3.16)$$

Приймаємо концентрацію як добуток функцій  $C(\tau) = u(\tau)v(\tau)$  Підставимо в (3.16)

$$u' e^{-K_3 \tau} = R_3 e^{-K_2 \tau} + B_3 - B_3 e^{-K_2 \tau} + A_3 e^{-n\tau} - A_3 e^{-K_2 \tau} + L e^{-K\tau} - L e^{-K_2 \tau}.$$

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Аналогічно попереднім розв'язком отримаємо:

$$u = \frac{R_3}{K_3 - K_2} e^{(K_3 - K_2)\tau} + \frac{B_3}{K_3} e^{K_3\tau} - \frac{B_3}{K_3 - K_2} e^{(K_3 - K_2)\tau} + \frac{A_3}{K_3 - n} e^{(K_3 - n)\tau} - \\ - \frac{A_3}{K_3 - K_2} e^{(K_3 - K_2)\tau} + \frac{L}{K_3 - K} e^{(K_3 - K)\tau} - \frac{L}{K_3 - K_2} e^{(K_3 - K_2)\tau} + D$$

Константу інтегрування  $D$  знаходимо з граничних умов:

$$\tau = 0 ; C(\tau) = \frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1 - \Sigma E_2 - \Sigma E_3 - \Sigma E_4}, \text{ тоді}$$

$$D = \frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1 - \Sigma E_2 - \Sigma E_3 - \Sigma E_4} - \frac{R_3}{K_3 - K_2} - \frac{B_3}{K_3} + \\ + \frac{B_3}{K_3 - K_2} - \frac{A_3}{K_3 - n} + \frac{A_3}{K_3 - K_2} - \frac{L}{K_3 - K} + \frac{L}{K_3 - K_2}.$$

Позначивши  $C_4 = \frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1 - \Sigma E_2 - \Sigma E_3 - \Sigma E_4}$  отримаємо залежність концентрації

на виході із 4 випарного апарата при отриманні збурення на 1 корпус ВУ

$$C(\tau) = \left\{ \begin{array}{l} C_4 + \frac{R_3}{K_3 - K_2} [e^{(K_3 - K_2)\tau} - 1] + \frac{B_3}{K_3} [e^{K_3\tau} - 1] - \frac{B_3}{K_3 - K_2} [e^{(K_3 - K_2)\tau} - 1] + \\ + \frac{A_3}{K_3 - n} [e^{(K_3 - n)\tau} - 1] - \frac{A_3}{K_3 - K_2} [e^{(K_3 - K_2)\tau} - 1] + \frac{L}{K_3 - K} [e^{(K_3 - K)\tau} - 1] - \\ - \frac{L}{K_3 - K_2} [e^{(K_3 - K_2)\tau} - 1] \end{array} \right\} \exp(-K_3\tau)$$

Або позначивши  $H = \frac{G_3}{M_4} \left( C_3 - \frac{B_2}{K_2} - \frac{A_2}{K_2 - n} - \frac{R_2 - A_2 - B_2}{K_2 - K} \right)$ , отримаємо

$$C(\tau) = \left\{ \begin{aligned} &C_4 + \frac{H}{K_3 - K_2} \left[ e^{(K_3 - K_2)\tau} - 1 \right] + \frac{B_3}{K_3} \left( e^{K_3\tau} - 1 \right) + \\ &+ \frac{A_3}{K_3 - n} \left[ e^{(K_3 - n)\tau} - 1 \right] + \frac{L}{K_3 - K} \left[ e^{(K_3 - K)\tau} - 1 \right] \end{aligned} \right\} \exp(-K_3\tau) \quad (3.17)$$

Проілюструємо зміну концентрації розчину з 4<sup>го</sup> корпусу випарної установки в результаті збільшення ступеневого навантаження на перший корпус типової випарної установки цукрового заводу потужністю 2400 т/добу з випарними апаратами Роберта А2-ПВД-1800, поверхня теплообміну якого відповідно складає: 1800м<sup>2</sup> як першим корпусом, А2-ПВД-2360 як другим корпусом та А2-ПВД-1500 як третім корпусом ВУ та А2-ПВД-1180 як четвертим корпусом ВУ. Витрата розчину на перший корпус ВУ становить 130 % до м.бур., або 36 кг/с. з масовою концентрацією сухих речовин 11%.

Кількість випареної води на 1, 2, 3, 4 корпусі відповідно: 14 кг/с, на другому 9 кг/с, на третьому 2,5 кг/с та 2 кг/с. Концентрація соку на виході із 3 корпусу до початку збурення відповідає концентрації

$$C_3 = \frac{G_o C_o}{G_o - W_1 - W_2 - W_3} = \frac{36 \cdot 11}{36 - 14 - 9 - 2,5 - 2} = 46,6\% .$$

Маса розчину в 4 апараті з

врахуванням густини соку становить 12000 кг.

Крива відгуку, що розрахована за (3.17)

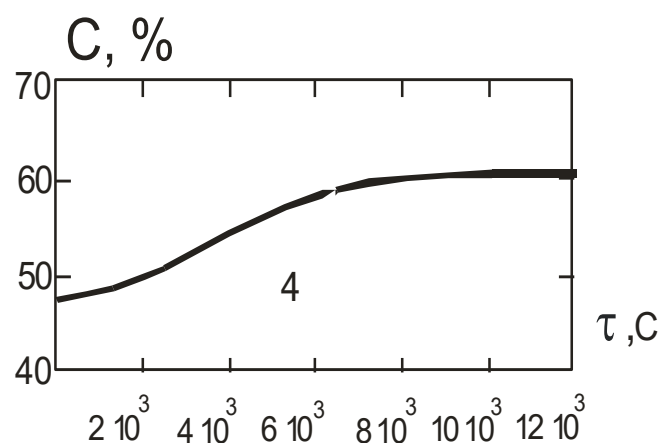


Рис.3.6. Графік залежності концентрації соку на виході із 4 корпусу ВУ в часі при вмиканні пароструминного компресора

Змоделюємо вихідну концентрацію з 5<sup>го</sup> корпусу ВУ, на який поступає сік із 4<sup>го</sup> корпусу, на якому вихідна концентрація змінюється за законом (3.17) (рис.3.6). Позначимо витрату соку, що поступає на 5 корпус  $G_4$ , а змінну в часі концентрацію соку, що поступає на 5 корпус ВУ як  $C_4(\tau)$ .

Сік у кількості  $G_4 = G_o - \Sigma E_1 - E\tau - \Sigma E_2 - \Sigma E_3 - \Sigma E_4$  із змінною в часі концентрацією  $C_4(\tau)$ , якій відповідає функція (3.17), поступає на вхід наступного, п'ятого випарного апарата, з якого безперервно відбираються паровідбори  $\Sigma E_5$ . Маса рідини, що знаходиться в п'ятому ВА –  $M_5$ .

Зміна в часі концентрації соку на виході із четвертого ВА з багатократною циркуляцією виразиться рівнянням:

$$M_5 \frac{dC(\tau)}{d\tau} = G_4 C_4(\tau) - (G_4 - \Sigma E_5) C(\tau) . \quad (3.18)$$

Підставивши концентрацію  $C_4$  із (3.17) в (3.18), отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{dC(\tau)}{d\tau} = & \frac{G_4}{M_5} C_4 e^{-K_3\tau} + \frac{G_4}{M_5} \frac{H}{K_3 - K_2} e^{-K_2\tau} - \frac{G_4}{M_5} \frac{H}{K_3 - K_2} e^{-K_3\tau} + \\ & + \frac{G_4}{M_5} \frac{B_3}{K_3} - \frac{G_4}{M_5} \frac{B_3}{K_3} e^{-K_3\tau} + \frac{G_4}{M_5} \frac{A_3}{K_3 - n} e^{-n\tau} - \frac{G_4}{M_5} \frac{A_3}{K_3 - n} e^{-K_3\tau} + \\ & + \frac{G_4}{M_5} \frac{L}{K_3 - K} e^{-K\tau} - \frac{G_4}{M_5} \frac{L}{K_3 - K} e^{-K_3\tau} - \frac{G_4 - \Sigma E_5}{M_5} C(\tau) \end{aligned}$$

або

$$\frac{dC(\tau)}{d\tau} + K_4 C(\tau) = T e^{-K_3\tau} + H_1 e^{-K_2\tau} + A_4 e^{-n\tau} + L_1 e^{-K\tau} + B_4 , \quad (3.19)$$

де

$$T = \frac{G_4}{M_5} \left( C_4 - \frac{H}{K_3 - K_2} - \frac{B_3}{K_3} - \frac{A_3}{K_3 - n} - \frac{L}{K_3 - K} \right);$$

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

$$H_1 = \frac{G_4}{M_5} \frac{H}{K_3 - K_2}; \quad A_4 = \frac{G_4}{M_5} \frac{A_3}{K_3 - n};$$

$$L_1 = \frac{G_4}{M_5} \frac{L}{K_3 - K}; \quad B_4 = \frac{G_4}{M_5} \frac{B_3}{K_3}; \quad K_4 = \frac{G_4 - \Sigma E_5}{M_5}$$

Приймаємо концентрацію як добуток функцій  $C(\tau) = u(\tau)v(\tau)$  Підставимо в (4.19), тоді:

$$u'e^{-K_4\tau} = Te^{-K_3\tau} + H_1e^{-K_2\tau} + A_4e^{-n\tau} + L_1e^{-K\tau} + B_4$$

звідси,

$$u = \frac{T}{K_4 - K_3} e^{(K_4 - K_3)\tau} + \frac{H_1}{K_4 - K_2} e^{(K_4 - K_2)\tau} + \frac{A_4}{K_4 - n} e^{(K_4 - n)\tau} +$$

$$+ \frac{L_1}{K_4 - K} e^{(K_4 - K)\tau} + \frac{B_4}{K_4} e^{K_4\tau} + D$$

Константу інтегрування  $D$  знаходимо з граничних умов

$$\tau = 0; \quad C(\tau) = \frac{C_o G_o}{G_o - \Sigma E_1 - \Sigma E_2 - \Sigma E_3 - \Sigma E_4 - \Sigma E_5} = C_5, \quad \text{звідки}$$

$$D = C_5 - \frac{T}{K_4 - K_3} - \frac{H_1}{K_4 - K_2} - \frac{A_4}{K_4 - n} - \frac{L_1}{K_4 - K} - \frac{B_4}{K_4}.$$

Залежність концентрації на виході із **5 ВА** при отриманні збурення на 1 корпусі ВУ:

					00КРМ 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

$$\begin{aligned}
C(\tau) = & \left\langle C_5 + \frac{T}{K_4 - K_3} (e^{(K_4 - K_3)\tau} - 1) + \right. \\
& + \frac{H_1}{K_4 - K_2} (e^{(K_4 - K_2)\tau} - 1) + \\
& + \frac{A_4}{K_4 - n} (e^{(K_4 - n)\tau} - 1) + \frac{L_1}{K_4 - K} (e^{(K_4 - K)\tau} - 1) + \\
& \left. + \frac{B_4}{K_4} (e^{K_4\tau} - 1) \right\rangle \exp(-K_4\tau). \quad (3.20)
\end{aligned}$$

Проілюструємо зміну концентрації розчину з 5<sup>го</sup> корпусу випарної установки в результаті збільшення ступеневого навантаження на перший корпус типової випарної установки цукрового заводу потужністю 2400 т/добу з випарними апаратами Роберта А2-ПВД-1800, поверхня теплообміну якого відповідно складає: 1800м<sup>2</sup> як першим корпусом, А2-ПВД-2360 як другим корпусом, А2-ПВД-1500 як третім корпусом ВУ, А2-ПВД-1180 як четвертим корпусом та А2-ПВД-1000 як п'ятим корпусом ВУ. Витрата розчину на перший корпус ВУ становить 130 % до м.бур., або 36 кг/с. з масовою концентрацією сухих речовин 11%.

Кількість випареної води на 1, 2, 3, 4, 5 корпусі відповідно: 14 кг/с, на другому 9 кг/с, на третьому 2,5 кг/с на четвертому 2 кг/. та 0,5 кг/с. на п'ятому. Концентрація соку на виході із 4 корпусу до початку збурення

відповідає концентрації  $C_4 = \frac{G_o C_o}{G_o - W_1 - W_2 - W_3 - W_4} = \frac{36 \cdot 11}{36 - 14 - 9 - 2,5 - 2 - 0,5} = 50\%$ .

Маса розчину в 5 апараті з врахуванням густини соку становить 11700 кг.

Крива відгуку, що розрахована за (3.20)

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

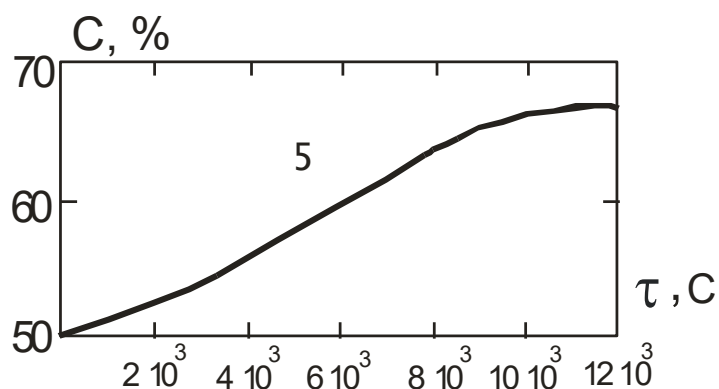


Рис.3.7. Графік залежності концентрації соку на виході із 5 корпусу ВУ в часі при вмиканні пароструминного компресора

Графіки зміни концентрації сиропу по корпусам ВУ при миттєвому збільшенні споживання пари 1 корпусом ВУ наведено на рис.3.8.

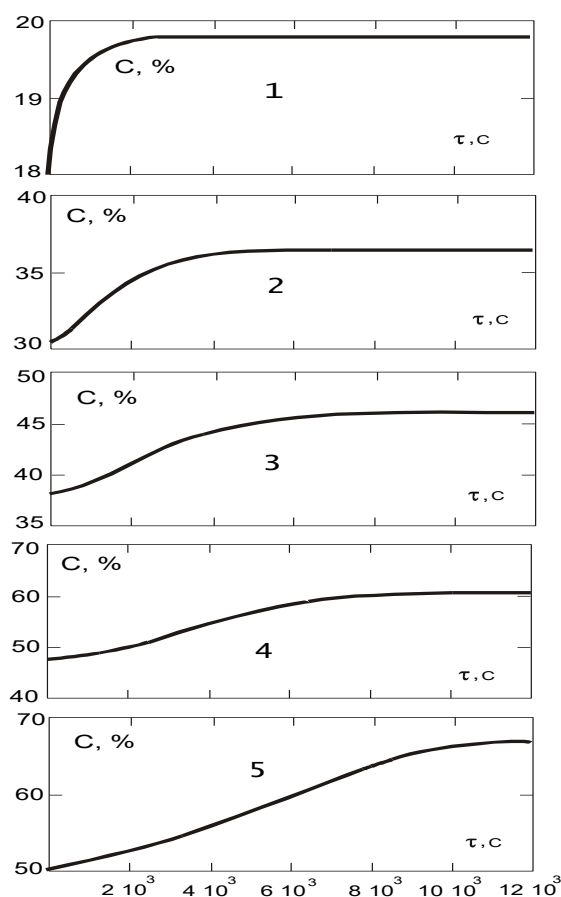


Рис.3.8. Криві зміни концентрації в часі для корпусів випарної установки при ступеневій зміні навантаження на 1 корпус ВУ.

1 – 1 корпус ВУ; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 5.

#### **4. ЗАЛЕЖНІСТЬ ЗМІНИ КОНЦЕНТРАЦІЇ СИРОПУ НА ВИПАРНИХ АПАРАТАХ ЯК ФУНКЦІЇ ВІДГУКУ НА ПАРОВЕ НАВАНТАЖЕННЯ НА 3 КОРПУС ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ З БОКУ ВАКУУМ-АПАРАТІВ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ**

Внаслідок наявності вакуум-апаратів періодичної дії мають місце і періодичні коливання концентрації сиropу відповідно до циклів роботи вакуум апаратів першої кристалізації. Як було показано вище, час проходження температурної хвилі при ступеневому збуренні складає 1-2 хвилини на кожний випарний апарат, в той час, як період вирівнювання концентрації становить 20 – 30 хвилин в залежності від маси рідини у випарному апараті. Тому при зростанні п'єзометричного рівня процес вирівнювання концентрації уповільнюється, оскільки зростає маса рідини в апараті. Швидкість руху концентраційної хвилі по корпусам ВУ при нанесенні збурення буде різною, оскільки випарна установка укомплектована випарними апаратами з різною поверхнею та ємністю [3].

Споживання пари вакуум апаратами в період уварювання утфелю першої кристалізації не є постійним і має специфічний ступеневий характер, що складається із трьох характерних режимів. Результати експериментальних досліджень зміни навантаження вакуум-апаратами 1 кристалізації наведено на рис. 4.1.

					00КРМ 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

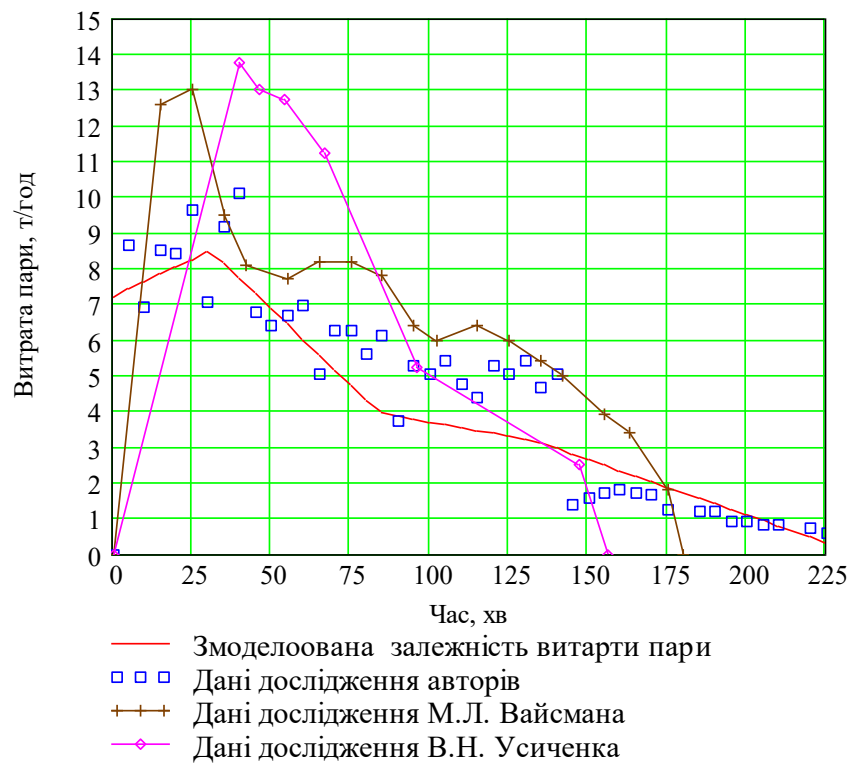


Рис.4.1. Результати експериментальних досліджень зміни навантаження вакуум-апаратами 1 кристалізації з механічною циркуляцією.

Експериментальні дані Бойка В.О.

Експериментальні криві можна з певною точністю апроксимувати лінійними функціями на характерних окремих ділянках кривої уварювання утфелю, рис.4.2.

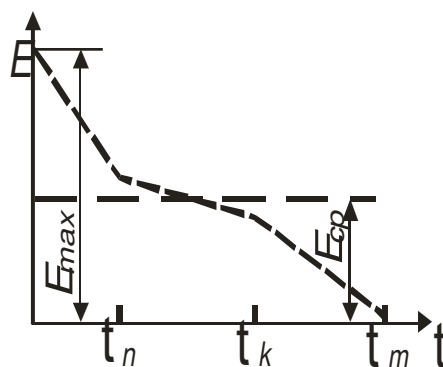


Рис. 4.2. Характерний графік споживання пари вакуум апаратами 1 кристалізації

Математично лінії на рис.4.2 апроксимуються функціями:

$$E(\tau) = E_{max} \left[ 1 - k_1 \frac{\tau}{\tau_m} \right] \quad \text{для} \quad \tau < \tau_n,$$

$$E(\tau) = E_{max} \left[ 1 - k_1 \left( \frac{\tau_n}{\tau_m} \right) - k_2 \left( \frac{\tau - \tau_n}{\tau_m} \right) \right] \quad \text{для} \quad \tau_n \leq \tau < \tau_k, \quad (4.1)$$

$$E(\tau) = E_{max} \left[ 1 - k_1 \left( \frac{\tau_n}{\tau_m} \right) - k_2 \left( \frac{\tau_k - \tau_n}{\tau_m} \right) - k_3 \left( \frac{\tau - \tau_k}{\tau_m} \right) \right] \quad \text{для} \quad \tau_k \leq \tau < \tau_m.$$

У співвідношеннях (4.1)  $E_{max}$  – початкове, в момент вмикання вакуум апарата в роботу, максимальне пароспоживання;  $k_1, k_2, k_3$  – кутові коефіцієнти для прямих ліній графіка характерних режимів.

Межі зон характерних режимів уварювання утфелю  $\tau_n, \tau_k$  та загальний час уварювання  $\tau_m$  змінюються в залежності від якості сиропів, поверхні теплообміну нагрівної камери, та температурного напору. Підбором  $E_{max}, \tau_m, \tau_n, \tau_k, k_1, k_2, k_3$  – можна добитися відповідності апроксимаційної кривої з дослідною для різних умов процесу уварювання утфелю.

Характер розподілу навантаження по корпусам ВУ буде залежати від того, з якого корпусу здійснюються відбори пари на вакуум апарати. Якщо з третього, то в процесі руху температурної хвилі таке саме навантаження отримує і 2, і 1 корпуси. Зі зміною температурного напору змінюється і навантаження випарних апаратів і, як наслідок, концентрація по корпусам ВУ, в результаті накладання концентраційних хвиль під час руху розчину від корпусу до корпусу ВУ.

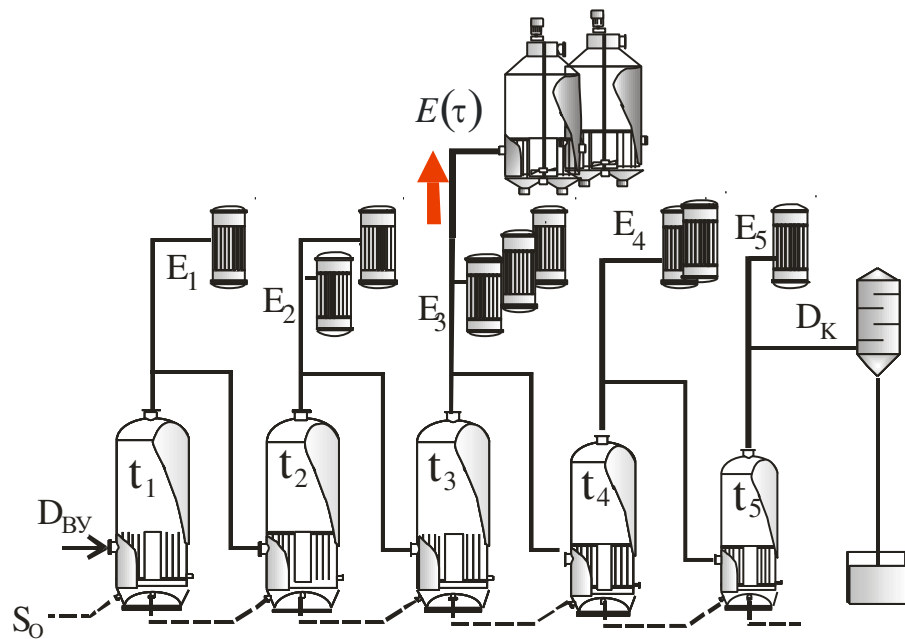


Рис.4.3. Вакуум апарати в схемі випарної установки

Оскільки, випарний апарат з багатократною циркуляцією по своїм характеристикам наближений до реактора ідеального змішування, концентрація розчину в об'ємі випарного апарата практично співпадає з концентрацією розчину на виході із апарата. За даних умов залежність вихідної концентрації сиропу для довільного корпусу 5<sup>ти</sup> корпусної випарної установки  $C_i(\tau)$  за умови споживання вакуум апаратами вторинної пари з корпусу випарної установки виразиться системою рівнянь:

$$M_1 \frac{dC_1(\tau)}{d\tau} = G_o C_o - (G_o - W_1 - E(\tau)) C_1(\tau); \quad (4.2)$$

$$M_2 \frac{dC_2(\tau)}{d\tau} = (G_o - W_1 - E(\tau)) C_1(\tau) - (G_o - W_1 - W_2 - 2E(\tau)) C_2(\tau);$$

$$M_3 \frac{dC_3(\tau)}{d\tau} = (G_o - W_1 - W_2 - 2E(\tau)) C_2(\tau) - (G_o - W_1 - W_2 - W_3 - 3E(\tau)) C_3(\tau);$$

$$M_4 \frac{dC_4(\tau)}{d\tau} = (G_o - W_1 - W_2 - W_3 - 3E(\tau)) C_3(\tau) - (G_o - W_1 - W_2 - W_3 - W_4 - 3E(\tau)) C_4(\tau);$$

$$M_5 \frac{dC_5(\tau)}{d\tau} = (G_o - W_1 - W_2 - W_3 - W_4 - 3E(\tau)) C_4(\tau) - (G_o - W_1 - W_2 - W_3 - W_4 - W_5 - 3E(\tau)) C_5(\tau)$$

						00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			64

де  $M_i$  – маса розчину в  $i^{\text{ому}}$  корпусі ВУ;  $G_o$  – витрата соку на ВУ;  $C_o$  – концентрація соку, що поступає на головний корпус ВУ;  $W_i$  – випарена волога на  $i^{\text{ому}}$  корпусі випарної установки, без врахування навантаження на вакуум апарати 1 кристалізації.  $E(\tau)$  – парове навантаження на ВУ з боку вакуум апаратів 1 кристалізації, (співвідношення (4.1)).

Систему рівнянь (4.2) про інтегруємо з використанням степеневих рядів для кожної стадії уварювання утфелю, відповідно.

Для 1 корпусу ВУ концентрація соку на виході  $C_1(\tau)$  для відповідних трьох періодів запишеться як

$$C_1(\tau) = a_o + a_1\tau + a_2\tau^2 + \dots + a_n\tau^n, \quad \text{для періоду } \tau \leq \tau_n, \quad \tau \leq \tau_n \quad (4.3)$$

$$C_1(\tau) = A_o + A_1(\tau - \tau_n) + A_2(\tau - \tau_n)^2 + \dots + A_n(\tau - \tau_n)^n, \quad \text{для періоду } \tau_n \leq \tau \leq \tau_k,$$

$$C_1(\tau) = \alpha_o + \alpha_1(\tau - \tau_k) + \alpha_2(\tau - \tau_k)^2 + \dots + \alpha_n(\tau - \tau_k)^n, \quad \text{для періоду } \tau_k \leq \tau \leq \tau_m.$$

Початкові умови:

$$C_1(0) = C_o \frac{G_o}{G_o - W_1}, \quad C_1(\tau_n) = a_o + \sum_1^i a_i(\tau_n)^i, \quad C_1(\tau_k) = A_o + \sum_1^i A_i(\tau_k - \tau_n)^i.$$

Підставивши (4.3) в (4.2), та порівнявши коефіцієнти при однакових степенях  $\tau$ ,  $(\tau - \tau_n)$  та  $(\tau - \tau_k)$ , отримаємо залежність вихідної концентрації соку із 1 корпусу ВУ у формі (4.3). Коефіцієнти ряду набувають вигляду:

$$a_o = C_o \frac{G_o}{G_o - W_1}; \quad a_1 = b_{11} - a_o m_{11}, \quad a_2 = -\frac{K_{11}}{2} a_o - \frac{m_{11}}{2} a_1, \quad a_n = -\frac{K_{11}}{n} a_{n-2} - \frac{m_{11}}{n} a_{n-1},$$

$$\text{де } b_{11} = G_o \frac{C_o}{M_1}, \quad m_{11} = \frac{G_o - W_1 - E_{\max}}{M_1}, \quad K_{11} = \frac{E_{\max} k_1}{M_1 \tau_m}.$$

$$A_o = a_o + \sum_1^n a_i(\tau_n)^i, \quad A_1 = b_{12} - A_o m_{12}, \quad A_2 = -\frac{K_{12}}{2} A_o - \frac{m_{12}}{2} A_1,$$

$$A_3 = -\frac{K_{12}}{3} A_1 - \frac{m_{12}}{3} A_2, \quad A_n = -\frac{K_{12}}{n} A_{n-2} - \frac{m_{12}}{n} A_{n-1},$$

$$\text{де } b_{12} = G_o \frac{C_o}{M_1}, \quad m_{12} = \frac{G_o - W_1 - E_{max} + k_1 \left( \frac{\tau_n}{\tau_m} \right) E_{max}}{M_1}, \quad K_{12} = \frac{E_{max} k_2}{M_1 \tau_m}.$$

$$\alpha_o = A_o + \sum_1^n A_i (\tau_k - \tau_n)^i, \quad \alpha_1 = b_{13} - \alpha_o m_{13}, \quad \alpha_2 = -\frac{K_{13}}{2} \alpha_o - \frac{m_{13}}{2} \alpha_1,$$

$$\alpha_3 = -\frac{K_{13}}{3} \alpha_1 - \frac{m_{13}}{3} \alpha_2, \quad \alpha_n = -\frac{K_{13}}{n} \alpha_{n-2} - \frac{m_{13}}{n} \alpha_{n-1},$$

$$\text{де } b_{13} = G_o \frac{C_o}{M_1}, \quad m_{13} = \frac{G_o - W_1 - E_{max} + k_1 \left( \frac{\tau_n}{\tau_m} \right) E_{max} + k_2 \left( \frac{\tau_k - \tau_n}{\tau_m} \right) E_{max}}{M_1}, \quad K_{13} = \frac{E_{max} k_3}{M_1 \tau_m}.$$

Перший індекс відповідає номеру корпусу ВУ, другий – періоду уварювання утфелю відповідно до графіка на рис.4.2.

Аналогічно отримані залежності для концентрації сиропу на виході із наступних корпусів ВУ. Для п'ятикорпусної ВУ в перший період ( $\tau \leq \tau_n$ ) залежності вихідних концентрацій  $C_2(\tau)$ ,  $C_3(\tau)$ ,  $C_4(\tau)$ ,  $C_5(\tau)$  набувають вигляду:

Для 2 корпусу ВУ концентрація соку на виході  $C_2(\tau)$  для відповідних трьох періодів запишеться як:

$$C_2(\tau) = w_o + w_1 \tau + w_2 \tau^2 + \dots + w_n \tau^n, \quad (4.4)$$

$$w_o = C_o \frac{G_o}{G_o - W_1 - W_2}, \quad w_1 = b_{21} a_o - m_{21} w_o, \quad w_2 = b_{21} \frac{a_1}{2} + \frac{K_{21}}{2} (a_o - 2w_o) - m_{21} \frac{w_1}{2},$$

$$w_3 = b_{21} \frac{a_2}{3} + \frac{K_{21}}{3} (a_1 - 2w_1) - m_{21} \frac{w_2}{3}, \quad w_n = b_{21} \frac{a_{n-1}}{n} + \frac{K_{21}}{n} (a_{n-2} - 2w_{n-2}) - m_{21} \frac{w_{n-1}}{n},$$

$$\text{де } b_{21} = \frac{G_o - W_1 - E_{max}}{M_2}, \quad m_{21} = \frac{G_o - W_1 - W_2 - 2E_{max}}{M_2}, \quad K_{21} = \frac{E_{max} k_1}{M_2 \tau_m}.$$

Для 3 корпусу ВУ концентрація соку на виході  $C_3(\tau)$  для відповідних трьох періодів запишеться як

$$C_3(\tau) = s_o + s_1\tau + s_2\tau^2 + \dots + s_n\tau^n, \quad (4.5)$$

$$s_o = C_o \frac{G_o}{G_o - W_1 - W_2 - W_3}, \quad s_1 = b_{31}w_o - m_{31}s_o, \quad s_2 = b_{31}\left(\frac{w_1}{2}\right) + K_{31}\left(\frac{2w_o - 3s_o}{2}\right) - m_{31}\left(\frac{s_1}{2}\right),$$

$$s_3 = b_{31}\left(\frac{w_2}{3}\right) + K_{31}\left(\frac{2w_1 - 3s_1}{3}\right) - m_{31}\left(\frac{s_2}{3}\right), \quad s_n = b_{31}\left(\frac{w_{n-1}}{n}\right) + K_{31}\left(\frac{2w_{n-2} - 3s_{n-2}}{n}\right) - m_{31}\left(\frac{s_{n-1}}{n}\right),$$

$$\text{де } b_{31} = \frac{G_o - W_1 - W_2 - 2E_{max}}{M_3}, \quad m_{31} = \frac{G_o - W_1 - W_2 - W_3 - 3E_{max}}{M_3}, \quad K_{31} = \frac{E_{max}k_1}{M_3\tau_m}.$$

Для 4 корпусу ВУ концентрація соку на виході  $C_4(\tau)$  для відповідних трьох періодів запишеться як

$$C_4(\tau) = r_o + r_1\tau + r_2\tau^2 + \dots + r_n\tau^n, \quad (4.6)$$

$$r_o = C_o \frac{G_o}{G_o - W_1 - W_2 - W_3 - W_4}, \quad r_1 = b_{41}s_o - m_{41}r_o, \quad r_2 = b_{41}\left(\frac{s_1}{2}\right) + K_{41}\left(\frac{3s_o - 3r_o}{2}\right) - m_{41}\left(\frac{r_1}{2}\right),$$

$$r_3 = b_{41}\left(\frac{s_2}{3}\right) + K_{41}\left(\frac{3s_1 - 3r_1}{3}\right) - m_{41}\left(\frac{r_2}{3}\right), \quad r_n = b_{41}\left(\frac{s_{n-1}}{n}\right) + K_{41}\left(\frac{3s_{n-2} - 3r_{n-2}}{n}\right) - m_{41}\left(\frac{r_{n-1}}{n}\right),$$

$$\text{де } b_{41} = \frac{G_o - W_1 - W_2 - W_3 - 3E_{max}}{M_4}, \quad m_{41} = \frac{G_o - W_1 - W_2 - W_3 - W_4 - 3E_{max}}{M_4},$$

$$K_{41} = \frac{E_{max}k_1}{M_4\tau_m}.$$

Для 5 корпусу ВУ концентрація соку на виході  $C_5(\tau)$  для відповідних трьох періодів запишеться як

$$C_5(\tau) = p_o + p_1\tau + p_2\tau^2 + \dots + p_n\tau^n, \quad (4.7)$$

$$p_o = C_o \frac{G_o}{G_o - W_1 - W_2 - W_3 - W_4 - W_5}, \quad p_1 = b_{51}r_o - m_{51}p_o;$$

$$p_2 = b_{51}\left(\frac{r_1}{2}\right) + K_{51}\left(\frac{3r_o - 3p_o}{2}\right) - m_{51}\left(\frac{p_1}{2}\right),$$

$$p_3 = b_{51}\left(\frac{r_2}{3}\right) + K_{51}\left(\frac{3r_1 - 3p_1}{3}\right) - m_{51}\left(\frac{p_2}{3}\right), \quad p_n = b_{51}\left(\frac{r_{n-1}}{n}\right) + K_{51}\left(\frac{3r_{n-2} - 3p_{n-2}}{n}\right) - m_{51}\left(\frac{p_{n-1}}{n}\right),$$

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

$$\text{де } b_{51} = \frac{G_o - W_1 - W_2 - W_3 - W_4 - 3E_{max}}{M_5}, \quad m_{51} = \frac{G_o - W_1 - W_2 - W_3 - W_4 - W_5 - 3E_{max}}{M_5},$$

$$K_{51} = \frac{E_{max} k_1}{M_5 \tau_m}.$$

Графіки зміни концентрації сиропу після корпусів ВУ по (4.3 – 4.7) для повного періоду уварювання утфелю (коефіцієнти рядів для інтервалу  $\tau_n \leq \tau$  не наведені) за умови роботи лише одного вакуум апарата на вторинній парі з корпусу ВУ, зображено на рис. 4.4.

Розрахунки виконано для заводу потужністю 3000 тонн з випарними апаратами Роберта поверхнею відповідно 2360, 3000, 2120, 1500, 1000 м<sup>2</sup> і з масою рідини в апаратах відповідно, 13, 15, 13, 11, 9 тонн, що відповідає оптимальним п'єзометричним рівням сиропу у випарних апаратах

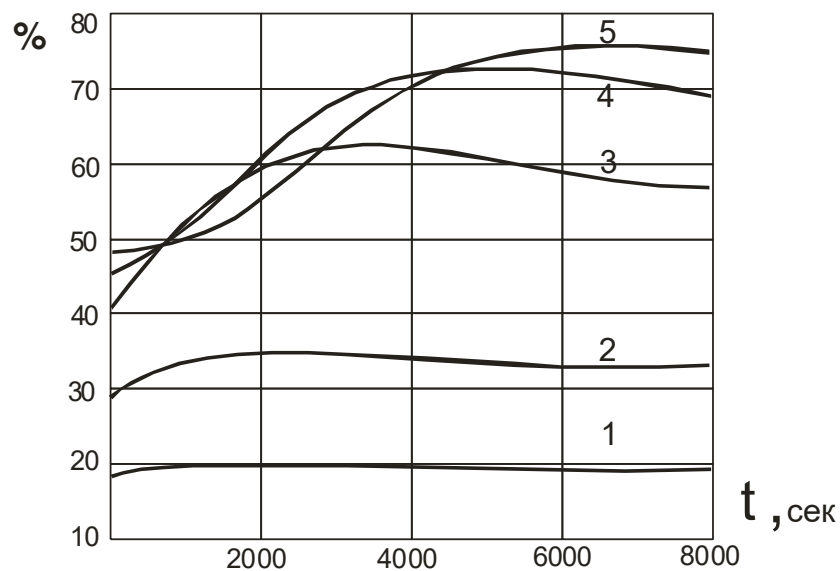


Рис 4.4. Результати розрахунку вихідних концентрацій сиропу по корпусам ВУ по співвідношенням відповідно (4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7) при роботі одного вакуум апарата за 1 цикл

1-  $C_1(\tau)$ ; 2 –  $C_2(\tau)$  ; 3 –  $C_3(\tau)$ , 4 –  $C_4(\tau)$ , 5 –  $C_5(\tau)$ .

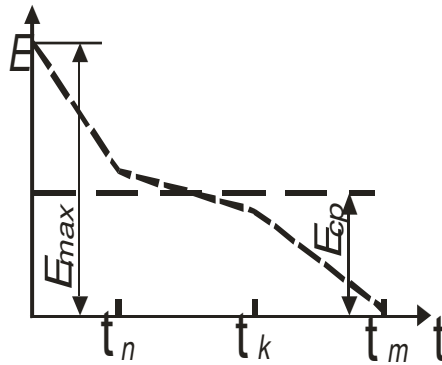


Рис. 4.2. Характерний графік споживання пари вакуум апаратами 1 кристалізації

Максимальне парове навантаження  $E_{max}$ , виходячи з графіків на рис. 4.2, визначається через середнє інтегральне та середнє балансове як:

$$E_{max} = \frac{E_{cp} \tau_m}{\int_0^{\tau_n} E_1(\tau) d\tau + \int_{\tau_n}^{\tau_k} E_2(\tau) d\tau + \int_{\tau_k}^{\tau_m} E_3(\tau) d\tau}, \quad (4.8)$$

де  $E_{cp} = G_{cip} \left(1 - \frac{CP_{cip}}{CP_{ytf}}\right) + G_{kler} \left(1 - \frac{CP_{kler}}{CP_{ytf}}\right) + G_{bn} \left(1 - \frac{CP_{bn}}{CP_{ytf}}\right) + G_{en}$  – балансове

середнє навантаження вакуум апаратів 1 кристалізації;  $E_1(\tau)$ ,  $E_2(\tau)$ ,  $E_3(\tau)$  – функції (4.1) для періодів  $\tau \leq \tau_n$ ;  $\tau_n \leq \tau < \tau_k$ , та  $\tau_k \leq \tau \leq \tau_m$ :

$$E_1(\tau) = E_{max} \left[1 - k_1 \frac{\tau}{\tau_m}\right] \quad \text{ДЛЯ} \quad \tau < \tau_n,$$

$$E_2(\tau) = E_{max} \left[1 - k_1 \left(\frac{\tau_n}{\tau_m}\right) - k_2 \left(\frac{\tau - \tau_n}{\tau_m}\right)\right] \quad \text{ДЛЯ} \quad \tau_n \leq \tau < \tau_k,$$

$$E_3(\tau) = E_{max} \left[1 - k_1 \left(\frac{\tau_n}{\tau_m}\right) - k_2 \left(\frac{\tau_k - \tau_n}{\tau_m}\right) - k_3 \left(\frac{\tau - \tau_k}{\tau_m}\right)\right] \quad \text{ДЛЯ} \quad \tau_k \leq \tau < \tau_m,$$

$G_{cip}$  – витрата сиропу;  $G_{kler}$  – витрата клеровки,  $G_{bn}$  – витрата білої патоки;  $G_{en}$  – водні підкачки;  $CP_{cip}$ ,  $CP_{ytf}$ ,  $CP_{kler}$ ,  $CP_{bn}$  – масові концентрації сиропу, утфелю, клеровки та білої патоки, відповідно.

Як видно з рис. 4.4 концентрації сиропу на 4 та 5 корпусах випарної установки можуть перетинатися в певному часовому діапазоні в результаті зміщення фази концентраційних хвиль внаслідок наявності ємності.

## ВИСНОВКИ

1. Отримано аналітичні співвідношення залежності зміни температури вторинної пари випарного апарата при ступеневій зміні температури нагрівної пари.
2. Отримано аналітичні співвідношення залежності зміни температури вторинної пари довільного корпусу випарної установки при ступеневій зміні температури нагрівної пари головного корпусу ВУ.
3. Отримано аналітичні співвідношення залежності зміни температури вторинної пари довільного корпусу випарної установки при ступеневій зміні парового навантаження 5 корпусу виходом пари на конденсатор.
4. Отримано аналітичні співвідношення залежності зміни температури вторинної пари довільного корпусу випарної установки при ступеневій зміні парового навантаження довільного корпусу ВУ.
5. Отримано аналітичні співвідношення залежності зміни концентрації сиропу по корпусам випарної установки під час ступеневого нанесення парового навантаження на головний корпус випарної установки.
6. Отримано аналітичні співвідношення залежності зміни концентрації сиропу по корпусам випарної установки під час нанесення змінного парового навантаження на 3 корпус ВУ від вакуум-апаратів періодичної дії.
7. Зміна температури вторинної пари довільного ступеня випаровування випарної установки, або температурна інерційність довільного корпусу залежить від параметра  $B_i = \frac{K_i F_i}{M_i C_i + M_{mi} C_m}$ . Час релаксації функції відгуку по температурі прямо пропорційний добутку коефіцієнта теплопередачі на

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

поверхню випарного апарата та обернено пропорційний сумі добутку маси на теплоємність розчину та металоконструкції.

8. Зміна концентрації для довільного ступеня випаровування випарної установки, або концентраційна інерційність довільного корпусу залежить від

параметра  $\frac{G_i - \sum E_i}{M_i}$ . Час релаксації функції відгуку по концентрації прямо

пропорційна витраті сиропу на апарат та обернено пропорційна масі розчину в апараті.

9. Оскільки маса розчину в плівковому апараті в 3 – 5 разів менше ніж в апараті Роберта, то і час релаксації збурень по зміні температури нагрівної пари, парового навантаження або витрати соку менше у порівнянні з апаратами Роберта приблизно в такому ж співвідношенні.

10. Отримані розв'язки з динаміки проходження температурних та концентраційних хвиль по корпусам випарної установки можуть бути використані для прогнозування розвитку тепло-технологічних параметрів по корпусам випарної установки під час нанесення збурень, а також, що найбільш важливо, під час аварійних зупинок та пусків в роботу тепло технологічного обладнання, що споживає пару з випарної установки.

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Петренко В.П. Теплотехнологічні процеси та установки, курс лекцій до вивчення дисципліни для студентів напрямів підготовки 6.050601 "Теплоенергетика" та 6.050604 "Енергомашинобудування". - К.: НУХТ, 2013. - 118 с.
2. Швидкість температурних релаксацій на випарних установках у перехідних режимах / В. П.Петренко, М. О. Масліков, В. О. Бойко, М. М. Мирошник. // Наукові праці НУХТ, том 28, №1. – 2022. – С. 105–116.
3. Лебедев П. Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки. Учебник для студентов технических вузов. Изд. 2-е, перераб. / П. Д. Лебедев. – Москва: Энергия, 1972. – 320 с.

					00KPM 144 ОП ТЕЕТ00.003.221626.2024.ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

## СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ТА ТВОРЧИХ ДОСЯГНЕНЬ

Одуденко Юлія Миколаївна

(прізвище, ім'я, по-батькові)

№ п/п	Найменування праць	Рукописні або друківані	Назва видавництва, журкала (номер, рік) або номер авторського свідоцтва, номер дипломного на винахід	Кількість друкованих аркушів або сторінок разом	Прізвище співавтора праці
1	2	3	4	5	6
1	Особливості та переваги тепlopостачання в будинках з електричним опаленням	Друк	Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, м. Київ, 24–27 квітня 2018 р. У 2 т. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – Т. 1. – 260 с. ISBN 978-966-622-887-4 (Т.1)	1 стор.	Гавриш А. С.
2	Гофровані теплообмінні поверхні кожухопластинчастих теплообмінників	Друк	Матеріали XI науково-технічної конференції інституту енергозбереження та енергоменеджменту енергетика. Екологія. Людина (збірник наукових праць) м. Київ 24 – 25 КВІТНЯ 2019. Енергетика. Екологія. Людина. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 308 с. ISSN 2307-7239	6 стор.	Гавриш А.С.

3	Особливості гофрованих теплообмінних поверхонь кожухопластинчастих теплообмінників	Друк	Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів, м. Київ, 23– 26 квітня 2019 р. У 2 т. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – Т. 1. – 313 с. ISBN 978-966-622-938-3(Т.1)	1 стор.	Гавриш А. С.
4	Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі у разі конденсації пари всередині горизонтальних труб за стратифікованого режиму течії фаз	Друк	Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів, м. Київ, 21– 24 квітня 2020 р.	1 стор	Середа В.В.
5	Зберігання фруктів після збирання в фруктосховищі та при кімнатній температурі	Друк	Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів, м. Київ, 21– 24 квітня 2020 р.	1 стор	Назарова І.О.
6	Особливості гофрованих теплообмінних поверхонь кожухопластинчастих апаратів	Друк	XIX Всеукраїнський конкурс «Молодь енергетиці України 2019: відкритий конкурс молодих вчених та енергетиків»		Гавриш А.С.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ НАУКОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИКИ

Матеріали XVI Міжнародної  
науково-практичної конференції  
аспірантів, магістрантів і студентів  
м. Київ, 24-27 квітня 2018 року,

ТОМ 1



Київ- 2018

УДК 621.43.056:632.15

Студент 2 курсу, гр. ТП-61 Одуденко Ю.М.  
Доц., к.т.н. Гавриш А.С.

### ОСОБЛИВОСТІ ТА ПЕРЕВАГИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В БУДИНКАХ З ЕЛЕКТРИЧНИМ ОПАЛЕННЯМ

В сучасному світі актуальними є проблеми заощадження і економії теплоенергії в житлових будинках. Особливо в тих, що спрямовані на використання саме електричного опалення, як одного з видів теплопостачання.

У випадку, коли прагнуть заощадити на комунальних послугах та оптимізувати умови проживання, застосовують електричне опалення. Є безліч видів даного теплопостачання. Кожний тип відповідає певним вимогам користувача: його фінансовим спроможностям, площі проживання, умовам комфортності. Електричне опалення має доволі вагомі переваги над газовим: економія при монтажу та використанні; безпечне в експлуатації (не створює екстремально аварійних ситуацій); не потребує профілактичного обслуговування тощо. Також можна стверджувати, що всі опалювальні прилади працюють не тільки на обігрів приміщень, але і на те, щоб створити для мешканців будинку комфортні умови. Великим плюсом електричного опалення є його абсолютна екологічність і безпека для здоров'я. Воно рекомендовано для установки в дитячих і лікувальних установах.

Звертаючи увагу на рівень платоспроможності основного населення України, за допомогою досліджень можна визначити найоптимальніший варіант установки й монтажу електричного опалення. Необхідно коректно підібрати і встановити електричне опалення, залежно від особливостей конкретного об'єкту. Споживач потребує довготривалого і якісного теплопостачання. Наприклад, для однокімнатної квартири з утепленням можна порекомендувати установку електрокотла з споживною потужністю 2кВт до існуючого водяного опалення. У будинку з двома і більше кімнатами, електрокотел не покаже ефективності роботи, як у попередньому випадку. Потужності на нагрівання у розглянутому випадку буде потрібно набагато більше. Тому для багатокімнатних квартир краще використовувати тепло акумуляційні обігрівачі з потужністю до 2 кВт (кількість встановлюється в залежності від площі обігріву або числа кімнат). Терморегулюючі пристрої застосовуються для контролювання клімату в будинку і економії енергії. З допомогою електричного опалення в будинку можна створити комфортні умови, при цьому, не переplaчуючи (див. табл. 1).

Таблиця 1 - Порівняльна характеристика різних видів опалення

Назва і Площа Характеристики	Газовий Котел (52 м <sup>2</sup> )	Приватний будинок, площею 100 м <sup>2</sup>		Електричні конвектори (15-17 м <sup>2</sup> )	Електричний котел (40 м <sup>2</sup> )	14 панелі обігрівачі (18-20м <sup>2</sup> )
		Котел на дровах	Котел на вугіллі			
Вартість установки	7142,5 грн	10750 грн	12300 грн	2799 грн	3590 грн	1400 грн
Потужність	-	-	-	1,5 кВт	2 кВт	0,7 кВт
Витрати (міс.)	200	2,8	0,7 т	360 кВт	270 кВт	240 кВт
Плата (міс.)	1380 грн	1680 грн	2100 грн	252 грн	193,5 грн	171 грн

Порівняльний аналіз з використанням даних таблиці дозволяє рекомендувати електричне опалення як оптимальний засіб теплопостачання в житлові будинки.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ НАУКОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИКИ

Матеріали XVII Міжнародної  
науково-практичної конференції  
молодих вчених та студентів  
м. Київ, 23-26 квітня 2019 року,

ТОМ 1



Київ- 2019

**ОСОБЛИВОСТІ ГОФРОВАНИХ ТЕПЛООБМІННИХ ПОВЕРХОНЬ  
КОЖУХОПЛАСТИНЧАСТИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ**

Кожухопластинчасті теплообмінники являють собою установку, яка конструктивно поєднує кожухотрубні та пластинчасті теплообмінні апарати. При цьому комбінуються найкращі переваги обох типів: ефективність пластинчастого та безпечність кожухотрубного. Порівняно з кожухотрубними, кожухопластинчасті апарати мають більш складну форму поверхні теплообміну, що забезпечує турбулентний рух середовищ в щільних каналах. При цьому знижується темп відкладення забруднень на стінках каналів і має місце високий коефіцієнт теплопередачі  $K = 1900-5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Мінімальний перепад температури між теплоносіями може досягати  $1-2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Основним елементом кожухопластинчастого теплообмінника є пакет пластин, що складається з круглих або заокруглених металевих гофр, товщиною  $0,1 - 2 \text{ мм}$ . Щоб визначити залежність теплообмінної поверхні кожухопластинчастого теплообмінника від типу пластин, належить знати довжину  $b$  та крок  $S$  гофру. Формула для визначення коефіцієнта збільшення (зменшення) площі за рахунок гофру має вигляд (1):

$$\Phi = \frac{1}{6} \cdot 1 + \sqrt{1 + \eta^2} + 4 \cdot \sqrt{1 + \eta^2 / 2}, \text{ де } \eta = \pi \cdot b / S. \quad (1)$$

Для розрахунку тепловіддачі в каналах використовується аналогія переносу тепла та імпульсу (2) з урахуванням розвитку площі поверхні за рахунок гофрування згідно з рекомендаціями [1]:

$$Nu = 0,065 \cdot Re^{0,7} \cdot \psi \cdot \frac{\xi}{F_x} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{cm}}\right)^{0,17}. \quad (2)$$

Знаючи площу теплообмінної поверхні, і розрахувавши коефіцієнт теплопередачі, знаходиться відповідне теплове навантаження теплообмінника. Порівняльна характеристика кожухопластинчастого, розбірного пластинчастого та звареного пластинчастого апаратів наведена в Таблиці 1:

Таблиця 1 - Порівняльна характеристика пластинчастих теплообмінних апаратів.

Назва апарата	Розбірні пластинчасті	Зварені пластинчасті	Кожухопластинчасті
Маса, кг	500	300	400
Області застосування	Рідина/рідина, пара/рідина	Рідина/рідина, газ/рідина	Рідина/рідина, газ/рідина, газ/газ
Робоча температура, $^\circ\text{C}$	-30/+200	-150/+400	-196/+400
Порівняльна ефективність	0,75	0,8	1,0
Об'єм установки, $\text{м}^3$	0,4	0,2	0,2

Площа теплообміну пластини залежить від висоти гофр. При постійній висоті  $b$ , площа теплообміну пластини буде тим меншою, чим більше значення параметру гофрування:

$$tg \alpha = \frac{b}{0,5 \cdot S}.$$

Перелік посилань:

1. Юзбашьян А. П. Інтенсифікація теплообмінних процесів в технологіях переробки вуглеводнів з використанням нерозбірних пластинчастих теплообмінників: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.08 - процеси та обладнання хімічної технології / А. П. Юзбашьян – Харків: НТУ «ХП», 2018. – 23 с.



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ГОРЯ СІКОРСЬКОГО”  
Інститут енергозбереження та енергоменеджменту



МАТЕРІАЛИ  
ХІ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ  
ІНСТИТУТУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА  
ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ

**ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА**

(ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ)

24 – 25 КВІТНЯ 2019 року

Київ  
2019

УДК 621.565.954.4:536.24

Ю. М. Одуєнко, студент, А. С. Гавриш, к. т. н., доцент  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"  
Теплоенергетичний факультет, Кафедра теоретичної та промислової теплоенергетики

#### ГОФРОВАНІ ТЕПЛООБМІННІ ПОВЕРХНІ КОЖУХОПЛАСТИНЧАСТИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

*Анотація - Кожухопластинчасті теплообмінники являють собою установку, яка конструктивно поєднує кожухотрубні та пластинчасті теплообмінні апарати. При цьому комбінуються найкращі переваги обох типів: ефективність пластинчастого та безпечність кожухотрубного. Дослідження показують, що гофри мають вагомий вплив на їх конструкцію, зокрема, на площу теплообмінної поверхні та площу теплообміну однієї пластини.*

*Ключові слова – кожухопластинчастий теплообмінник, теплообмінна поверхня, гофровані пластини.*

J. M. Odudenko, student, A.S. Gavrish, Ph.D., Associate Professor  
National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"  
Heat power faculty, Department of Theoretical and Industrial Heat Engineering

#### CORRUGATED HEAT EXCHANGE SURFACES OF CASING LAMELLAR HEAT EXCHANGERS

*Annotation – Casing lamellar heat exchangers represent an installation that constructively combines shell-tube and plate heat exchangers. This combines the best advantages of both types: the effectiveness of the lamellar and the safety of the shell and tube. Studies show that corrugations have a significant impact on their design, in particular, on the area of the heat exchange surface and the heat transfer area of one plate.*

*Key words – casing lamellar heat exchanger, heat exchange surface, corrugated plates.*

#### Вступ

Пластинчастий теплообмінний апарат – це пристрій, в якому здійснюється передача теплоти від гарячого теплоносія до холодного через сталеві, мідні, титанові гофровані пластини, які стягнуті в пакет. Класифікують на: розбірні, зварні, та кожухопластинчасті. Також, окрім пластинчастих, виокремлюють кожухотрубні.

До теплообмінних апаратів належать випарники, конденсатори, повітрянагрівачі, парогенератори тощо. Їх застосовують у різноманітних галузях промисловості: теплоенергетиці, системах опалення та вентиляції тощо.

Переваги кожухопластинчастого теплообмінного апарата відомі: займають менше простору, не потребують особливого догляду (чистки), як це вимагають кожухотрубні, мають більшу ефективність при використанні.

### Аналіз стану питання

Кожухопластинчастий апарат має свої переваги та недоліки. Він поєднує в собі конструктивні особливості кожухотрубного та інтенсивність теплообміну кожухопластинчастого.

Тип сучасного кожухопластинчастого теплообмінного апарата можна удосконалити за рахунок зменшення масогабаритних характеристик та покращення умов теплообміну, як наслідок, збільшення коефіцієнта теплопередачі. На це суттєво впливає конструкція гофрованих пластин.

### Мета роботи

Ознайомити з будовою кожухопластинчастого теплообмінного апарату та його перевагами над іншими видами теплообмінних апаратів, обґрунтувати особливості гофрованих теплообмінних поверхонь.

### Результати досліджень

Кожухопластинчасті апарати (Рис. 1) представляють установку, що поєднує в собі найкращі властивості двох типів теплообмінних апаратів: пластинчастого та кожухотрубного. Наявність кожуха надає конструкції захисту від ударів при експлуатації.

Цей тип теплообмінників має розміщений в кожусі зварений блок пластин, в якому чергуються канали для гарячого і холодного теплоносія. Він може працювати з протитечією та прямотечією, з одноходовим або багатходовим розташуванням потоків (Рис. 2). Одноходові апарати виконуються зі знімною кришкою, забезпечуючи при цьому швидкий огляд внутрішньої поверхні апарату та очистки від нерозчинних відкладень. Багатходові схеми з боку кожуха або пакета пластин застосовуються у суцільнозварних агрегатах в разі малих різниць температур потоків.

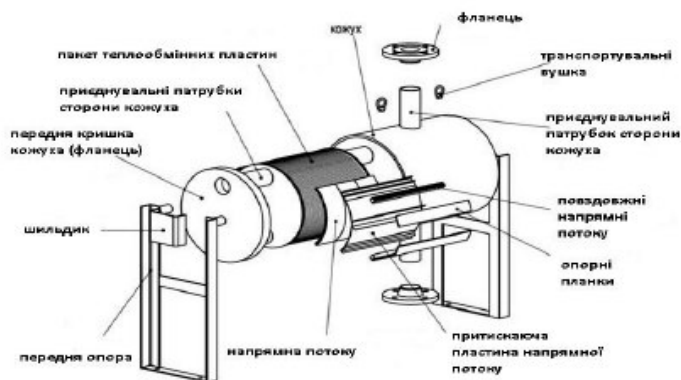


Рис. 1. Принципова схема будови кожухопластинчастого теплообмінного апарата

Порівняно з кожухотрубними, кожухопластинчасті апарати мають більш складну

форму поверхні теплообміну, що забезпечує турбулентний рух середовищ в щільних каналах. При цьому знижується темп відкладення забруднень на стінках каналів і має місце високий коефіцієнт теплопередачі  $K = 1900-5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ . Мінімальний перепад температури між теплоносіями може досягати 1-2  $^\circ\text{С}$ .

Найчастіші області застосування кожухопластинчастих теплообмінників: в системах централізованого тепlopостачання в якості конденсатора і випарника; зустрічаються в комплексах обігріву та охолодження масла; також застосовуються в якості економайзера і рекуператора для утилізації газів; широко поширений у теплоенергетиці, хімічній, нафтовій, металургійній і газовій промисловості. Потрібно зазначити, що корпус кожухопластинчастого теплообмінника при заводському виробництві виконується знімним, що забезпечує доступ до пакету пластин при проведенні ревізії, ремонту та сервісного обслуговування.

Основним елементом кожухопластинчастого теплообмінника є пакет пластин, що складається з круглих або заокруглених металевих гофр, товщиною 0,1 – 2 мм (Рис.3).

Щоб визначити залежність теплообмінної поверхні кожухопластинчастого теплообмінника від типу пластин, належить знати довжину  $b$  та крок  $S$  даного гофру (Рис. 4). Залежно від гофру, застосовуємо різні методики визначення теплообмінної поверхні. Наведемо приклад розрахунку для синусоїдального типу гофрування (Рис. 5). Для відображення коефіцієнт «крутості гофрування», використано величину [1]:

$$tg\alpha = \frac{b}{0,5 \cdot S} \quad (1)$$

Таблиця 1 - Порівняльна характеристика пластинчастих теплообмінних апаратів.

Назва апарата	Розбірні пластинчасті	Зварені пластинчасті	Кожухопластинчасті
Маса, кг	350 - 600	250 - 400	300 - 650
Області застосування	Рідина/рідина, пара/рідина	Рідина/рідина, газ/рідина	Рідина/рідина, газ/рідина, газ/газ
Діапазон робочої температури, $^\circ\text{С}$	-30/+200	-150/+400	-190/+500
Порівняльна ефективність	0,75	0,8	1

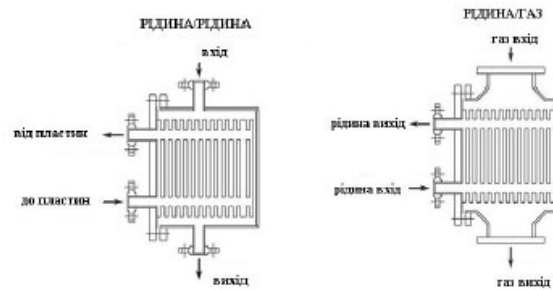


Рис. 2. Принцип роботи кожухопластинчастого апарата в залежності від робочого середовища

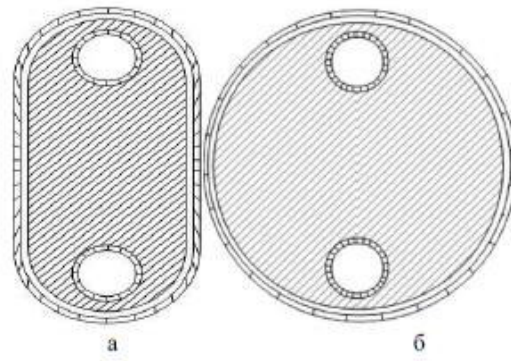


Рис. 3. Типи пластин: закруглений (а) і круглий (б)

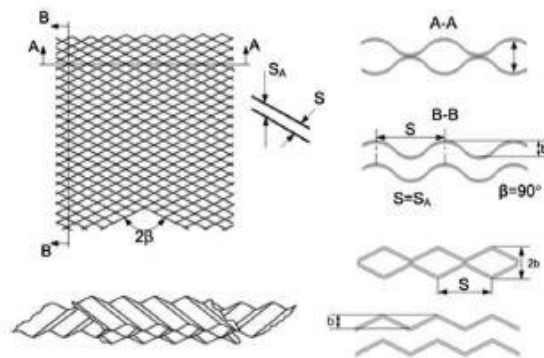


Рис. 4. Зображення різних типів гофрування

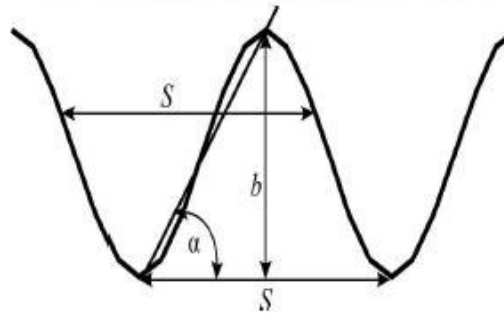


Рис. 5. Синусоїдальний тип гофрування

Формула для визначення коефіцієнта збільшення (зменшення) площі за рахунок гофрування має вигляд (2):

$$\Phi = \frac{1}{6} \cdot (1 + \sqrt{1 + \eta^2} + 4 \cdot \sqrt{1 + \eta^2 / 2}), \text{ де } \eta = \pi \cdot b / S. \quad (2)$$

З цього рівняння визначимо залежність коефіцієнта збільшення площі від параметру «крутості гофрування»: а). якщо  $\text{tg}\alpha = 0,65$ , то  $\eta = 1,021$ , а  $\Phi = 1,227$ ; б). якщо  $\text{tg}\alpha = 0,75$ , то  $\eta = 1,178$ , а  $\Phi = 1,292$  [1]. За приклад кожухопластинчастого теплообмінника візьмемо теплообмінник компанії LHEngineering типу 3В0 з шириною пластин 0,8, 0,7 та 0,6 м з висотою гофри 2,88, 3,36 та 3,84 мм відповідно [2].

Таким чином побудуємо графік залежності площі теплообмінної поверхні гофрованої пластини від висоти гофри (Рис. 6).

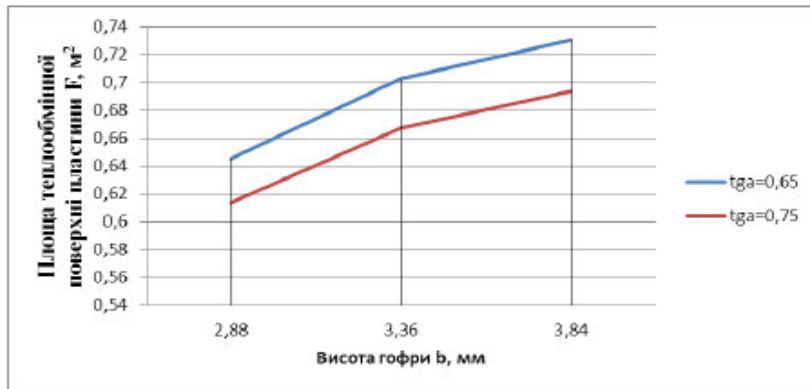


Рис. 6. Залежність поверхні теплообміну пластини від висоти гофри при різних значеннях параметру гофрування

Для розрахунку тепловіддачі в каналах використовується аналогія переносу тепла та імпульсу (3) з урахуванням розвитку площі поверхні за рахунок гофрування згідно з рекомендаціями [1]:

$$Nu = 0,065 \cdot Re^{0,7} \cdot \psi \cdot \frac{\xi}{F_x^{0,7}} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{cm}}\right)^{0,17}, \quad (3)$$

де  $\psi$  – частка втрат тиску за рахунок тертя об стінку в загальному перепаді тиску;  $\xi_S$  – коефіцієнт тертя загального гідравлічного опору, що враховує втрати тиску в каналах;  $F_x$  – відношення фактичної площі до площі теплообміну в плані;  $\mu$  та  $\mu_{cm}$  – динамічна в'язкість при температурі потоку і стінки, Па·с;  $c$  – коефіцієнт, що залежить від природи теплоносія, для діапазону чисел Pr від 0,7 до 15  $c = 0,4$ .

Знаючи площу теплообмінної поверхні, і розрахувавши коефіцієнт теплопередачі, знаходиться відповідне теплове навантаження теплообмінника за формулою (4):

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t, \quad (4)$$

де  $K$  – коефіцієнт теплопередачі,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ ;  $F$  – площа теплообмінної поверхні,  $м^2$ ;  $\Delta t$  – середній температурний напір,  $^{\circ}C$ .

Встановлено, що зі збільшенням  $\text{tg}\alpha$ , інтенсивність теплообміну покращується,

тобто для забезпечення передачі тепла потрібна менша поверхня теплообміну.

Аналізуючи аналогічно залежність площі теплообміну пластини від висоти гофри можна стверджувати, що при однаковій висоті гофри, площа теплообміну пластини буде менше, чим більше значення параметра  $tg\alpha$ . Це дозволяє проектувати теплообмінники з меншою поверхнею пластини, але з великим їх числом [1].

За такого підходу створюється можливість для досягнення ефекту вирівнювання швидкостей в каналах. Як наслідок, може бути досягнуто зменшення площі поверхні теплопередачі апарату. В свою чергу, це призводить до оптимізації показника співвідношення ціна - якість.

Дослідження гофрованих поверхонь є досить складним і потребує дегального вивчення, оскільки на процес експлуатації може впливати конденсація, що в свою чергу, залежить від конструкції самої поверхні.

### Висновки

1. Кожухопластинчасті теплообмінні апарати використовуються у різних галузях промисловості: теплоенергетичній, нафтовій, металургійній тощо. Їх особливістю є ударостійкість та ефективність при експлуатації.

2. Дані теплообмінники виконуються зі знімним кожухом для полегшення очистки апарату при експлуатації. Наприклад, відкладення на стінках пластин можуть утворюватися конденсації пари, що проходить в між трубному просторі.

3. Теплообмінники цього типу можуть використовуватися у великому температурному діапазоні, приблизно  $-190/+500$  °С.

4. Площа теплообміну пластини залежить від висоти гофр. При постійній висоті  $b$ , площа теплообміну пластини буде тим меншою, чим більше значення параметру гофрування:

$$tg\alpha = \frac{b}{0,5 \cdot S}$$

5. При збільшенні висоти гофрування, інтенсивність теплообміну поліпшується. Таким чином, виходячи з ряду формул, можна стверджувати, що коефіцієнт теплопередачі зростає і, для отримання потрібного теплового навантаження, необхідна площа теплопередачі є меншою.

### Список літератури:

1. Юзбашьян А. П. Інтенсифікація теплообмінних процесів в технологіях переробки вуглеводнів з використанням нерозбірних пластинчастих теплообмінників: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.08 - процеси та обладнання хімічної технології / А. П. Юзбашьян – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – 23 с.

2. Кожухопластинчатый теплообменник [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://lengineering.ru>.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ НАУКОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИКИ

Матеріали XVIII Міжнародної  
науково-практичної конференції  
молодих вчених і студентів  
2020 року

ТОМ 2



Київ- 2020

Студент 4 курсу, гр. ТП-61 Одуденко Ю.М.  
Доц., к.т.н. Назарова І.О.

### ЗБЕРІГАННЯ ФРУКТІВ ПІСЛЯ ЗБИРАННЯ В ФРУКТОСХОВИЩІ ТА ПРИ КІМНАТНІЙ ТЕМПЕРАТУРІ

Основним призначенням холодильних машин є вироблення штучного холоду або відведення теплоти від охолоджуваного тіла. Це дозволяє знижувати температуру різних об'єктів та підтримувати більш низьку температуру в порівнянні з температурою навколишнього середовища.

Складовими холодильних камер є спліт системи, моноблоки, комплекти холодильного обладнання, які забезпечують заданий режим зберігання. Комплект холодильного обладнання включає в себе компресорно-конденсаторний агрегат, внутрішнього блоку або випарника, пульта дистанційного керування й інших важливих комплектуючих.

У якості холодоагенту використовується аміак, який не руйнує озоновий шар і не вносить прямого вкладу у збільшення парникового ефекту. Для підтримання температури у фруктосховищі була розроблена система холодопостачання з проміжним холодоносієм в якості якого використано розчин хлористого кальцію.

Температура зберігання, крім впливу світла та кисню, є одним із ключових факторів, що впливають на стабільність властивостей плодів під час зберігання [1]. Подовження терміну зберігання ягідних фруктів часто досягається за рахунок зберігання при низькій температурі або з контрольованою атмосферою, як правило, в атмосфері високої кількості вуглекислого газу. Якість фруктів залежить від дотримання всіх норм при їх зберіганні. Для цього в приміщенні для зберігання повинні підтримуватися в досить вузькому діапазоні значення температур, вологовміст та хімічний склад середовища.

Складні реакції, що відбуваються у плодах у період після збирання, можуть сприяти утворенню сполук з підвищеною антиоксидантною здатністю, навіть у той момент, коли атрибути фруктів (смак, запах, зовнішній вигляд та текстура) вже значно погіршилися.

Основною метою даної роботи був моніторинг зміни біологічних, санітарно-гігієнічних та смакових якостей вишні, а також його товарного вигляду протягом всього періоду зберігання при кімнатній температурі (25 °C) та в холодильнику (4 °C) після збирання. Плоди були отримані від виробників при повній зрілості, а зразки були зібрані та доставлені. Зберігання було припинено, і експеримент закінчився, коли фрукти виявили зорове псування.

Тривалість зберігання вказана в таблиці 1.

Таблиця 1 - Порівняльна характеристика зберігання вишні в холодильній камері та при кімнатній температурі.

Фрукт	Час зберігання (дні)	
	4 °C	25 °C
Вишня	30	17

Отже, результати цього дослідження свідчать про те, що харчова якість фруктів залишається стабільною протягом тривалого терміну зберігання, який у деяких випадках навіть перевищує чотири тижні.

Перелік посилань:

1. Piljac-Zegarac, J., Šamec, D. (2011) Antioxidant stability of small fruits in postharvest storage at room and refrigerator temperatures. Food Research International 44(1): 345–350. doi:10.1016/j.foodres.2010.09.039

**РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕПЛОВІДДАЧІ У РАЗІ КОНДЕНСАЦІЇ ПАРИ  
ВСЕРЕДИНИ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ТРУБ ЗА СТРАТИФІКОВАНОГО РЕЖИМУ  
ТЕЧІЇ ФАЗ**

У сучасних конденсаторах систем кондиціонування повітря, теплових насосів та у випарниках систем термічного опріснення процес конденсації пари здійснюється переважно всередині горизонтальних труб та каналів. Процеси передачі теплоти, що відбуваються у конденсаційних теплообмінних апаратах, мають значний вплив на загальну енергоефективність згаданих систем. В даний час наявні методи та моделі розрахунку коефіцієнтів теплопередачі у разі конденсації пари різних робочих тіл у горизонтальних трубах суттєво відрізняються між собою [1]. Точність розрахунку за різними методами і моделями значно змінюється залежно від режимних параметрів теплообмінних апаратів.

У випадку стратифікованої течії двофазного потоку відсутні чіткі рекомендації щодо використання різних залежностей для розрахунку тепловіддачі. У більшості випадків коефіцієнти тепловіддачі розраховуються за формулою Нуссельта, отриманої для конденсації на зовнішній поверхні горизонтальної труби. Для отримання більш точних даних необхідно враховувати тепловіддачу у струмку конденсату, яка обчислюється за формулами конвективного теплообміну під час турбулентної течії рідини.

В даній роботі проведено порівняння експериментальних значень коефіцієнтів тепловіддачі, отриманих у разі конденсації робочих тіл R22 та R407c у гладкій трубі  $d = 17$  мм із наступними режимними параметрами:  $t_s = 35-40$  °C,  $G = 10-100$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $x = 0,8-0,1$ ,  $q = 5-50$  кВт/м<sup>2</sup> із відомими методами розрахунку із праць [2-6]. Показано, що у струмку конденсату значення експериментальних коефіцієнтів тепловіддачі вище розрахункових більше ніж на 30%. У верхній частині труби, експериментальні значення коефіцієнтів тепловіддачі узгоджуються із достатньою точністю (похибка в межах  $\pm 20\%$ ) з формулою Нуссельта.

## Перелік посилань:

1. Rifert V, Sereda V, Gorin V, Barabash P, Solomakha A (2020) Heat transfer during film condensation inside plain tubes. Review of experimental research. *Heat and Mass Transfer* 56: 691-713.
2. Thome J, El Hajal J, Cavallini A (2003) Condensation in horizontal tubes, part 2: new heat transfer model based on flow regimes. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (18):3365-3387.
3. Shen S, Wang Y, Yuan D (2017) Circumferential distribution of local heat transfer coefficient during steam stratified flow condensation in vacuum horizontal tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 114:816-825.
4. Singh A, Ohadi M, Dessiatoun S (1996) Empirical modeling of stratified-wavy flow condensation heat transfer in smooth horizontal tubes. *ASHRAE Transac* 102 (2):596-603.
5. Dobson M, Chato J (1998) Condensation in smooth horizontal tubes. *Journal of Heat Transfer* 120 (1):193-213.
6. Macdonald M, Garimella S (2016) Hydrocarbon condensation in horizontal smooth tubes: Part II—Heat transfer coefficient and pressure drop modeling. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 93:1248-1261.