

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**

Електротехнічний факультет  
(повне найменування інституту, назва факультету)  
Кафедра «Електричні машини»  
(повна назва кафедри )

**Пояснювальна записка**

до дипломного проекту

бакалавр

(ступінь вищої освіти )

на тему: «Розрахунок трьохкорпусної випарарної установки з природньою циркуляцією розчину для концентрування 2 кг/с водного розчину КОН з початковою концентрацією 10 %»

Виконав: студент IV курсу, групи E-250сп  
Спеціальності 144 «Теплоенергетика»

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

«Промислова і комунальна теплоенергетика»

Анастасія БАРАНОВА

(ім'я та прізвище)

Керівник Юрій КАЮКОВ

(ім'я та прізвище)

Рецензент Олександр ШРАМ

(ім'я та прізвище)

2023

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Національний університет “Запорізька політехніка”**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет «Електротехнічний»

Кафедра «Електричні машини»

Ступінь вищої освіти «бакалавр»

Спеціальність 144 «Теплоенергетика»

(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) «Промислова і комунальна теплоенергетика»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри «Електричні машини»**

\_\_\_\_\_ проф., д.т.н. Дмитро ЯРИМБАШ

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 року

**З А В Д А Н Н Я**

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТА

Баранової Анастасії Володимірівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту «Розрахунок трьохкорпусної випарної установки з природньою циркуляцією розчину для концентрування 2 кг/с водного розчину КОН з початковою концентрацією 10 %»

Керівник проєкту Каюков Юрій Миколайович, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 09.05. 2023р. № 178.

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 01 червня 2023 року.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи): Розчин КОН, витрата розчину 2 кг/с, початкова концентрація 10 %, кінцева концентрація 35 %, висота труб 3,6 м.

Початковий тиск  $P_{нп1} = 0,25$  МПа, тиск у бараметричному конденсатору  $P_{бк} = 0,01$  МПа.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). 1. Аналіз об'єкту проєктування. 2. Розподіл води, що випарюється. 3. Визначення концентрацій розчину, що випарюється 4. Визначення температур кипіння розчинів 5. Визначення теплових навантажень 6. Визначення коефіцієнтів теплопередачі. 7. Розподіл корисній різниці температур.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Трикорпусна прямоточна випарна установка – 2 листа. 2. Схема трьохкорпусної випарної установки, – 1 листа. 3. Графічне визначення питомого теплового навантаження

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Прийняв виконане завдання
Загальний	Каюков Ю.М., доцент		
Технічний	Каюков Ю.М., доцент		
Нормоконтроль	Каюков Ю.М. к.т.н, доцент		

7. Дата видачі завдання 20 квітня 2023 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз об'єкту проектування	20.04.2023-01.05.2023	
2	Розподіл води, що випарюється. Визначення концентрацій розчину, що випарюється. Визначення температур кипіння розчинів	01.05.2023-10.05.2023	
3	Визначення теплових навантажень	10.05.2023-12.05.2023	
4	Визначення коефіцієнтів теплопередачі.	12.05.2023-29.05.2023	
5	Розподіл корисній різниці температур.	29.05.2023-01.06.2023	
6	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки, виконання креслень	01.05.2023-01.06.2023	

Студент \_\_\_\_\_  
( підпис )

Анастасія БАРАНОВА  
(ім'я та прізвище)

Керівник проекту (роботи) \_\_\_\_\_  
( підпис )

Юрій КАЮКОВ  
(ім'я та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Розрахунково - пояснювальна записка дипломного проєкту бакалавра складається з 60 сторінок, містить 2 рисунки, 9 таблиць, 13 джерел посилань.

Мета роботи - розрахунок прямої трьохкорпусної випарної установки з природньою циркуляцією.

Випарюванням називається процес концентрування розчинів нелетких речовин при кипінні і частковому видаленні рідкого розчинника у вигляді пари. При цьому, розчинна нелетка речовина залишається в випарному апараті в концентрованому вигляді.

Нагрівання розчину, який випарюється, відбувається шляхом передачі теплоти через роздільну стінку, яка відокремлює теплоносій від розчину.

Метод дослідження – розрахунково-графічний. Результатами розрахунків є визначення витрати води, що випарюється; концентрацій розчину, що випарюється; температур кипіння розчинів; теплових навантажень; визначення коефіцієнтів теплопередачі; розподілу корисній різниці температур.

**БАРАМЕТРИЧНИЙ КОНДЕНСАТОР, РОЗЧИН, ВИПАРЮВАННЯ, КОРПУС, ЦИРКУЛЯЦІЙНІ ТРУБИ, РОЗЧИННИК, НАГРІВАЛЬНА КАМЕРА, СЕПАРАТОР.**

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ПРОЄКТУВАННЯ	7
1.1 Випарювання, як процес	7
1.2 Принцип роботи випарного апарату	9
1.3 Арматура та гарнітура випарних апаратів	12
2. РОЗРАХУНОК ТРИКОРПУСНОЇ ПРЯМОТОЧНОЇ ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ	17
2.1 Вихідні дані	17
2.2 Розподіл води, що випарюється	17
2.3 Визначення концентрацій розчину, що випарюється	18
2.4 Визначення температур кипіння розчинів	21
2.4.1 Гідродинамічна депресія та фізичні характеристики вторинної пари	21
2.4.2 Температура кипіння розчину в паровому просторі за корпусами випарної установки	22
2.4.3 Середня температура кипіння розчину та визначення корисної різниці температур	26
2.5 Визначення теплових навантажень	33
2.6 Визначення коефіцієнтів теплопередачі	39
2.6.1 Розрахунок коефіцієнта теплопередачі	42
2.7 Розподіл корисній різниці температур	52
2.8 Коригування параметрів розчину і парів по корпусах установки	54
ВИСНОВКИ	58
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	59

## ВСТУП

Випарюванням називається процес концентрування розчинів нелетких речовин при кипінні і частковому видаленні рідкого розчинника у вигляді пари. При цьому, розчинна нелетка речовина залишається в випарному апараті в концентрованому вигляді.

Нагрівання розчину, який випарюється, відбувається шляхом передачі теплоти через роздільну стінку, яка відокремлює теплоносій від розчину.

У деяких виробництвах концентрування розчинів виконують при безпосередньому зіткненні розчину з топковими газами або іншими газоподібними теплоносіями.

В якості нагрівального агента при випарюванні переважно використовують водяну пару, яку називають нагрівальною або первинною.

Пара, що утворюється при випарюванні киплячого розчину, називається вторинною.

Випарювання проводять, як під атмосферним тиском, так і під підвищеним або зниженим тиском.

При випарюванні розчину під атмосферним тиском вторинна пара випускається в атмосферу.

При випарюванні під підвищеним тиском вторинна пара може використовуватися як нагрівальний теплоносій для споживачів тепла. При випарюванні під тиском підвищується температура кипіння розчину, тому застосування такого способу обмежене температурою нагрівального теплоносія і властивостями розчину.

При випарюванні під зниженим тиском (при розрідженні) в апараті створюється вакуум шляхом конденсації вторинної пари в конденсаторі. Вакуум-випарювання дозволяє знизити температуру кипіння розчину і застосовується для випарювання розчинів чутливих до високої температури [1].

# 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ПРОЄКТУВАННЯ

## 1.1 Випарювання, як процес

Випарюванням називається концентрування розчинів практично нелетких або малолетких речовин у рідких летких розчинниках. Випарюванню підлягають розчини твердих речовин (водні розчини лугів, солей та ін.), а також висококиплячі рідини, що володіють при температурі випарювання дуже малим тиском пари, - деякі мінеральні та органічні кислоти, багатоатомні спирти та ін.

Випарювання іноді застосовують також для виділення розчинника в чистому вигляді: при опрісненні морської води випарюванням водяний нар, що утворюється з неї, конденсують і воду використовують для питних або технічних цілей [2].

При випаровуванні зазвичай здійснюється часткове видалення розчинника з усього об'єму розчину за його температури кипіння. Тому випарювання принципово відрізняється від випаровування, яке, як відомо, відбувається з поверхні розчину за будь-яких температур нижче температури кипіння. У ряді випадків випарений розчин піддають подальшій кристалізації у випарних апаратах, спеціально пристосованих для цих цілей.

Отримання висококонцентрованих розчинів, практично сухих та кристалічних продуктів полегшує та здешевлює їх перевезення та зберігання. Тепло для випарювання можна підводити будь-якими теплоносіями, що застосовуються при нагріванні. Однак у переважній більшості випадків у якості гріючого агента при випарюванні використовують водяну пару, яку називають гріючою, або первинною. Первинною служить або пара, що отримується з парогенератора, або відпрацьована пара, або пара проміжного відбору парових турбін. Пара, що утворюється при випаровуванні киплячого розчину, називається вторинною. Тепло, необхідне для випарювання розчину, зазвичай підводиться через стінку, що відокремлює теплоносій від розчину. У деяких виробництвах концентрування розчинів здійснюють при безпосередньому

зіткненні розчину, що випаровується, з топковими газами або іншими газоподібними теплоносіями [2.3].

Процеси випарювання проводять під вакуумом, при підвищеному та атмосферному тисках. Вибір тиску пов'язаний з властивостями випаровуваного розчину і можливістю використання тепла вторинної пари. При випаровуванні під атмосферним тиском вторинна пара не використовується і зазвичай видаляється в атмосферу. Такий спосіб випарювання є найпростішим, але найменш економічним. Випарювання під атмосферним тиском, а іноді і випарювання під вакуумом проводять в одиночних випарних апаратах (однокорпусних установках випарних). Однак найбільш поширені багатокорпусні випарні установки, що складаються з декількох випарних апаратів, або корпусів, в яких вторинна пара кожного попереднього корпусу направляється як гріє наступний корпус. При цьому тиск у послідовно з'єднаних (по ходу розчину, що випаровується) корпусах знижується таким чином, щоб забезпечити різницю температур між вторинною парою з попереднього корпусу і розчином, що кипить в даному корпусі, тобто створити необхідну рушійну силу процесу випарювання. У цих установках первинною парою обігрівається тільки перший корпус [2,4].

Отже, в багатокорпусних випарних установках досягається значна економія первинної пари в порівнянні з однокорпусними установками тієї ж продуктивності. У хімічній промисловості застосовуються переважно безперервно діючі випарні установки. Лише у виробництвах малого масштабу, а також при випаровуванні розчинів до кінцевих високих концентрацій іноді використовують випарні апарати періодичної дії. Концентрація розчину у такому апараті наближається до кінцевої лише кінцевий період процесу. Тому середній коефіцієнт теплопередачі тут може бути дещо вищим, ніж у безперервно діючому апараті, де концентрація розчину ближче до кінцевої протягом всього процесу випарювання [5].

## 1.2 Принцип роботи випарного апарату

За принципом роботи випарні апарати поділяються на безперервно і періодично діючі. У свою чергу випарне обладнання поділяють за режимом руху розчину на:

- випарні апарати з природною циркуляцією;
- випарні апарати з примусовою циркуляцією;
- випарні апарати плівкового типу.

В апараті з природною циркуляцією розчин циркулює за рахунок різниці його густину кип'ятільних трубах нагрівальної камери і в опускній циркуляційній трубі. У кип'ятільних трубах нагрівальної камери розчин нагрівається і закипає, в результаті чого утворюється суміш пари і рідини. Ця суміш рухається вгору по трубах і далі потрапляє до сепаратора, де пара відокремлюється від рідини. Пара надходить до паропроводу вторинної пари, а концентрований розчин частково відводиться з апарату у вигляді готового продукту, частково надходить до опускної циркуляційної труби. Умови для циркуляції розчину створюються за рахунок того, що виносна циркуляційна труба практично не нагрівається, а густина розчину в ній навага то вища, ніж у кип'ятільних трубах, які розміщені в нагрівальній камері [6].

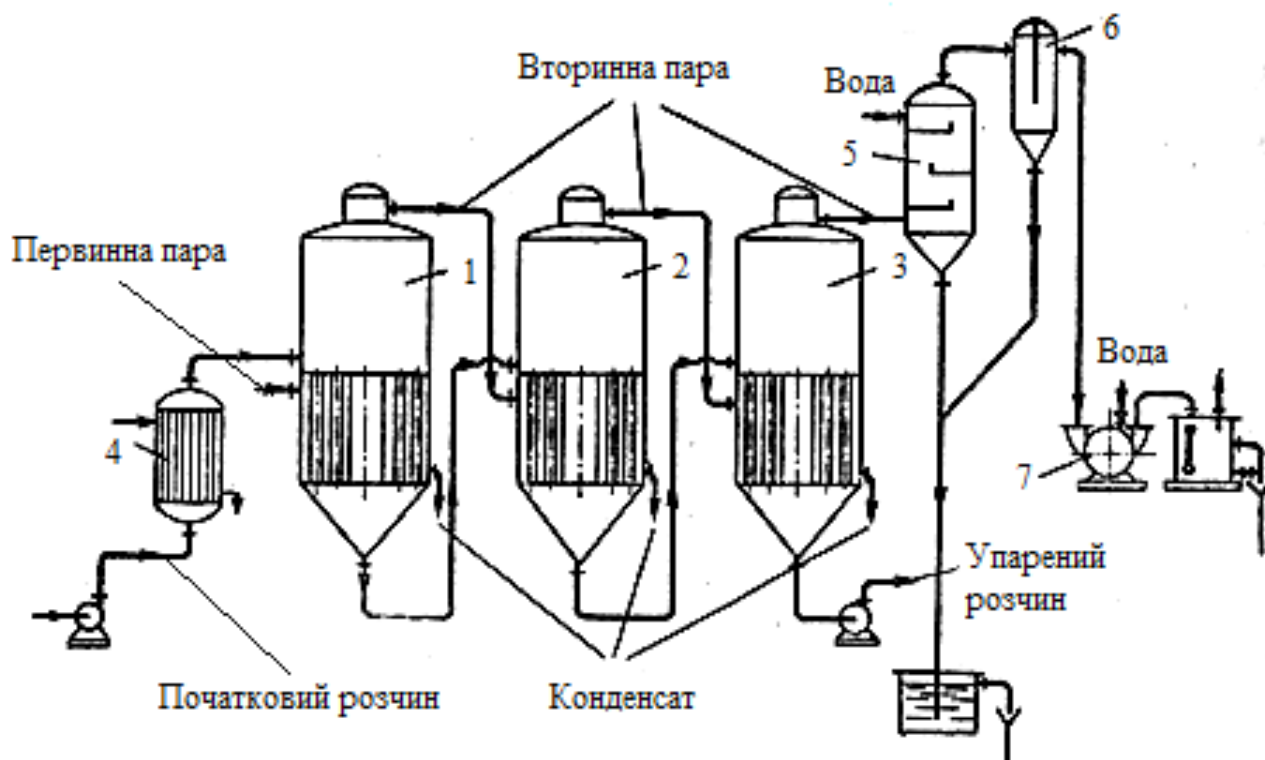
У більшості випадків випарні апарати безперервної дії komponуються у багатокорпусні випарні установки.

Випарні установки класифікують по відносному руху нагрівальної пари і розчину, який випарюється:

- прямоточні випарні установки для розчинів, що володіють високою температурною депресією;
- протиточні випарні установки для розчинів з постійно зростаючою в'язкістю при підвищенні їх концентрації;
- випарні установки з паралельним живленням корпусів для розчинів, які схильні до кристалізації;

- випарні установки зі змішаним живленням корпусів для розчинів з підвищеною в'язкістю [8].

Схему трикорпусної випарної установки представлено на рисунку 1.1.



1-3 - корпуси установки; 4 - підігрівач початкового (слабкого) розчину; 5 - барометричний конденсатор; 6 - уловлювач; 7 - вакуум-насос

Рисунок 1.1 –Трикорпусна прямоточна випарна установка [9].

Установка складається з трьох корпусів. Початковий розчин (слабкий розчин), зазвичай попередньо нагрітий до температури кипіння, надходить до першого корпусу, що обігрівається свіжою (первинною) парою. Вторинна пара з цього корпусу подається в якості нагрівальної до другого корпусу, де за рахунок зниженого тиску розчин кипить при більш низькій температурі, ніж у першому.

З огляду на знижений тиск в другому корпусі розчин, упарений у першому корпусі, переміщується самопливом до другого корпусу, де охолоджується до температури кипіння. За рахунок тепла, що при цьому виділяється, утворюється додатково деяка кількість вторинної пари. Таке явище, яке відбувається у всіх корпусах установки, крім першого, носить назву самовипаровування розчину [8,9].

Аналогічно випарений розчин з другого корпусу переміщується самопливом до третього корпусу, який обігривається вторинною парою з другого корпусу.

Попереднє нагрівання початкового (слабкого) розчину до температури кипіння в першому корпусі здійснюється в окремому підігрівачі 4, що дозволяє уникнути збільшення поверхні нагрівання першого корпусу.

Вторинна пара з останнього корпусу (у даному випадку з третього) відводиться в барометричний конденсатор 5, у якому при конденсації пари відбувається необхідне розрідження. Гази, що потрапляють в установку через нещільність трубопроводів, а також з парою і охолоджувальною водою в конденсаторі, відсмоктуються через уловлювач 6 вакуум-насосом 7.

Вторинна пара, що утворюється в кожному корпусі, може не тільки повністю подаватися на обігрівання наступного корпусу, а й частково використовуватися для попереднього підігрівання розчину, що надходить для випарювання, або для інших технологічних цілей, не пов'язаних з випарюванням. Вторинна пара, яка використовується поза випарною установкою, називається екстра парою [10].

Переваги прямої установки наступні:

1. Самопливний рух розчину з корпусу в корпус (за рахунок різниці тисків у них);
2. Зниження температури кипіння розчину з підвищенням його концентрації, що особливо важливо задля збереження якості розчинів, чутливих до дії високих температур;

3. Зниження втрат корисної різниці температур за рахунок нижчих значень температурної депресії;

4. Надходження у випарний апарат перегрітої рідини, що покращує процес випарювання.

Недоліком прямої схеми є зменшення у корпусах коефіцієнта теплопередачі через збільшення концентрації розчину (підвищення в'язкості) і одночасного зниження температури кипіння [10].

### 1.3 Арматура та гарнітура випарних апаратів

До арматури відносяться вентилі, водомірне скло, масленка, запобіжний клапан. У випарному апараті є наступні вентилі:

- вентилі для регулювання подавання та видалення розчину з апарату;
- вентилі для подавання, у випадку необхідності, води до апарату і для видалення конденсату;
- спускний вентиль для спорожніння апарату після чистки або при зупинці;
- парові вентилі, які регулюють подавання пари у перший корпус та видалення пари з останнього корпусу на конденсатор;
- вентиль для відведення газів, що неконденсуються з парової камери.

Вентилі мають сталений або бронзовий клапан та встановлюються таким чином, щоб пара або рідина поступали під клапан, що полегшує відкривання вентилів [11].

Водовказівне скло вказується для визначення рівня розчину у апараті і конденсату до гріючої камері. Скло співдіє з апаратом за допомогою кранів.

Масленка необхідна для подавання масла до апарату у випадку вспінювання розчину.

Запобіжний клапан встановлюється у паровому просторі апаратів, що працюють під тиском, і призначений для сигналізації і попередження збільшення тиску у апараті.

До гарнітури випарного апарату відносяться лази для огляду, механічної чистки або заміни труб, овальної або круглої форми, закриваються кришкою та притягуються болтами[12].

#### 1.4 Оптимальне число ступенів випарної установки

Багатоступеневе випарювання дає значну економію теплової енергії.

Орієнтовно витрата гріючої пари у випарної установки з  $n$  корпусів:

$$D = \frac{W}{\eta \cdot n}$$

де  $W$  – загальна кількість випареної води у всіх корпусах установки;

$\eta$  – коефіцієнт, що враховує втрати теплоти до навколишнього середовища, недовикористання конденсату, а також збільшення теплоти пароутворення зі зниженням тиску. Для трьох та чотирьох корпусних установок  $\eta = 0,85$ .

Таким чином, зі збільшенням числа корпусів знижується витрата свіжої гріючої пари на установку. Однак, питома економія теплоти знижується зі збільшенням числа корпусів. Якщо при переході від одноступеневої випарки до двоступеневої, витрата свіжої пари знижується вдвічі, то у п'ятиступеневій у порівнянні з чотирьохступеневою витрата пари знижується тільки на 10 %. Зі

збільшення числа корпусів подовжується схема, підвищується вартість установки, ускладнюється обслуговування [12].

Доцільне число корпусів у установки зі багатоступеневим випарюванням визначається багатоваріантними економічними розрахунками. У якості критерія оптимальності приймаються приведені витрати, які при пошуку оптимального варіанту повинні наближатися до мінімуму.

Приведені витрати визначаються за формулою:

$$ПВ = \frac{КВ}{T_0} + EB,$$

де КВ – капітальні витрати, грн;

$T_0$  – термін окупності, роки;

ЕВ – експлуатаційні витрати, грн/рік.

Капітальні витрати складаються з:

- вартості усіх корпусів, Вк;
- вартості підігрівача вихідного розчину, Вп;
- вартості насосу для вихідного розчину Вн;
- вартості вакуум-насосу Ввн;
- вартості барометричного конденсатору, Вбк;
- вартості контрольно-вимірювальних приладів, арматури, трубопроводів, допоміжного обладнання Ва;
- витрат на доставку та монтаж обладнання, устрій майданчику, фундаменту і.т.інше Вм.

Зі збільшенням кількості корпусів істотно збільшується вартість самих корпусів, внаслідок зростання температурних втрат у всієї установки і непропорційно зменшується корисна різниця температур, яка приходить на один корпус.

Зростають також витрати на доставку та монтаж обладнання. Такі витрати прийнято визначати у відсотках вартості основного обладнання. Для багатокорпусної випарної установки їх можна прийняти від 60 % до 80 % вартості корпусів [11,12].

Інші складові капітальних витрат змінюються зі зростанням числа корпусів менш значуще і при мінімізації приведених витрат їх можна не враховувати. Наприклад, вартість підігрівача та насосу збільшуються так як зі збільшенням числа корпусів зростають тиск та температура кипіння розчину у першому корпусі. Вартість барометричного конденсатору та вакуум-насосу зменшуються, так як зменшується витрата вторинної пари з останнього корпусу установки.

Експлуатаційні витрати включають:

- річні амортизаційні відрахування ( $EB_a$ ) і витрати на ремонт ( $EB_p$ ), які визначаються у відсотка від капітальних витрат;
- витрати на пару та електроенергію

$$EB = KB(EB_a + EB_p) + ((D + D_{\pi}) \cdot Z_{\pi} + (nN_{\text{цн}} + N_{\text{н}} + N_{\text{вн}}) \cdot Z_e) \cdot \tau,$$

де  $\tau$  – число годин роботи обладнання за рік, при безперервній роботі можна прийняти  $\tau = 8000$  год/рік;

$D$  – витрата пари на перший корпус установки, кг/с;

$D_{\pi}$  – витрата пари у попередньому підігрівачі, кг/с;

$N_{\text{цн}}$  – потужність циркуляційного насосу (для апаратів з примусовою циркуляцією), Вт;

$N_{\text{н}}$  – потужність насоса подавання вихідного розчину, Вт;

$N_{\text{вн}}$  – потужність вакуум-насосу, Вт;

$Z_{\text{п}}$  – вартість пари, грн/кг;

$Z_{\text{е}}$  – вартість електроенергії, грн/кВт·год.

Найбільші витрати приходяться на гріючу пару, яка подається до першого корпусу установки і до підігрівача, причому зі збільшенням числа корпусів досягається істотна економія лише пари на випарювання, а витрата пари на підігрівання вихідного розчину до температури кипіння його у першому корпусі навіть дещо зростає за рахунок збільшення тиску у цьому корпусі.

Витрати на електроенергію в установка з примусовою циркуляцією розчину у корпусах зростають пропорційно кількості корпусів. В установках з природньою циркуляцією ці витрати незначні (тільки на подавання розчину у перший корпус і підтримання вакууму у останньому) і мало залежать від числа корпусів і в розрахунках приведених витрат з метою оптимізації не враховуються [12].

## 2. РОЗРАХУНОК ТРИКОРПУСНОЇ ПРЯМОТОЧНОЇ ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ

### 2.1 Вихідні дані

Розрахувати трикорпусну прямоточну випарну установку з природною циркуляцією розчину для концентрування  $G_n=2$  кг/с водного розчину нелеткої речовини з початковою концентрацією  $x_n=10$  %. Кінцева концентрація розчину  $x_k=35$  %. Розчин надходить для випарювання з початковою температурою  $t_{кп}$ , що дорівнює температурі кипіння розчину в паровому просторі першого корпусу установки. Абсолютний тиск водяної пари, що гріє,  $P_{нп1} = 0,25$  МПа. Висота кип'ятильних труб  $H = 3,6$  м. Абсолютний тиск в барометричному конденсаторі  $P_{бк}=0,01$  МПа.

### 2.2 Розподіл води, що випарюється

Продуктивність установки по воді, що випарюється, визначають з рівняння матеріального балансу

$$W = G_n \cdot \left(1 - \frac{x_n}{x_k}\right),$$

де  $G_n$  – кількість розчину, що надходить на випарювання, кг/с;

$x_n$  – початкова концентрація розчину, %;

$x_k$  – кінцева концентрація розчину, %;

$W$  – кількість води, що випарюється, кг/с.

$$W = 2 \cdot \left(1 - \frac{10}{35}\right) = 1,43.$$

Розподіл концентрацій розчину за корпусами установки залежить від співвідношення навантажень по воді, що випарюється, в кожному апараті.

На підставі практичних даних приймають, що продуктивність по воді розподіляється між корпусами відповідно до співвідношення

$$w_1 : w_2 : w_3 = 1 : 1,05 : 1,15 .$$

Тоді, кг/с

$$w_1 = \frac{1 \cdot W}{1 + 1,05 + 1,15} ;$$

$$w_1 = \frac{1 \cdot 1,43}{1 + 1,05 + 1,15} = 0,446 ;$$

$$w_2 = \frac{1,05 \cdot 1,43}{1 + 1,05 + 1,15} = 0,469 ;$$

$$w_3 = \frac{1,15 \cdot 1,43}{1 + 1,05 + 1,15} = 0,513 .$$

Перевірка розрахунку

$$W = w_1 + w_2 + w_3 .$$

$$W = 0,446 + 0,469 + 0,513 = 1,429 .$$

### 2.3 Визначення концентрацій розчину, що випарюється

Кінцева концентрація розчину за корпусами, %:

$$x_1 = \frac{G_n \cdot x_n}{G_n - w_1} ;$$

$$x_1 = \frac{2 \cdot 10}{2 - 0,446} = 12,87;$$

$$x_2 = \frac{2 \cdot 10}{2 - 0,446 - 0,469} = 18,44;$$

$$x_3 = \frac{2 \cdot 10}{2 - 0,446 - 0,469 - 0,513} = 35.$$

Концентрація розчину в останньому корпусі  $x_3$  повинна відповідати заданій концентрації випареного розчину  $x_k$ .

Результати розрахунків заносимо до таблиці 2.1.

У першому наближенні загальний перепад тисків розподіляють між корпусами порівну.

Тиск нагрівальної пари по корпусах установки, Па:

$$P_{нп\ 2} = P_{нп\ 1} - \frac{\Delta P_{заг}}{3};$$

$$P_{нп\ 3} = P_{нп\ 2} - \frac{\Delta P_{заг}}{3},$$

де  $\Delta P_{заг} = P_{нп\ 1} - P_{бк}$  загальний перепад тиску для випарної установки, Па.

Загальний перепад тиску для випарної установки, Па

$$\Delta P_{заг} = P_{нп\ 1} - P_{бк},$$

$$\Delta P_{заг} = 250000 - 1100 = 240000$$

$$P_{нп\ 2} = 250000 - \frac{240000}{3} = 170000;$$

$$P_{нз} = 170000 - \frac{240000}{3} = 90000.$$

Таблиця 2.1 – Результати розрахунку концентрацій

Найменування показника, розмірність	Позначення	Значення
Продуктивність за вихідним розчином, кг/с	$G_n$	2
Початкова концентрація, %	$x_n$	10
Кінцева концентрація, %	$x_k$	35
Кількість випареної води, кг/с:	$W$	1,43
у першому корпусі, кг/с	$w_1$	0,446
у другому корпусі, кг/с	$w_2$	0,469
у третьому корпусі, кг/с	$w_3$	0,513
Кінцева концентрація розчину:		
у першому корпусі, кг/с	$x_1$	12,87
у другому корпусі, кг/с	$x_2$	18,43
у третьому корпусі, кг/с	$x_3$	35

Перевіряємо тиск пари у барометричному конденсаторі, Па

$$P_{\bar{ок}} = P_{нз} - \frac{\Delta P_{заг}}{3}.$$

Розрахунки виконано вірно, якщо отримане значення тиску в барометричному конденсаторі відповідає початковим даним  $P_{\bar{ок}}$ .

По таблицях термодинамічних властивостей води і водяної пари в стані насичення[1] за значеннями тисків  $P_{нз}$  знаходимо відповідні температури нагрівальної пари  $t_{нз}$  і теплоту їх пароутворення  $r_{нз}$ . Результати розрахунків заносимо до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Фізичні характеристики нагрівальної пари кожного корпусу випарної установки

№ корпусу	Тиск, $P_{нп}$ , Па	Температура, $t_{нп}$ , °C	Теплота пароутворення, $r_{нп}$ , Дж/кг
1	25000	127,5	2180100
2	170000	115,5	2215000
3	90000	97	2265200
Барометричний конденсатор	10000	46	2392200

## 2.4 Визначення температур кипіння розчинів

### 2.4.1 Гідродинамічна депресія та фізичні характеристики вторинної пари

Гідродинамічна депресія обумовлена втратою тиску вторинної пари на подолання гідравлічних опорів паропроводів при переході з корпусу в корпус. Зазвичай в розрахунках приймають  $\Delta''' = (0,5 \dots 1,5) \text{ } ^\circ\text{C}$  на корпус. Прийmemo для кожного корпусу  $\Delta''' = 1,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Тоді температури вторинної пари в корпусах,  $^\circ\text{C}$

$$t_{ен 1} = t_{нп 2} + \Delta'''_1 ;$$

$$t_{ен 1} = 115,5 + 1 = 116,5 ;$$

$$t_{ен 2} = t_{нп 3} + \Delta'''_2 ;$$

$$t_{ен 2} = 97 + 1 = 98 ;$$

$$t_{ен 3} = t_{бк} + \Delta'''_3 ;$$

$$t_{ен 3} = 46 + 1 = 47 .$$

Сума гідравлічних депресій, °С

$$\Sigma \Delta''' = \Delta_1''' + \Delta_2''' + \Delta_3''' ,$$

$$\Sigma \Delta''' = 3.$$

По таблицях термодинамічних властивостей води і водяної пари в стані насичення[1] за температурою вторинної пари кожного корпусу  $t_{en}$  визначаємо її тиск  $P_{en}$  та теплоту пароутворення  $r_{en}$ . Результати розрахунків заносимо до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Фізичні характеристики вторинної пари кожного корпусу випарної установки

№ корпусу	Температура $t_{en}, ^\circ\text{C}$	Тиск $P_{en}, \text{Па}$	Ентальпія пари $i_{en}, \text{Дж/кг}$	Теплота пароутворення $r_{en}, \text{Дж/кг}$
1	116,5	177000	2702700	2213000
2	98	94301	2673200	2262600
3	47	10612	2586500	2389800

2.4.2 Температура кипіння розчину в паровому просторі за корпусами випарної установки

Температурна депресія водного розчину, °С, при нормальному атмосферному тиску  $P_{атм} = 101325 \text{ Па}$

$$\Delta'_{атм} = t_p - 100 , \quad (2.1)$$

де  $t_p$  – температура кипіння розчину при нормальному атмосферному тиску, °С, залежно від його концентрації (див. [2] табл. XXXVI).

Для початкового розчину і концентрованих розчинів кожного корпусу випарної установки розрахунок температурної депресії при нормальному атмосферному тиску виконуємо за формулою (2.1), °С

$$\Delta'_{атм n} = t_{p n} - 100;$$

$$\Delta'_{атм n} = 102,5 - 100 = 2,5;$$

$$\Delta'_{атм 1} = t_{p 1} - 100;$$

$$\Delta'_{атм 1} = 103,5 - 100 = 3,5;$$

$$\Delta'_{атм 2} = t_{p 2} - 100;$$

$$\Delta'_{атм 2} = 106 - 100 = 6;$$

$$\Delta'_{атм 3} = t_{p 3} - 100;$$

$$\Delta'_{атм 3} = 118,5 - 100 = 18,5.$$

Температурна депресія при тиску вторинної пари по корпусах випарної установки, °С

$$\Delta' = 0,01623 \cdot \frac{T_{ен}^2}{r_{ен} \cdot 10^{-3}} \cdot \Delta'_{атм}, \quad (2.2)$$

де  $T_{ен}, r_{ен}$  – температура кипіння та теплота пароутворення води при тиску над киплячим розчином (тиск вторинної пари), К, Дж/кг відповідно.

Температурну депресію для початкового розчину і концентрованих розчинів кожного корпусу випарної установки (при тиску вторинної пари) виконуємо за формулою (2.2), °С:

$$\Delta'_n = 0,01623 \cdot \frac{T_{en1}^2}{r_{en1} \cdot 10^{-3}} \cdot \Delta'_{атм n};$$

$$\Delta'_n = 0,01623 \cdot \frac{(116,5 + 273)^2}{2213000 \cdot 10^{-3}} \cdot 2,5 = 2,782;$$

$$\Delta'_1 = 0,01623 \cdot \frac{T_{en1}^2}{r_{en1} \cdot 10^{-3}} \cdot \Delta'_{атм 1};$$

$$\Delta'_1 = 0,01623 \cdot \frac{(116,5 + 273)^2}{2213000 \cdot 10^{-3}} \cdot 3,5 = 3,894;$$

$$\Delta'_2 = 0,01623 \cdot \frac{T_{en2}^2}{r_{en2} \cdot 10^{-3}} \cdot \Delta'_{атм 2};$$

$$\Delta'_2 = 0,01623 \cdot \frac{(98 + 273)^2}{2262600 \cdot 10^{-3}} \cdot 6 = 5,924;$$

$$\Delta'_3 = 0,01623 \cdot \frac{T_{en}^2}{r_{en} \cdot 10^{-3}} \cdot \Delta'_{атм 3};$$

$$\Delta'_3 = 0,01623 \cdot \frac{(47 + 273)^2}{2389800 \cdot 10^{-3}} \cdot 18,5 = 12,866;$$

Сума температурних депресій за корпусами установки, °С

$$\Sigma \Delta' = \Delta'_1 + \Delta'_2 + \Delta'_3;$$

$$\Sigma\Delta' = 3,894 + 5,924 + 12,866 = 22,684.$$

Температура кипіння початкового і концентрованого (кінцевого) розчинів у паровому просторі корпусу випарної установки (при тиску вторинної пари), °С

$$t_{\kappa} = t_{en} + \Delta', \quad (2.3)$$

де  $t_{en}$  - температура вторинної пари, °С;

$\Delta'$  –температурна депресія, °С.

Розрахунок температури початкового розчину  $t_{\kappa n}$  і температур кипіння концентрованих розчинів  $t_{\kappa}$  у паровому просторі кожного корпусу випарної установки виконуємо за формулою (2.3), °С:

$$t_{\kappa n} = t_{en 1} + \Delta'_n;$$

$$t_{\kappa n} = 116,5 + 2,782 = 119,3;$$

$$t_{\kappa 1} = t_{en 1} + \Delta'_1;$$

$$t_{\kappa 1} = 116,5 + 3,894 = 120,4;$$

$$t_{\kappa 2} = t_{en 2} + \Delta'_2;$$

$$t_{\kappa 2} = 98 + 5,924 = 103,9;$$

$$t_{\kappa 3} = t_{en 3} + \Delta'_3.$$

$$t_{\kappa 3} = 47 + 12,866 = 59,9;$$

Результати розрахунку температурної депресії по корпусах, температур початкового розчину та концентрованих розчинів заносимо до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Температура кипіння розчину в паровому просторі по корпусах випарної установки

№ корпусу	Температура, $t_{en}$ °C	Тиск, $P_{en}$ , Па	$\Delta'_{атм}$ , °C	$\Delta'$ , °C	$t_k$ , °C
Початковий розчин	116,5	177000	2,5	2,782	119,3
1	116,5	177000	3,5	3,894	120,4
2	98	94301	6	5,924	103,9
3	47	10612	18,5	12,866	59,9

2.4.3 Середня температура кипіння розчину та визначення корисної різниці температур

Гідростатична депресія обумовлена різницею тисків у середньому по висоті кип'ятільних труб шару киплячого розчину і в сепараторі апарата (в паровому просторі).

Тиск в середньому перерізі кип'ятільних труб  $P_c$  кожного корпусу установки, Па

$$P_c = P_{en} + 0.5 \cdot \rho_p \cdot g \cdot H_{opt} , \quad (2.5)$$

де  $H_{opt}$  – оптимальна висота рівня розчину в кип'ятільних трубах (на практиці визначається по водомірному склу), м;

$P_{en}$  – тисквторинної пари, Па;

$g$ – прискорення вільного падіння, м<sup>2</sup>/с;

$\rho_p$ – густина розчину, що кипить, кг/м<sup>3</sup>.

Оптимальна висота рівня розчину в кип'ятільних трубах може бути розрахована за формулою, м

$$H_{opt} = [0,26 + 0,0014 \cdot (\rho_p - \rho_v)] \cdot H, \quad (2.6)$$

де  $\rho_p$  - густина розчину при температурі кипіння, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_v$  - густина води при температурі кипіння, кг/м<sup>3</sup>;

$H$  - висота кип'ятільних труб, м.

Гідростатична депресія за корпусами, °С

$$\Delta'' = t_{cv} - t_{en}, \quad (2.7)$$

де  $t_{cv}$  - температури кипіння води при тиску в середньому перерізі кип'ятільних труб  $P_c$  даного корпусу, °С;

$t_{en}$  - температура вторинної пари даного корпусу, °С.

Визначивши гідростатичну депресію виконують розрахунок середньої температури кипіння розчину,  $t_{ck}$ , °С

$$t_{ck} = t_{nn} + \Delta' + \Delta'' + \Delta''', \quad (2.8)$$

де  $t_{nn}$  - температура нагрівальної пари для наступного корпусу, °С і корисної різниці температур,  $\Delta t$ , °С

$$\Delta t = t_{nn} - t_{ck}, \quad (2.9)$$

де  $t_{nn}$  - температура нагрівальної пари для даного корпусу, °С.

Розрахунок густини водних розчинів  $\rho_p$  при відповідних концентраціях і температурах наведено в додатку А [1].

Густина розчинів у діапазоні температур від 0 до 200 °С розраховується за формулою

$$\lg \rho = \lg \rho_{H_2O} + (a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2) \cdot x,$$

де  $\rho_{H_2O}$  – густина води при заданій температурі, кг/м<sup>3</sup>;

$x$  – концентрація розчиненої речовини, кг речовини/кг розчину;

$t$  – температура, °С;

$a_0, a_1, a_2$  – коефіцієнти.

Для КОН

$$a_0 = 3589,98 \cdot 10^{-4};$$

$$a_1 = 406,64 \cdot 10^{-6};$$

$$a_2 = -271,68 \cdot 10^{-8};$$

Тоді

$$\begin{aligned} \lg \rho_1 &= \lg(941,1) + (3589,98 \cdot 10^{-4} + 406,64 \cdot 10^{-6} \cdot 120,4 - 271,68 \cdot 10^{-8} \cdot 120,4^2) \cdot 0,128 \\ &= 3,02, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lg \rho_2 &= \lg(955,2) + (3589,98 \cdot 10^{-4} + 406,64 \cdot 10^{-6} \cdot 103,9 - 271,68 \cdot 10^{-8} \cdot 103,9^2) \cdot 0,184 \\ &= 3,05, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lg \rho_2 &= \lg(983,6) + (3589,98 \cdot 10^{-4} + 406,64 \cdot 10^{-6} \cdot 59,9 - 271,68 \cdot 10^{-8} \cdot 59,9^2) \cdot 0,35 \\ &= 3,12, \end{aligned}$$

Тоді

$$\rho_1 = 10^{3,02} = 1049,7;$$

$$\rho_2 = 10^{3,05} = 1118,6;$$

$$\rho_3 = 10^{3,12} = 1329,1;$$

Густина води  $\rho_e$  при температурі кипіння визначить по таблиці К.1 (див. додат. К) [1]. В першому наближенні температуру кипіння розчину прийняти рівної  $t_p = t_{en} + \Delta'$ .

Розрахунок оптимальної висоти рівня розчину в кип'ятільних трубах корпусів установки виконуємо за формулою (2.6), м

$$H_{onm1} = [0,26 + 0,0014 \cdot (\rho_{p1} - \rho_{e1})] \cdot H;$$

$$H_{onm1} = [0,26 + 0,0014 \cdot (1049,7 - 941,1)] \cdot 3,6 = 1,5;$$

$$H_{onm2} = [0,26 + 0,0014 \cdot (\rho_{p2} - \rho_{e2})] \cdot H;$$

$$H_{onm2} = [0,26 + 0,0014 \cdot (1118,6 - 955,2)] \cdot 3,6 = 1,8;$$

$$H_{onm3} = [0,26 + 0,0014 \cdot (\rho_{p3} - \rho_{e3})] \cdot H.$$

$$H_{onm3} = [0,26 + 0,0014 \cdot (1329,1 - 983,6)] \cdot 3,6 = 2,7.$$

Тиск в середньому перерізі кип'ятільних труб  $P_c$  кожного корпусу розраховуємо за формулою (2.5), Па

$$P_{c1} = P_{en1} + 0,5 \cdot \rho_{p1} \cdot g \cdot H_{onm1};$$

$$P_{c1} = 177000 + 0,5 \cdot 1049,7 \cdot 9,81 \cdot 1,5 = 184586,29;$$

$$P_{c2} = P_{en2} + 0,5 \cdot \rho_{p2} \cdot g \cdot H_{onm2};$$

$$P_{c2} = 94301 + 0,5 \cdot 1049,7 \cdot 9,81 \cdot 1,58 = 103968,37 ;$$

$$P_{c3} = P_{en3} + 0,5 \cdot \rho_{p3} \cdot g \cdot H_{ont3} ;$$

$$P_{c3} = P_{en3} + 0,5 \cdot 1329,1 \cdot 9,81 \cdot 2,7 = 28083,55.$$

По таблицях термодинамічних властивостей води і водяної пари в стані насичення[1] за тиском в середньому перерізі кип'ятільних труб  $P_c$  знаходимо відповідні значення теплоти пароутворення  $r_{cv}$  і температури кипіння води  $t_{cv}$ .

Результати розрахунку тиску в середньому перерізі кип'ятільних труб  $P_c$  та відповідні до цих тисків значення теплоти пароутворення і температури кипіння води заносимо до таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Теплота пароутворення й температура кипіння води в середньому перерізі кип'ятільних труб

№ корпусу	Тиск $P_c$ , Па	Температура $t_{cv}$ , °C	Теплота пароутворення, $r_{cv}$ , Дж/кг
1	184586,29	118	2208500
2	103968,37	101	2254600
3	28083,55	68	2338700

За формулою (2.7) визначаємо гідростатичну депресію за корпусами, °C

$$\Delta_1'' = t_{cv1} - t_{en1} ;$$

$$\Delta_1'' = 118 - 116,5 = 1,5 ;$$

$$\Delta_2'' = t_{cv2} - t_{en2} ;$$

$$\Delta_2'' = 101 - 98 = 3;$$

$$\Delta_3'' = t_{cв3} - t_{ен3}.$$

$$\Delta_3'' = 68 - 47 = 21.$$

Сума гідростатичних депресій, °C

$$\Sigma \Delta'' = \Delta_1'' + \Delta_2'' + \Delta_3''.$$

$$\Sigma \Delta'' = 1,5 + 3 + 21 = 25,5.$$

Середні температури кипіння розчинів у корпусах (див. формулу 2.8), °C

$$t_{ск1} = t_{нн2} + \Delta_1' + \Delta_1'' + \Delta_1''';$$

$$t_{ск1} = 127,5 + 3,894 + 1,5 + 1 = 121,894;$$

$$t_{ск2} = t_{нн3} + \Delta_2' + \Delta_2'' + \Delta_2''';$$

$$t_{ск2} = 97 + 5,954 + 3 + 1 = 106,924;$$

$$t_{ск3} = t_{бк} + \Delta_3' + \Delta_3'' + \Delta_3''';$$

$$t_{ск3} = 46 + 12,866 + 21 + 1 = 80,866.$$

Розрахункові корисні різниці температур за корпусами (у першому наближенні) визначаємо за формулою (2.9), °C

$$\Delta t_1 = t_{нн1} - t_{ск1};$$

$$\Delta t_1 = 127,5 - 121,894 = 5,61.$$

$$\Delta t_2 = 115,5 - 106,924 = 16,13;$$

$$\Delta t_3 = t_{нз} - t_{скз}.$$

$$\Delta t_3 = 97 - 80,866 = 21.$$

Загальна корисна різниця температур випарної установки, °С

$$\Sigma \Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 .$$

$$\Sigma \Delta t = 5,61 + 8,58 + 16,13 = 30,316 .$$

Перевірка сумарної корисної різниці температур

$$\Sigma \Delta t = t_{н1} - t_{ок} - (\Sigma \Delta' + \Sigma \Delta'' + \Sigma \Delta''').$$

$$\Sigma \Delta t = 127,5 - 46 - (22,684 + 25,5 + 3) = 30,316.$$

Результати розрахунку температур кипіння розчинів і температурних втрат (депресій) заносимо до таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Розрахункові температурні параметри за корпусами

Параметр	Позначення	Корпус		
		1	2	3
Температурна депресія, °С	$\Delta'$	3,894	5,924	12,866
Гідростатична депресія, °С	$\Delta''$	1,5	3	21
Гідродинамічна депресія, °С	$\Delta'''$	1	1	1
Температура початкового розчину для першого корпусу, °С	$t_{kn}$	119,3	-	-
Температура кипіння концентрованого (кінцевого) розчину, °С	$t_k$	120,4	103,9	59,9
Середня температура кипіння розчину, °С	$t_{ск}$	121,894	106,924	80,866
Розрахункова корисна різниця температур, °С	$\Delta t$	5,61	8,58	16,13

## 2.5 Визначення теплових навантажень

Температура кипіння концентрованого (кінцевого) розчину в паровому просторі (при тиску в корпусі), °С

$$t_k = t_{en} + \Delta',$$

де  $\Delta'$  – температурна депресія для концентрованого (кінцевого) розчину при тиску вторинної пари в корпусі, °С.

Температура  $t_k$  - це температура кипіння розчину в сепараторі, при якій концентрований (кінцевий) розчин виводиться з корпусу установки.

Теплові навантаження за корпусами установки:

$$Q_1 = D_1 \cdot r_{nn1} = 1,03 \cdot [w_1 \cdot (i_{gn1} - c_6 \cdot t_{k1}) - G_n \cdot c_n \cdot (t_{kn} - t_{k1})]; \quad (2.10)$$

$$Q_2 = w_1 \cdot r_{nn2} = 1,03 \cdot \left[ \frac{w_2 \cdot (i_{gn2} - c_6 \cdot t_{k2}) -}{-(G_n - w_1) \cdot c_1 \cdot (t_{k1} - t_{k2})} \right]; \quad (2.11)$$

$$Q_3 = w_2 \cdot r_{nn3} = 1,03 \cdot \left[ \frac{w_3 \cdot (i_{gn3} - c_6 \cdot t_{k3}) -}{-(G_n - w_1 - w_2) \cdot c_2 \cdot (t_{k2} - t_{k3})} \right], \quad (2.12)$$

де  $D_1$  - витрата первинної (нагрівальної) пари в першому корпусі установки, кг/с;

1,03 – коефіцієнт, що враховує втрати тепла в зовнішнє середовище;

$G_n$  – витрата розчину з початковою концентрацією  $x_n$ , який надходить до першого корпусу установки, кг/с;

$t_{kn}$  - початкова температура розчину, який надходить до першого корпусу установки, °С (див. табл. 2.6);

$c_n$  - питома теплоємність розчину при його початковій температурі  $t_{kn}$ , Дж/(кг·К) (розрахунок виконується для початкової концентрації розчину  $x_n$ , який надходить до першого корпусу установки, (див. додаток В)[1];

$c_1, c_2$  – питомі теплоємності розчинів відповідно при температурах кипіння концентрованого (кінцевого) розчину  $t_k$  першого і другого корпусів, Дж/(кг·К) (розрахунок виконується для кінцевої концентрації розчину даного корпусу  $x$ , (див. додаток В));

$c_6$  – теплоємність води, Дж/(кг·К) (розрахунок виконується при температурі кипіння концентрованого (кінцевого) розчину  $t_k$  даного корпусу, (див. додаток К)).

Рівняння балансу випарної установки по воді

$$W = w_1 + w_2 + w_3, \quad (2.13)$$

де  $w_1, w_2, w_3$  - кількість випарюваної води відповідно у першому, другому і третьому корпусах, кг/с.

Розв'язання системи рівнянь (2.10) – (2.12) виконується у такій послідовності:

За корпусами установки виконується розрахунок:

1) коефіцієнтів випаровування

$$\alpha_1 = \frac{r_{нн1}}{i_{ен1} - c_{\theta} \cdot t_{к1}}, \quad \alpha_2 = \frac{r_{нн2}}{i_{ен2} - c_{\theta} \cdot t_{к2}}, \quad \alpha_3 = \frac{r_{нн3}}{i_{ен3} - c_{\theta} \cdot t_{к3}}; \quad (2.14)$$

$$\alpha_1 = \frac{2180100}{2702700 - 4250 \cdot 120,4} = 0,995,$$

$$\alpha_2 = \frac{2215000}{2673200 - 4223 \cdot 103,9} = 0,9913,$$

$$\alpha_3 = \frac{2265200}{2526500 - 4179 \cdot 59,9} = 0,9696,$$

2) коефіцієнтів самовипаровування, (кг·К)/Дж

$$\beta_1 = \frac{t_{кн} - t_{к1}}{i_{ен1} - c_{\theta} \cdot t_{к1}}, \quad \beta_2 = \frac{t_{к1} - t_{к2}}{i_{ен2} - c_{\theta} \cdot t_{к2}}, \quad \beta_3 = \frac{t_{к2} - t_{к3}}{i_{ен3} - c_{\theta} \cdot t_{к3}}. \quad (2.15)$$

$$\beta_1 = \frac{119,3 - 120,4}{2702700 - 4250 \cdot 120,4} = -0,0000005.$$

$$\beta_2 = \frac{120,4 - 103,9}{2673200 - 4223 \cdot 103,9} = 0,0000074.$$

$$\beta_3 = \frac{103,9 - 59,9}{2586500 - 4179 \cdot 59,9} = 0,0000189.$$

З урахуванням співвідношень (2.14), (2.15) система рівнянь (2.10) – (2.12) може бути представлена у вигляді:

$$w_1 = D_1 \cdot \alpha_1 \cdot \eta + G_n \cdot c_n \cdot \beta_1; \quad (2.16)$$

$$w_2 = w_1 \cdot \alpha_2 \cdot \eta + (G_n - w_1) \cdot c_1 \cdot \beta_2; \quad (2.17)$$

$$w_3 = w_2 \cdot \alpha_3 \cdot \eta + (G_n - w_1 - w_2) \cdot c_2 \cdot \beta_3, \quad (2.18)$$

де  $\eta = \frac{1}{1,03} = 0,97$  - часткатеплоти, яка корисно використовується в корпусі випарної установки.

Для кожного корпусу установки розрахуємо:

1) коефіцієнти  $z$ :

$$\begin{cases} z_1 = \alpha_1 \cdot \eta \\ z_2 = z_1 \cdot (\alpha_2 \cdot \eta - c_1 \cdot \beta_2) \\ z_3 = z_2 \cdot (\alpha_3 \cdot \eta - c_2 \cdot \beta_3) - z_1 \cdot c_2 \cdot \beta_3 \end{cases} ; \quad (2.19)$$

$$z_1 = 0,995 \cdot 0,97 = 0,965.$$

$$z_2 = 0,965 \cdot (0,99 \cdot 0,97 - 4250 \cdot 0,000074) = 0,898.$$

$$\begin{aligned} z_3 &= 0,898 \cdot (0,9696 \cdot 0,97 - 4223 \cdot 0,0000189) - 0,965 \cdot 4223 \cdot 0,0000189 \\ &= 0,696 \end{aligned}$$

2) коефіцієнти  $y$ , кг/с

$$\begin{cases} y_1 = G_n \cdot c_n \cdot \beta_1 \\ y_2 = G_n \cdot c_1 \cdot \beta_2 + y_1 \cdot (\alpha_2 \cdot \eta - c_1 \cdot \beta_2) \\ y_3 = G_n \cdot c_2 \cdot \beta_3 + y_2 \cdot (\alpha_3 \cdot \eta - c_2 \cdot \beta_3) - y_1 \cdot c_2 \cdot \beta_3 \end{cases} \quad (2.20)$$

$$y_1 = 2 \cdot 3853,073 \cdot (-0,0000005) = -0,003913;$$

$$y_2 = 2 \cdot 3853,073 \cdot 0,0000074 + -0,003913 \cdot (0,9913 \cdot 0,97 - 4250 \cdot 0,0000074) = 0,059$$

$$y_3 = 2 \cdot 4223 \cdot 0,0000189 + 0,059 \cdot (0,9696 \cdot 0,97 - 4223 \cdot 0,0000189) - (-0,0039) \cdot 4223 \cdot 0,0000189 = 0,21$$

З урахуванням співвідношень (2.19), (2.20) система рівнянь (2.16) – (2.18) може бути представлена у вигляді:

$$w_1 = D_1 \cdot z_1 + y_1; \quad (2.21)$$

$$w_2 = D_1 \cdot z_2 + y_2; \quad (2.22)$$

$$w_3 = D_1 \cdot z_3 + y_3. \quad (2.23)$$

Позначимо

$$Z = z_1 + z_2 + z_3, \quad (2.24)$$

$$Z = 0,965 + 0,897 + 0,696 = 2,559$$

$$Y = y_1 + y_2 + y_3. \quad (2.25)$$

$$Y = -0,0039 + 0,059 + 0,21 = 0,265.$$

Виконаємо додавання рівнянь (2.21) – (2.23). З урахуванням рівняння балансу випарної установки по воді (2.13) і співвідношень (2.24), (2.25) отримаємо

$$W = D_1 \cdot Z + Y,$$

звідки

$$D_1 = \frac{W - Y}{Z}.$$

$$D_1 = \frac{1,429 - 0,265}{2,559} = 0,454.$$

Розрахувавши витрати нагрівальної пари для першого корпусу  $D_1$  з рівнянь (2.21) - (2.23) отримуємо продуктивність корпусів установки по воді  $w_1, w_2, w_3$

$$w_1 = 0,454 \cdot 0,965 + (-0,0039) = 0,435;$$

$$w_2 = 0,454 \cdot 0,898 + 0,059 = 0,467;$$

$$w_3 = 0,454 \cdot 0,696 + 0,21 = 0,527.$$

і далі за рівняннями (2.10) - (2.12) остаточно виконуємо розрахунок теплових навантажень за корпусами установки:

$$Q_1 = D_1 \cdot r_{m1};$$

$$Q_1 = 0,454 \cdot 2180100 = 990830;$$

$$Q_2 = 0,467 \cdot 2215000 = 1006692;$$

$$Q_3 = 0,527 \cdot 2265200 = 1029507.$$

Уточнюємо концентрації розчину по корпусах, %:

$$x_1 = \frac{G_n \cdot x_n}{G_n - w_1};$$

$$x_1 = \frac{2 \cdot 0,1}{2 - 0,435} = 0,128;$$

$$x_2 = \frac{G_n \cdot x_n}{G_n - w_1 - w_2};$$

$$x_2 = \frac{2 \cdot 0,1}{2 - 0,435 - 0,467} = 0,182;$$

$$x_3 = \frac{G_n \cdot x_n}{G_n - w_1 - w_2 - w_3}.$$

$$x_3 = \frac{2 \cdot 0,1}{2 - 0,435 - 0,467 - 0,527} = 0,35.$$

## 2.6 Визначення коефіцієнтів теплопередачі

Коефіцієнт теплопередачі для кожного корпусу установки розраховується за формулою для плоскої багатошарової стінки, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{конд}}} + R_{\text{терм}} + \frac{1}{\alpha_{\text{куп}}}}, \quad (2.26)$$

де  $\alpha_{\text{конд}}$  – коефіцієнт тепловіддачі від нагрівальної пари, що конденсується, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\alpha_{\text{кип}}$  – коефіцієнт тепловіддачі до киплячого розчину, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$R_{\text{терм}}$  – сумарний термічний опір багат шарової стінки, (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

Сумарний термічний опір  $R_{\text{терм}}$  дорівнює термічному опору стінки труби і накипу. Термічний опір забруднень з боку пари не враховуємо.

Приймається:

- товщина стінки та теплопровідність труби  $\delta_{\text{ст}} = 2$  мм,  $\lambda_{\text{ст}} = 25,1$  Вт/(м·К);

- товщина та теплопровідність шару накипу  $\delta_{\text{нак}} = 0,5$  мм,  $\lambda_{\text{нак}} = 2$  Вт/(м·К).

Тоді сумарний термічний опір дорівнює, (м<sup>2</sup>·К)/Вт

$$R_{\text{терм}} = R_{\text{терм}} = \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{\delta_{\text{нак}}}{\lambda_{\text{нак}}} \quad (2.27)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від нагрівальної пари, що конденсується, до стінки кип'ятильної труби, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_{\text{конд}} = 1,21 \cdot \lambda_{\text{конд}} \cdot \left( \frac{\rho_{\text{конд}}^2 \cdot r_{\text{нт}} \cdot g}{\mu_{\text{конд}} \cdot H_{\text{онт}}} \right)^{0,33} \cdot q^{-0,33}, = A_{\text{конд}} \cdot q^{-0,33}, \quad (2.28)$$

де  $q$  - питоме теплове навантаження даного корпусу, Вт/м<sup>2</sup>;

$r_{\text{нт}}$  – теплота конденсації нагрівальної пари для даного корпусу (див. табл. 2.2), Дж/кг;

$H_{\text{онт}}$  – оптимальна висота рівня розчину в кип'ятильних трубах для даного корпусу, м;

$\rho_{\text{конд}}, \lambda_{\text{конд}}, \mu_{\text{конд}}$  - відповідно густина, теплопровідність та динамічна в'язкість конденсату при температурі конденсації нагрівальної пари  $t_{\text{нт}}$  для даного корпусу (див. додаток К);

$g$  – прискорення вільного падіння, м<sup>2</sup>/с.

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до киплячого розчину у вертикальних трубах при його природній циркуляції, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_{\text{кип}} = b \cdot \left( \frac{\rho_p \cdot \lambda_p^2}{\mu_p \cdot \sigma_p \cdot T_{\text{ск}}} \right)^{0.33} \cdot q^{0.67} = A_{\text{кип}} \cdot q^{0.67}, \quad (2.29)$$

де  $q$  - питоме теплове навантаження даного корпусу, Вт/м<sup>2</sup>;

$T_{\text{ск}}$  – абсолютна середня температура кипіння розчину для даного корпусу (див. табл. 2.6), К;

$\rho_p, \mu_p, \lambda_p, \sigma_p$  – відповідно густина, динамічна в'язкість, питома теплоємність, теплопровідність та поверхневий натяг розчину при температурі кипіння в середньому перерізі кип'ятильних труб  $t_{\text{ск}}$  даного корпусу (розрахунок див. додатки А, Б, Г, Д, Е);

$b$  – коефіцієнт.

Значення коефіцієнту  $b$  визначають за формулою

$$b = 0.075 \cdot \left[ 1 + 10 \cdot \left( \frac{\rho_p}{\rho_n} - 1 \right)^{-0.67} \right], \quad (2.30)$$

де  $\rho_n$  - густина водяної пари при тиску в середньому перерізі кип'ятильних труб  $P_c$  даного корпусу ( $P_c$  див. табл. 2.5), кг/м<sup>3</sup>.

З урахуванням рівнянь (2.28) і (2.29) вираз (2.26) для коефіцієнта теплопередачі набуде вигляду

$$k = \frac{1}{\frac{1}{A_{\text{конд}} \cdot q^{-0.33}} + R_{\text{терм}} + \frac{1}{A_{\text{кип}} \cdot q^{0.67}}},$$

а питоме теплове навантаження  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>

$$q = k \cdot \Delta t = \frac{\Delta t}{\frac{1}{A_{\text{конд}} \cdot q^{-0,33}} + R_{\text{терм}} + \frac{1}{A_{\text{кип}} \cdot q^{0,67}}},$$

де  $\Delta t$  – корисна різниця температур даного корпусу установки, °С.

Останній вираз може бути перетворено до вигляду

$$q \cdot \left( \frac{1}{A_{\text{конд}} \cdot q^{-0,33}} + R_{\text{терм}} + \frac{1}{A_{\text{кип}} \cdot q^{0,67}} \right) = \Delta t,$$

звідки

$$\frac{1}{A_{\text{кон}}} \cdot q^{1,33} + R_{\text{терм}} \cdot q + \frac{1}{A_{\text{кип}}} \cdot q^{0,33} - \Delta t = 0. \quad (2.31)$$

### 2.6.1 Розрахунок коефіцієнта теплопередачі

Для кожного корпусу випарної установки за відомими значеннями температури нагрівальної пари і середньої температури кипіння розчину виконуємо розрахунок теплофізичних властивостей конденсату, нагрівальної пари і киплячого розчину. Результати розрахунку заносимо до таблиці 2.7.

В'язкість розчинів у діапазоні температур від 0 до 200 °С розраховується за формулою

$$\lg \mu = \lg \mu_{\text{H}_2\text{O}} + (d_0 + d_1 \cdot t + d_2 \cdot t^2) \cdot x,$$

де  $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$  – динамічний коефіцієнт в'язкості води при заданій температурі, Па·с;

$x$  – концентрація розчиненої речовини, кг речовини/кг розчину;

$t$  – температура, °С;

$d_0, d_1, d_2$  – коефіцієнти.

Для КОН

$$d_0 = 118,7 \cdot 10^{-2};$$

$$d_1 = 17,06 \cdot 10^{-4};$$

$$d_2 = -1098,35 \cdot 10^{-9};$$

Тоді

$$\begin{aligned} \lg \mu_1 &= \lg(0,0002276) \\ &+ (118,7 \cdot 10^{-2} + 17,06 \cdot 10^{-4} \cdot 127,5 - 1098,35 \cdot 127,5^2) \cdot 0,128 \\ &= -3,46, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lg \mu_2 &= \lg(0,0002276) \\ &+ (118,7 \cdot 10^{-2} + 17,06 \cdot 10^{-4} \cdot 115,5 - 1098,35 \cdot 115,5^2) \cdot 0,184 \\ &= -3,35 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lg \mu_3 &= \lg(0,0002276) + (118,7 \cdot 10^{-2} + 17,06 \cdot 10^{-4} \cdot 97 - 1098,35 \cdot 97^2) \cdot 0,35 \\ &= -3,06 \end{aligned}$$

Тоді

$$\mu_1 = 10^{-3,46} = 0,00034;$$

$$\mu_2 = 10^{-3,35} = 0,00044;$$

$$\mu_3 = 10^{-3,06} = 0,00088;$$

Теплоємність розчинів у діапазоні температур від 0 до 200 °С розраховується за формулою

$$c = \lg c_{H_2O} + (f_0 + f_1 \cdot x + f_2 \cdot t + f_3 \cdot t^2) \cdot x,$$

де  $c_{H_2O}$  – динамічний коефіцієнт в'язкості води при заданій температурі, Па·с;

$x$  – концентрація розчиненої речовини, кг речовини/кг розчину;

$t$  – температура, °С;

$f_0, f_1, f_2, f_3$  – коефіцієнти.

Для КОН

$$f_0 = -5343,49;$$

$$f_1 = 2356,87;$$

$$f_2 = 10,43;$$

$$f_3 = 4,76 \cdot 10^{-3}.$$

Тоді

$$c_1 = 4260 + (-5343,49 + 2356,87 \cdot 0,128 + 10,43 \cdot 127,5 + 4,76 \cdot 10^{-3} \cdot 127,5^2) \cdot 0,128 = 3792,32,$$

$$c_2 = 4240 + (-5343,49 + 2356,87 \cdot 0,184 + 10,43 \cdot 115,5 + 4,76 \cdot 10^{-3} \cdot 115,5^2) \cdot 0,184 = 4674,97$$

$$c_3 = 4219 + (-5343,49 + 2356,87 \cdot 0,35 + 10,43 \cdot 97 + 4,76 \cdot 10^{-3} \cdot 97) \cdot 0,35 = 4222,65$$

Коефіцієнт теплопровідності розчину, Вт/(м·К)

$$\lambda = \lambda_{H_2O} \cdot (1 - \beta \cdot x),$$

де  $\lambda_{H_2O}$  – коефіцієнт теплопровідності розчину при заданій температурі, Вт/(м·К);

$x$  – концентрація розчиненої речовини, кг речовини/кг розчину;

$t$  – температура, °С;

$\beta = 130,74 \cdot 10^{-3}$  – коефіцієнт (представлено в таблиці Г.1 [1]).

$$\lambda_1 = 0,686 \cdot (1 - 130,74 \cdot 10^{-3} \cdot 0,128) = 0,6745,$$

$$\lambda_2 = 0,686 \cdot (1 - 130,74 \cdot 10^{-3} \cdot 0,184) = 0,6695,$$

$$\lambda_3 = 0.682 \cdot (1 - 130.74 \cdot 10^{-3} \cdot 0.35) = 0.6546.$$

Поверхневий натяг розчину, Н/м

$$\sigma = \sigma_0 + 0,049(1 - a_w),$$

де  $\sigma_0$  – поверхневий натяг води, Н/м;

$a_w$  – активність води у розчині;

Поверхневий натяг води при заданій температурі розраховується за залежністю

$$\sigma_0 = 7,56662 \cdot 10^{-2} - 1,42939 \cdot 10^{-4} \cdot t - 2,52178 \cdot 10^{-7} \cdot t^2$$

Тоді

$$\begin{aligned} \sigma_{01} &= 7,56662 \cdot 10^{-2} - 1,42939 \cdot 10^{-4} \cdot 127,5 - 2,52178 \cdot 10^{-7} \cdot 127,5^2 \\ &= 0,0533; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{02} &= 7,56662 \cdot 10^{-2} - 1,42939 \cdot 10^{-4} \cdot 115,5 - 2,52178 \cdot 10^{-7} \cdot 115,5^2 \\ &= 0,0558; \end{aligned}$$

$$\sigma_{03} = 7,56662 \cdot 10^{-2} - 1,42939 \cdot 10^{-4} \cdot 97 - 2,52178 \cdot 10^{-7} \cdot 97^2 = 0,0594.$$

Активність води у розчині

$$\lg a_w = (F + Q \cdot \frac{N}{K}) \cdot \frac{N}{K}$$

де F, Q, K - коефіцієнти;

$t$  – температура, °C;

$N$  - концентрація розчиненої речовини, що виражена в моль речовини на 1000 моль розчинника, моль/кмоль.

Концентрація розчиненої речовини, що виражена в моль речовини на 1000 моль розчинника, моль/кмоль.

$$N = \frac{18020 \cdot x}{M \cdot (1 - x)},$$

де  $x$  – концентрація розчиненої речовини, кг речовини/кг розчину;

$M=56,11$  – молекулярна маса розчиненої речовини (див. табл. Д.1 [1]), кг.

$$N_1 = \frac{18020 \cdot 0,128}{56,11 \cdot (1 - 0,128)} = 47,45,$$

$$N_2 = \frac{18020 \cdot 0,184}{56,11 \cdot (1 - 0,184)} = 72,59,$$

$$N_3 = \frac{18020 \cdot 0,135}{56,11 \cdot (1 - 0,35)} = 172,93.$$

Коефіцієнти  $F$ ,  $Q$  розраховуються за формулами

$$F = f_0 + f_1 \cdot t + f_2 \cdot t^2$$

$f_0, f_1, f_2$  – коефіцієнти (див. табл. Д.1 [1]);

Для КОН

$$f_0 = -1736,0 \cdot 10^{-6};$$

$$f_1 = -4,64 \cdot 10^{-6};$$

$$f_2 = -0,0121 \cdot 10^{-6};$$

$$F_1 = -1736,0 \cdot 10^{-6} + (-4,64 \cdot 10^{-6} \cdot 127,5) + (-0,0121 \cdot 10^{-6} \cdot 127,5^2) \\ = -0,00252$$

$$F_2 = -1736,0 \cdot 10^{-6} + (-4,64 \cdot 10^{-6} \cdot 115,5) + (-0,0121 \cdot 10^{-6} \cdot 115,5^2) \\ = -0,00243$$

$$F_3 = -1736,0 \cdot 10^{-6} + (-4,64 \cdot 10^{-6} \cdot 97) + (-0,0121 \cdot 10^{-6} \cdot 97) = -0,0023$$

$$Q = q_0 + q_1 \cdot t + q_2 \cdot t^2$$

$q_0, q_1, q_2$  – коефіцієнти (див. табл. Д.1 [1]);

Для КОН

$$q_0 = -2446,4,0 \cdot 10^{-8};$$

$$q_1 = 14,331 \cdot 10^{-8};$$

$$q_2 = -0,0355 \cdot 10^{-8};$$

$$Q_1 = (-2446,4,0 + 14,331 \cdot 127,5 - 0,0355 \cdot 127,5^2) \cdot 10^{-8} = -1,196 \cdot 10^{-5}$$

$$Q_2 = (-2446,4,0 + 14,331 \cdot 115,5 - 0,0355 \cdot 115,5^2) \cdot 10^{-8} = -1,264 \cdot 10^{-5}$$

$$Q_3 = (-2446,4,0 + 14,331 \cdot 97 - 0,0355 \cdot 97^2) \cdot 10^{-8} = -1,39 \cdot 10^{-5}$$

Активність води у розчині

$$lga_{w1} = \left( -0,00252 + (-1,196 \cdot 10^{-5}) \cdot \frac{47,45}{2} \right) \cdot \frac{47,45}{2} = -0,0666$$

$$lga_{w2} = \left( -0,00243 + (-1,264 \cdot 10^{-5}) \cdot \frac{72,59}{2} \right) \cdot \frac{72,59}{2} = -0,105$$

$$lga_{w3} = \left( -0,00229 + (-1,390 \cdot 10^{-5}) \cdot \frac{172,93}{2} \right) \cdot \frac{172,93}{2} = -0,303.$$

Тоді

$$a_{w1} = 10^{-0,0666} = 0,8578;$$

$$a_{w1} = 10^{-0,105} = 0,7853;$$

$$a_{w1} = 10^{-0,3028} = 0,49.$$

Поверхневий натяг розчину, Н/м

$$\sigma_1 = 0,0533 + 0,049(1 - 0,8578) = 0,0603,$$

$$\sigma_2 = 0,0558 + 0,049(1 - 0,7853) = 0,0663,$$

$$\sigma_3 = 0,059 + 0,049(1 - 0,498) = 0,084.$$

Визначення коефіцієнта теплопередачі виконується окремо для кожного корпусу випарної установки в наступній послідовності:

1. За формулами (2.27) - (2.30) розраховуються: сумарний термічний опір стінки кип'ятильної труби  $R_{терм}$ , коефіцієнти  $A_{конд}$  і  $A_{кип}$ .

$$R_{терм} = \frac{0,002}{25,1} + \frac{0,0005}{2} = 0,00033.$$

2. Виконується графічне рішення рівняння (2.31) при цьому, ліву частину рівняння позначимо через  $\Psi$ :

- в першому наближенні задаються значенням питомого теплового навантаження  $q'$  і визначають величину  $\Psi'$  за формулою, °С

$$\Psi' = \frac{1}{A_{\text{кон}}} \cdot q'^{1,33} + R_{\text{терм}} \cdot q' + \frac{1}{A_{\text{кип}}} \cdot q'^{0,33} - \Delta t.$$

В системі координат  $\Psi - q$  будуємо точку № 1 (див. рис. 2.1);  
 - у другому наближенні задаються значенням питомого теплового навантаження  $q''$  і визначають величину  $\Psi''$  за формулою, °C

$$\Psi'' = \frac{1}{A_{\text{кон}}} \cdot q''^{1,33} + R_{\text{терм}} \cdot q'' + \frac{1}{A_{\text{кип}}} \cdot q''^{0,33} - \Delta t.$$

В системі координат  $\Psi - q$  будуємо точку № 2 (див. рис. 2.1);  
 - через точки № 1 і № 2 проводимо пряму лінію.

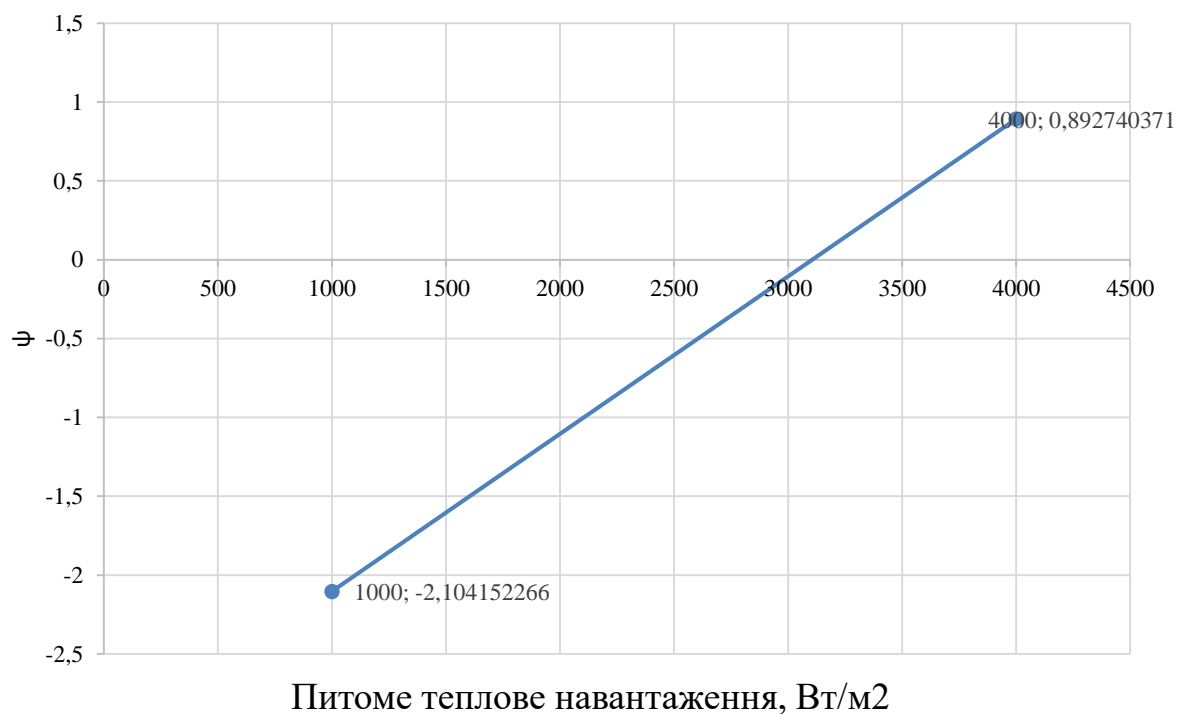


Рисунок 2.1 - Графічне визначення питомого теплового навантаження

У точці перетину цієї прямої з віссю абсцис визначаємо шукану величину питомого теплового навантаження даного корпусу  $q = 3100$  Вт/м<sup>2</sup>.

3. Розрахунок коефіцієнта теплопередачі виконуємо за формулою, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$k = \frac{q}{\Delta t},$$

де  $\Delta t$  - корисна різниця температур корпусу, який розраховується, °С, (див. табл. 2.6).

$$k_1 = \frac{3100}{5,61} = 552,6;$$

$$k_2 = \frac{3100}{8,58} = 361,31;$$

$$k_3 = \frac{3100}{16,13} = 192,319.$$

Таблиця 2.7 – Фізичні властивості парів і киплячих розчинів у середньому перерізі кип'ятильних труб по корпусах випарної установки

Параметр	1 корпус	2 корпус	3 корпус
Тиск нагрівальної пари $P_{нп}$ , Па	250000	170000	90000
Температура конденсації нагрівальної пари $t_{нп}$ , °С	127,5	115,5	97
Густина конденсату $\rho_{конд}$ , кг/м <sup>3</sup>	941,1	955,2	983,6
Теплопровідність конденсату $\lambda_{конд}$ , Вт/(м·К)	0,686	0,6855	0,682
Динамічна в'язкість конденсату $\mu_{конд}$ , Па·с	0,0002276	0,0002482	0,0002987
Тиск пари у середньому перерізі труб $P_c$ , Па	184586	103968	28083
Теплота пароутворення $r_c$ , Дж/кг	2208500	2254600	2338700
Середня температура кипіння розчину $t_{ск}$ , °С	121,894	106,924	80,866
Густина розчину $\rho_p$ , кг/м <sup>3</sup>	1049,7	1118,6	1329,1
Теплопровідність розчину $\lambda_p$ , Вт/(м·К)	0,6745	0,6695	0,6546
Теплоємність розчину $c_p$ , Вт/(кг·К)	3792,32	4674,97	4222,65
Динамічна в'язкість розчину $\mu_p$ , Па·с	0,00034	0,00044	0,00088
Поверхневий натяг $\sigma_p$ , Н/м	0,0603	0,0663	0,0840
Густина пари при тиску в середньому перерізі кип'ятильних труб $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>			

## 2.7 Розподіл корисній різниці температур

Розподіл корисної різниці температур за умовою випарювання розчину в установці з однаковою поверхнею нагрівання всіх корпусів виконуємо за формулами, °C

$$\Delta t_1 = \frac{\Sigma \Delta t \cdot \frac{Q_1}{k_1}}{\frac{Q_1}{k_1} + \frac{Q_2}{k_2} + \frac{Q_3}{k_3}};$$

де  $\Sigma \Delta t$  – сумарна корисна різниця температур випарної установки, °C.

$$\Delta t_1 = \frac{30.32 \cdot \frac{990830.23}{552.58}}{\frac{990830.23}{552.58} + \frac{1006691.88}{361.31} + \frac{102907.196}{192.19}} = 5.47$$

$$\Delta t_2 = \Delta t_1 \cdot \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{Q_2}{Q_1};$$

$$\Delta t_2 = 5,47 \cdot \frac{552.58}{361.31} \cdot \frac{1006691.88}{990830.23} = 8.5;$$

$$\Delta t_3 = \Delta t_1 \cdot \frac{k_1}{k_3} \cdot \frac{Q_3}{Q_1};$$

$$\Delta t_3 = 5,47 \cdot \frac{552.58}{192.19} \cdot \frac{102907.196}{990830.23} = 16,35.$$

Перевірка сумарної корисної різниці температур установки, °C

$$\Sigma \Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3.$$

$$\Sigma \Delta t = 5,47 + 8,5 + 16,35 = 30,32.$$

Поверхня нагріву корпусів установки, м<sup>2</sup>

$$F_1 = \frac{Q_1}{k_1 \cdot \Delta t_1};$$

$$F_1 = \frac{990830.23}{552.58 \cdot 5.47} = 327,71;$$

$$F_2 = \frac{Q_2}{k_2 \cdot \Delta t_2};$$

$$F_2 = \frac{1006691.88}{361.31 \cdot 8,5} = 327,71;$$

$$F_3 = \frac{Q_3}{k_3 \cdot \Delta t_3}.$$

$$F_3 = \frac{102907.196}{192.19 \cdot 16,35} = 327.71.$$

Корисні різниці температур, які розраховані в першому наближенні (див. табл. 2.6), і корисні різниці температур, які розподілені з умови рівності поверхонь нагріву корпусів, представлені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Корисні різниці температур

Корпуси	1	2	3
Розрахункові корисні різниці температур $\Delta t, ^\circ\text{C}$	5,61	8,58	16,13
Корисні різниці температур, які розподілені, $\Delta t, ^\circ\text{C}$	5,47	8,50	16,35

## 2.8 Коригування параметрів розчину і парів по корпусах установки

Як видно з таблиці 2.8 розподілені корисні різниці температур (за умовою рівності поверхонь нагрівання) і розраховані (з умови рівного перепаду тиску в корпусах) значно відрізняються. У зв'язку з цим проводиться коригування параметрів розчину і парів по корпусах установки. При цьому приймаються допущення про рівність температурних втрат (депресій)  $\Delta'$ ,  $\Delta''$ , и  $\Delta'''$ , як в першому, так і в другому наближенні.

### Перший корпус:

- температура нагрівальної пари  $t_{\text{нп}1}$  першого корпусу відповідає варіанту завдання на розрахунок випарної установки;
- середня температура кипіння розчину, °С

$$t_{\text{ск}1} = t_{\text{нп}1} - \Delta t_1;$$

де  $\Delta t_1$  - розподілена корисна різниця температур першого корпусу (див. табл. 2.8), °С;

$$t_{\text{ск}1} = 127,5 - 5,47 = 122,03;$$

- температура вторинної пари, °С

$$t_{\text{вп}1} = t_{\text{ск}1} - (\Delta'_1 + \Delta''_1).$$

$$t_{\text{вп}1} = 122,03 - (3,894 + 1,5) = 116,634.$$

### Другий корпус:

- температура нагрівальної пари, °С

$$t_{\text{нп}2} = t_{\text{вп}1} - \Delta'''_1;$$

$$t_{\text{нп } 2} = 116,634 - 1 = 115,634;$$

- середня температура кипіння розчину, °С

$$t_{\text{ск } 2} = t_{\text{нп } 2} - \Delta t_2;$$

де  $\Delta t_2$  - розподілена корисна різниця температур другого корпусу (див. табл. 2.8), °С;

$$t_{\text{ск } 2} = 115,634 - 8,5 = 107,13;$$

- температура вторинної пари, °С

$$t_{\text{вп } 2} = t_{\text{ск } 2} - (\Delta'_2 + \Delta''_2).$$

$$t_{\text{вп } 2} = 107,13 - (5,924 + 3) = 98,208.$$

Третій корпус:

- температура нагрівальної пари, °С

$$t_{\text{нп } 3} = t_{\text{вп } 2} - \Delta'''_2;$$

$$t_{\text{нп } 3} = 98,208 - 1 = 97,208;$$

- середня температура кипіння розчину, °С

$$t_{\text{ск } 3} = t_{\text{нп } 3} - \Delta t_3;$$

де  $\Delta t_3$  - розподілена корисна різниця температур третього корпусу (див. табл. 2.8), °С;

$$t_{\text{CK}3} = 97.208 - 16.35 = 80.86;$$

- температура вторинної пари, °C

$$t_{\text{ВП}3} = t_{\text{CK}3} - (\Delta'_3 + \Delta''_3).$$

$$t_{\text{ВП}3} = 80.86 - (12.866 + 21) = 46.996.$$

Барометричний конденсатор:

- температура конденсації пари в конденсаторі, °C

$$t_{\text{БК}} = t_{\text{ВП}3} - \Delta'''_3.$$

$$t_{\text{БК}} = 46,996 - 1 = 45,996.$$

За таблицями термодинамічних властивостей води і водяної пари в стані насичення [1] за температурами парів  $t_{\text{НП}}$ ,  $t_{\text{ВП}}$ ,  $t_{\text{БК}}$  визначаємо їх тиск  $P_{\text{НП}}$ ,  $P_{\text{ВП}}$ ,  $P_{\text{БК}}$ . Результати теплового розрахунку випарної установки заносимо до таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Результати теплового розрахунку, які скориговані з умови рівності поверхонь нагрівання корпусів випарної установки

Параметр	Позначення	Корпус			Конденсатор
		1	2	3	
Кількість випареної води, кг/с	$w$	0,435	0,467	0,527	-
Скоригована кінцева концентрація розчину, %	$x$	0,128	0,182	0,350	-
Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$k$	552,58	361,31	192,19	-
Розподілена корисна різниця температур, °С	$\Delta t$	5,47	8,50	16,35	-
Поверхня нагрівання, м <sup>2</sup>	$F$	327,71	327,71	327,71	-
Середня температура кипіння розчину, °С	$t_{ск}$	122,03	107,13	80,86	-
Температура вторинної пари, °С	$t_{вп}$	116,634	98,208	46,996	-
Тиск вторинної пари, Па	$P_{вп}$	179000	95000	10500	-
Температура нагрівальної пари, °С	$t_{нп}$	127,5	115,634	97,208	-
Тиск вторинної пари, Па	$P_{вп}$	251200	171100	92500	-
Температура конденсації пари в конденсаторі, °С	$t_{бк}$				45,996
Тиск пари барометричного конденсатору, Па	$P_{бк}$				10001

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано розрахунок трьох корпусної випарної установки з природньою циркуляцією. Речовиною для випарювання є водний розчин КОН з витратою 2 кг/с. Вихідними даними були задані початкова та кінцева концентрації, які дорівнюють 10 % та 35 % відповідно, висота кип'ятильних дорівнює 3,6 м. Розчин надходить для випарювання з початковою температурою, що дорівнює температурі кипіння розчину в паровому просторі першого корпусу установки.

У результаті розрахунку:

1. Визначено продуктивність установки по воді, що випарюється для кожного корпусу.
2. Розраховані кінцеві концентрації розчину, які склали 12,8 %, 18,2 % та 35 % відповідно.
3. Визначено гідродинамічну, гідростатичну та температурні депресії.
4. Виконано розрахунок теплових навантажень та коефіцієнтів теплопередачі.
5. Графоаналітичним методом визначено питоме теплове навантаження, яке склало 3100 Вт/м<sup>2</sup>.
6. Виконано розрахунок корисної різниці температур та площі поверхні теплообміну корпусів, що склали 327,7 м<sup>2</sup>.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Каюков Ю.М., Назаренко І.А., Кузьменко А.А. Теплотехнологічні процеси та установки. Методичні вказівки до виконання індивідуального завдання для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавр спеціальності 144 «Теплоенергетика» освітньо-професійної програми «Промислова і комунальна теплоенергетика». Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2022. 43 с.
2. Мінаковський В.М. Теплотехнологічні процеси та установки: посібник.- Київ:НТУУ «КПІ»,2009. - 128 с.
3. Календер'ян В.О., Бошкова І.Л. Збірник задач по тепломасообмінним апаратам: навч.посіб.- Одеса: ОДАХ, 2010.-142 с.
4. Клименко В.В., Кравченко В.І., Телюта Р.В. Енергозбереження в теплотехнологічних процесах і установках: навч.посіб.- Кропивницький:ПП Ексклюзив-Систем, 2020. - 219с.
5. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник/ за ред.І.Ф.Малежика.- Київ: НУХТ, 2003. - 400с.
6. Кулінченко В.Р. Випарювання і випарні апарати у розрахунках і конструюванні - Київ: Кондор, 2006. - 260 с.
7. Ткаченко С.Й.,СпівакО.Ю. Сушильні процеси та установки: навч.посіб. - Вінниця: ВНТУ, 2007. - 76 с.
8. Куба В.В., Середа В.В. Теплотехнологічні процеси та установки. Розділ «Установка сушильна тунельна»: навч.посіб. -Рівне: НУВГП, 2012. - 81 с.
9. Луняка К.В.,Димо Б.В.,Андрєєва Н.Б.,Калініченко І.В.Розрахунки з дисципліни «Теплотехнологічні процеси та установки: навч.посіб.- Херсон:ХНТУ, 2019. - 166 с.
- 10.Христин Є.В. Теплотехнологічні процеси та установки на залізничному транспорті: навч.посіб. -Дніпро: ДНУЗТ, 2015. - 269 с.

11. Долгополов І.С., Тучин В.Т., Садовой О.В., Кошлак Г.В. Телотехнологічні процеси та установки: задачі та приклади розрахунків- Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. - 149 с.
12. Кошельник В.М., Шульгін Ю.В., Кошельник О.В., Соловей В.В. Основи проектування теплотехнічних установок підприємств промисловості будівельних матеріалів: навч. посібник.- Харків: Вид-во «Підручник НТУ «ХПИ», 2013.- 216 с.
13. Кутний Б.А. Курс лекцій з дисципліни «Теплотехнологічні процеси і установки» - Полтава: НУПІ, 2020. - 51 с.