

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

**Методичні вказівки
до виконання індивідуального завдання
Теплотехнологічні процеси та установки
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавр
спеціальності 144 «Теплоенергетика»
освітньо-професійної програми «Теплоенергетика»**

Методичні вказівки до виконання індивідуального завдання
Теплотехнологічні процеси та установки для здобувачів ступеня
вищої освіти бакалавр спеціальності 144 «Теплоенергетика»
освітньо-професійної програми «Теплоенергетика»./Укл.: Кузьменко
А.А., Каюков Ю.М., Назаренко І.А., Запоріжжя: НУЗП, 2022. 49 с.

Укладачі: Кузьменко А.А., старш. викладач;
Каюков Ю.М., доц. канд.техн.наук;
Назаренко І.А., доц. канд.техн.наук.

Рецензент Назаренко О.М., доц. канд.техн.наук.
Відповідальний за випуск Яримбаш Д.С., професор
докт.техн.наук.

Затверджено на засіданні
кафедри «Електричні машини»
Протокол № 10 від 10.05.2022

Рекомендовано до видання
НМК Електротехнічного факультету
Протокол № 2 від 02.06.2022 р.

ЗМІСТ

Передмова.....	5
1 Основні відомості про процес випарювання.....	7
1.1 Випарювання як технологічний процес.....	7
1.2 Принцип роботи випарного апарату з природною циркуляцією.....	7
1.3 Багатокорпусна випарна установка.....	8
2 Вихідні дані до розрахунку.....	11
3 Розрахункова частина трикорпусної прямої випарної установки.....	13
3.1 Розподіл води, що випарюється.....	13
3.2 Визначення концентрацій розчину, що випарюється.....	14
3.3 Визначення температур кипіння розчинів.....	16
3.3.1 Гідродинамічна депресія та фізичні характеристики вторинної пари.....	16
3.3.2 Температура кипіння розчину в паровому просторі по корпусах випарної установки.....	17
3.3.2.1 Теоретичні відомості.....	17
3.3.2.2 Розрахунок температурної депресії.....	18
3.3.2.3 Розрахунок температури початкового розчину і температур кипіння концентрованих розчинів.....	18
3.3.3 Середня температура кипіння розчину та визначення корисної різниці температур.....	19
3.3.3.1 Теоретичні відомості.....	19
3.3.3.2 Розрахунок гідростатичної депресії.....	20
3.3.3.3 Розрахунок середніх температур кипіння розчину та визначення корисної різниці температур.....	22
3.4 Визначення теплових навантажень.....	23
3.4.1 Теоретичні відомості.....	23
3.4.2 Розрахунок теплових навантажень.....	24
3.5 Визначення коефіцієнтів теплопередачі.....	26
3.5.1 Теоретичні відомості.....	26
3.5.2 Розрахунок коефіцієнту теплопередачі.....	29
3.6 Розподіл корисної різниці температур.....	31
3.7 Коригування параметрів розчину і парів по корпусах установки.....	32

Література.....	35
Додаток А Густина розчинів.....	36
Додаток Б В'язкість розчинів.....	38
Додаток В Теплоємність розчинів.....	40
Додаток Г Теплопровідність розчинів.....	42
Додаток Д Активність води.....	44
Додаток Е Поверхневий натяг.....	47
Додаток К.....	48

ПЕРЕДМОВА

У техніці процес випарювання набув широкого поширення, так як чимало речовини отримують у вигляді слабких водних розчинів, а в готовому для споживання, зберігання, або транспорту вигляді, вони повинні бути зневоднені.

При випарюванні зазвичай здійснюється часткове видалення розчинника з усього об'єму розчину при його температурі кипіння. Тому випарювання принципово відрізняється від випаровування, яке відбувається з поверхні розчину за будь-яких температур нижчих за температуру кипіння.

Випарювання проводять в одиночних випарних апаратах. Однак найбільш поширені багатокорпусні випарні установки, що складаються з кількох випарних апаратів або корпусів.

Основним **завданнями** вивчення дисципліни «Теплотехнологічні процеси та установки» є: оволодіння студентами методиками розрахунків теплотехнологічних процесів та установок.

У результаті вивчення теми «Випарні апарати» першого розділу робочої програми навчальної дисципліни студент повинен

знати:

- основні принципи і тенденції у створенні високоефективних випарних апаратів та установок;
- призначення і класифікацію випарних апаратів та випарних установок;
- основні теорії і розрахунок процесів випарювання;

вміти:

- розраховувати параметри стану теплоносіїв у випарних апаратах та установках;
- розраховувати необхідні витрати теплоносіїв.
- виконувати тепловий та конструктивний розрахунок випарних апаратів та установок;
- розраховувати геометричні розміри випарних апаратів та установок.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні досягти таких **компетентностей:**

1. Здатність застосовувати системний підхід, знання сучасних технологій та методів при проектуванні та експлуатації випарної техніки.

2. Здатність застосувати розуміння питань використання технічної літератури та інших джерел інформації в теплоенергетичній галузі.

У даних методичних вказівках розглянуто методику розрахунку трикорпусної прямої випарної установки. Чисельні значення величин, використаних у завданнях, студенти вибирають з таблиць вихідних даних (див. Розділ 2) відповідно до заданого викладачем варіанту.

Кожний студент оформлює індивідуальний звіт про виконану роботу. Звіт має містити: ціль роботи, необхідні теоретичні відомості, схему випарної установки, таблиці результатів, основні розрахунки та мотивовані висновки.

1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПРОЦЕС ВИПАРЮВАННЯ

1.1 Випарювання як технологічний процес

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.

1.2 Принцип роботи випарного апарата з природною циркуляцією

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.

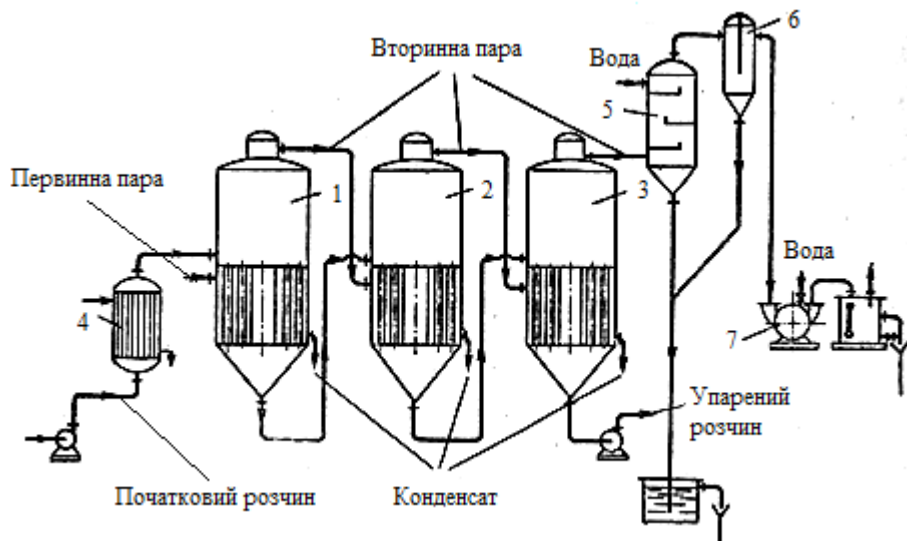
1.3 Багатокорпусна випарна установка

У більшості випадків випарні апарати безперервної дії компонується 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.

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

Установка складається з трьох корпусів. Початковий розчин (слабкий розчин), зазвичай попередньо нагрітий до температури кипіння, надходить до першого корпусу, що обігрівается 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.

Аналогічно випарений розчин з другого корпусу переміщується самопливом до третього корпусу, який обігрівается 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.

2 ВИХІДНІ ДАНІ ДО РОЗРАХУНКУ

Розрахувати трикорпусну прямоточну випарну установку з природною циркуляцією розчину для концентрування G_n кг/с водного розчину нелеткої речовини з початковою концентрацією x_n , % (мас.). Кінцева концентрація розчину x_k , % (мас.). Розчин надходить для випарювання з початковою температурою t_{kn} , що дорівнює температурі кипіння розчину в паровому просторі першого корпусу установки, °С. Абсолютний тиск водяної пари, що гріє, P_{nn1} , Па. Висота кип'ятильних труб H , м. Абсолютний тиск в барометричному конденсаторі $P_{\delta k}$, Па.

Чисельні значення вихідних величин представлено в таблиці 2.1. Хімічні формули нелетких речовин, розчин яких випарюється, представлено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.1 - Вихідні дані до розрахунку трикорпусної випарної установки

Номер варіанта	x_n , %	H , м	P_{nn1} $\cdot 10^{-6}$, Па	$P_{\delta k}$ $\cdot 10^{-6}$, Па	x_k , %	G_n , кг/с
1	10,0	3,6	0,25	0,01	35,0	2,0
2	10,1	3,8	0,275	0,011	35,5	2,2
3	10,2	4,0	0,3	0,012	36,0	2,4
4	10,3	4,2	0,325	0,013	36,5	2,6
5	10,4	4,4	0,35	0,014	37,0	2,8
6	10,5	4,6	0,375	0,015	37,5	3,0
7	10,6	4,8	0,4	0,016	38,0	3,2
8	10,7	5,0	0,425	0,017	38,5	3,4

продовження таблиці 2.1

9	10,8	5,2	0,45	0,018	39,0	3,6
10	10,9	5,4	0,5	0,019	39,5	3,8
11	11,0	5,6	0,55	0,02	40,0	4,0
12	10,0	4,0	0,4	0,01	37	3,0
13	10,5	4,5	0,5	0,012	40	3,8
14	11,0	5,0	0,6	0,015	43,0	4,6

Таблиця 2.2 - Хімічні формули нелетких речовин

Номер варіанта	Розчинна речовина	Номер варіанта	Розчинна речовина
1	$CaCl_2$	3	K_2CO_3
2	KOH	4	$NaOH$

3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА ТРИКОРПУСНОЇ ПРЯМОТОЧНОЇ ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ

Поверхню нагрівання кожного корпусу випарної установки визначають за основним рівнянням теплопередачі, м²

$$F_n = \frac{Q_n}{k_n \cdot \Delta t_n},$$

де Q – теплове навантаження, Вт;
 k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м·К);
 Δt – корисна різниця температур, °С;
 n – номер корпусу випарної установки.

Для визначення теплових навантажень Q , коефіцієнтів теплопередачі k_i корисних різниць температур Δt необхідно знати розподіл води, що випарюється, концентрації розчинів і їх температури кипіння за корпусами установки.

3.1 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.

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:

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

$$w_2 = \frac{1,05 \cdot W}{1 + 1,05 + 1,15} ;$$

$$w_3 = \frac{1,15 \cdot W}{1 + 1,05 + 1,15} .$$

Перевірка розрахунку

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

3.2 Визначення концентрацій розчину, що випарюється

Кінцева концентрація розчину за корпусами, %:

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

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

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

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

Результати розрахунків заносимо до таблиці 3.1.

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.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку концентрацій

Найменування показника, розмірність	Позначення	Значення
Продуктивність за вихідним розчином, кг/с	G_n	
Початкова концентрація, %	x_n	
Кінцева концентрація, %	x_k	
Кількість випареної води, кг/с:	W	
у першому корпусі, кг/с	w_1	
у другому корпусі, кг/с	w_2	
у третьому корпусі, кг/с	w_3	
Кінцева концентрація розчину:		
у першому корпусі, кг/с	x_1	
у другому корпусі, кг/с	x_2	
у третьому корпусі, кг/с	x_3	

Перевіряємо тиск пари у барометричному конденсаторі, Па

$$P_{бк} = P_{нп 3} - \frac{\Delta P_{заг}}{3}.$$

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

По таблицях термодинамічних властивостей води і водяної пари в стані насичення[1] за значеннями тисків $P_{нп}$ знаходимо відповідні температури нагрівальної пари $t_{нп}$ і теплоту їх пароутворення $r_{нп}$. Результати розрахунків заносимо до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Фізичні характеристики нагрівальної пари кожного корпусу випарної установки

№ корпусу	Тиск, $P_{нп}$, Па	Температура, $t_{нп}$, °C	
1			
2			
3			
Барометричний конденсатор			

3.3 Визначення температур кипіння розчинів

3.3.1 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 $\Delta''' = (0,5 \dots 1,5)$ °C на корпус. Прийемо для кожного корпусу $\Delta''' = 1,0$ °C. Тоді температури вторинної пари в корпусах, °C:

$$t_{ен1} = t_{нп2} + \Delta'''_1;$$

$$t_{ен2} = t_{нп3} + \Delta'''_2;$$

$$t_{ен3} = t_{бк} + \Delta'''_3.$$

Сума гідравлічних депресій, °C

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

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

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 3.3.

Таблиця 3.3 – Фізичні характеристики вторинної пари кожного корпусу випарної установки

№ корпусу	Температура $t_{en}, ^\circ\text{C}$	Тиск P_{en} , Па	Ентальпія пари i_{en} , Дж/кг	Теплота пароутворення r_{en} , Дж/кг
1				
2				
3				

3.3.2 Температура кипіння розчину в паровому просторі по корпусах випарної установки

3.3.2.1 Теоретичні відомості

Температурна депресія водного розчину, $^\circ\text{C}$, при нормальному атмосферному тиску $P_{атм} = 101325$ Па

$$\Delta'_{атм} = t_p - 100, \quad (3.1)$$

де t_p – температура кипіння розчину при нормальному атмосферному тиску, $^\circ\text{C}$, залежно від його концентрації (див. [2] табл. XXXVI).

Температурна депресія при тиску вторинної пари по корпусах випарної установки, $^\circ\text{C}$

$$\Delta' = 0,01623 \cdot \frac{T_{en}^2}{r_{en} \cdot 10^{-3}} \cdot \Delta'_{атм}, \quad (3.2)$$

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

Температура кипіння початкового і концентрованого (кінцевого) розчинів у паровому просторі корпусу випарної установки (при тиску вторинної пари), $^\circ\text{C}$

$$t_k = t_{en} + \Delta', \quad (3.3)$$

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

Δ' – температурна депресія, °C.

3.3.2.2 Розрахунок температурної депресії

Для початкового розчину і концентрованих розчинів кожного корпусу випарної установки розрахунок температурної депресії при нормальному атмосферному тиску виконуємо за формулою (3.1), °C:

$$\Delta'_{атм n} = t_{p n} - 100; \Delta'_{атм 1} = t_{p 1} - 100;$$

$$\Delta'_{атм 2} = t_{p 2} - 100; \Delta'_{атм 3} = t_{p 3} - 100.$$

Температурну депресію для початкового розчину і концентрованих розчинів кожного корпусу випарної установки (при тиску вторинної пари) виконуємо за формулою (3.2), °C:

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

$$\begin{aligned} \Delta'_2 &= 0,01623 \cdot \frac{T_{en2}^2}{r_{en2} \cdot 10^{-3}} \cdot \Delta'_{атм 2}; & \Delta'_3 \\ &= 0,01623 \cdot \frac{T_{en}^2}{r_{en} \cdot 10^{-3}} \cdot \Delta'_{атм 3}. \end{aligned}$$

Сума температурних депресій по корпусах установки, °C

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

3.3.2.3 Розрахунок температури початкового розчину і температури кипіння концентрованих розчинів

Розрахунок температури початкового розчину $t_{\kappa n}$ і температуркипіння концентрованих розчинів t_{κ} у паровому просторі кожного корпусу випарної установки виконуємо за формулою (3.3), °C:

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

$$t_{\kappa 2} = t_{en 2} + \Delta'_2; t_{\kappa 3} = t_{en 3} + \Delta'_3.$$

Результати розрахунку температурної депресії по корпусах, температур початкового розчину та концентрованих розчинів заносимо до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Температура кипіння розчину в паровому просторі по корпусах випарної установки

№ корпусу	Температура, t_{en} °C	Тиск, P_{en} , Па	$\Delta'_{амм}$, °C	Δ' , °C	t_{κ} , °C
Початковий розчин					
1					
2					
3					

3.3.3 Середня температура кипіння розчину та визначення корисної різниці температур

3.3.3.1 Теоретичні відомості

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

$$P_c = P_{en} + 0.5 \cdot \rho_p \cdot g \cdot H_{omt}, \quad (3.5)$$

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

$P_{вн}$ – тиск вторинної пари, Па;

g – прискорення вільного падіння, м²/с;

ρ_p – густина розчину, що кипить, кг/м³.

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

$$H_{opt} = [0,26 + 0,0014 \cdot (\rho_p - \rho_e)] \cdot H, \quad (3.6)$$

де ρ_p – густина розчину при температурі кипіння, кг/м³;

ρ_e – густина води при температурі кипіння, кг/м³;

H – висота кип'ятільних труб, м.

Гідростатична депресія за корпусами, °С

$$\Delta'' = t_{ce} - t_{вн}, \quad (3.7)$$

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

$t_{вн}$ – температура вторинної пари даного корпусу, °С.

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

$$t_{ck} = t_{нн} + \Delta' + \Delta'' + \Delta''', \quad (3.8)$$

де $t_{нн}$ – температура нагрівальної пари для наступного корпусу, °С і корисної різниці температур, Δt , °С

$$\Delta t = t_{нн} - t_{ck}, \quad (3.9)$$

де $t_{нн}$ – температура нагрівальної пари для даного корпусу, °С.

3.3.3.2 Розрахунок гідростатичної депресії

Розрахунок оптимальної висоти рівня розчину в кип'ятільних трубах корпусів установки виконуємо за формулою (3.6), м:

$$H_{\text{онм}1} = [0,26 + 0,0014 \cdot (\rho_{p1} - \rho_{e1})] \cdot H;$$

$$H_{\text{онм}2} = [0,26 + 0,0014 \cdot (\rho_{p2} - \rho_{e2})] \cdot H;$$

$$H_{\text{онм}3} = [0,26 + 0,0014 \cdot (\rho_{p3} - \rho_{e3})] \cdot H.$$

Розрахунок густини водних розчинів ρ_p при відповідних концентраціях і температурах наведено в **додатку А**. Густину води ρ_e при температурі кипіння визначить по таблиці К.1 (див. **додат. К**). В першому наближенні температуру кипіння розчину прийняти рівної $t_p = t_{en} + \Delta'$.

Тиск в середньому перерізі кип'ятильних труб P_c кожного корпусу розраховуємо за формулою (3.5), м:

$$P_{c1} = P_{en1} + 0.5 \cdot \rho_{p1} \cdot g \cdot H_{\text{онм}1};$$

$$P_{c2} = P_{en2} + 0.5 \cdot \rho_{p2} \cdot g \cdot H_{\text{онм}2};$$

$$P_{c3} = P_{en3} + 0.5 \cdot \rho_{p3} \cdot g \cdot H_{\text{онм}3}.$$

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

Результати розрахунку тиску в середньому перерізі кип'ятильних труб P_c та відповідні до цих тисків значення теплоти пароутворення і температури кипіння води заносимо до таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Теплота пароутворення й температура кипіння води в середньому перерізі кип'ятильних труб

№ корпусу	Тиск P_c , Па	Температура t_{ce} , °C	Теплота пароутворення, r_{ce} , Дж/кг
1			
2			
3			

За формулою (3.7) визначаємо гідростатичну депресію за корпусами, °C:

$$\Delta_1'' = t_{ce1} - t_{en1};$$

$$\Delta_2'' = t_{ce2} - t_{en2};$$

$$\Delta_3'' = t_{ce3} - t_{en3}.$$

Сума гідростатичних депресій, °C

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

3.3.3 Розрахунок середніх температур кипіння розчину та визначення корисної різниці температур

Середні температури кипіння розчинів у корпусах (див. формулу (3.8)), °C:

$$t_{ck1} = t_{nn2} + \Delta_1' + \Delta_1'' + \Delta_1''';$$

$$t_{ck2} = t_{nn3} + \Delta_2' + \Delta_2'' + \Delta_2''';$$

$$t_{ck3} = t_{ok} + \Delta_3' + \Delta_3'' + \Delta_3''';$$

Розрахункові корисні різниці температур за корпусами (у першому наближенні) визначаємо за формулою (3.9), °C:

$$\Delta t_1 = t_{nn1} - t_{ck1};$$

$$\Delta t_2 = t_{nn2} - t_{ck2};$$

$$\Delta t_3 = t_{nn3} - t_{ck3}.$$

Загальна корисна різниця температур випарної установки, °C

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

Перевірка сумарної корисної різниці температур

$$\Sigma \Delta t = t_{нн1} - t_{\bar{ок}} - (\Sigma \Delta' + \Sigma \Delta'' + \Sigma \Delta''').$$

Результати розрахунку температур кипіння розчинів і температурних втрат (депресій) заносимо до таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Розрахункові температурні параметри за корпусами

Параметр	Позначення	Корпус		
		1	2	3
Температурна депресія, °С	Δ'			
Гідростатична депресія, °С	Δ''			
Гідродинамічна депресія, °С	Δ'''			
Температура початкового розчину для першого корпусу, °С	$t_{кн}$		-	-
Температура кипіння концентрованого (кінцевого) розчину, °С	t_k			
Середня температура кипіння розчину, °С	$t_{ск}$			
Розрахункова корисна різниця температур, °С	Δt			

3.4 Визначення теплових навантажень

3.4.1 Теоретичні відомості

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

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

де Δ' – 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:

$$Q_1 = D_1 \cdot r_{н1} = 1,03 \cdot [w_1 \cdot (i_{ен1} - c_в \cdot t_{к1}) - G_n \cdot c_n \cdot (t_{кn} - t_{к1})]; \quad (3.10)$$

$$Q_2 = w_1 \cdot r_{н2} = 1,03 \cdot \left[\begin{array}{l} w_2 \cdot (i_{ен2} - c_в \cdot t_{к2}) - \\ -(G_n - w_1) \cdot c_1 \cdot (t_{к1} - t_{к2}) \end{array} \right]; \quad (3.11)$$

$$Q_3 = w_2 \cdot r_{н3} = 1,03 \cdot \left[\begin{array}{l} w_3 \cdot (i_{ен3} - c_в \cdot t_{к3}) - \\ -(G_n - w_1 - w_2) \cdot c_2 \cdot (t_{к2} - t_{к3}) \end{array} \right], \quad (3.12)$$

deD_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;

$t_{кn}$ - початкова температура розчину, який надходить до першого корпусу установки, °С (див. табл. 3.6);

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

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

$c_в$ – теплоємність води, Дж/(кг·К) (розрахунок виконується при температурі кипіння концентрованого (кінцевого) розчину $t_{к}$ даного корпусу, (див. додаток К)).

Рівняння балансу випарної установки по воді

$$W = w_1 + w_2 + w_3, \quad (3.13)$$

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

3.4.2 Розрахунок теплових навантажень

Розв'язання системи рівнянь (3.10) – (3.12) виконується у такій послідовності:

1. По корпусах установки виконується розрахунок:

1) коефіцієнтів випаровування

$$\alpha_1 = \frac{r_{нн1}}{i_{ен1} - c_6 \cdot t_{к1}}, \quad \alpha_2 = \frac{r_{нн2}}{i_{ен2} - c_6 \cdot t_{к2}}, \quad \alpha_3 = \frac{r_{нн3}}{i_{ен3} - c_6 \cdot t_{к3}}; \quad (3.14)$$

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

$$\beta_1 = \frac{t_{кн} - t_{к1}}{i_{ен1} - c_6 \cdot t_{к1}}, \quad \beta_2 = \frac{t_{к1} - t_{к2}}{i_{ен2} - c_6 \cdot t_{к2}}, \quad \beta_3 = \frac{t_{к2} - t_{к3}}{i_{ен3} - c_6 \cdot t_{к3}}. \quad (3.15)$$

2. З урахуванням співвідношень (3.14), (3.15) система рівнянь (3.10) – (3.12) може бути представлена у вигляді:

$$w_1 = D_1 \cdot \alpha_1 \cdot \eta + G_n \cdot c_n \cdot \beta_1; \quad (3.16)$$

$$w_2 = w_1 \cdot \alpha_2 \cdot \eta + (G_n - w_1) \cdot c_1 \cdot \beta_2; \quad (3.17)$$

$$w_3 = w_2 \cdot \alpha_3 \cdot \eta + (G_n - w_1 - w_2) \cdot c_2 \cdot \beta_3, \quad (3.18)$$

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

3. Для кожного корпусу установки розрахуємо:

1) коефіцієнти z:

$$\begin{cases} z_1 = \alpha_1 \cdot \eta \\ z_2 = z_1 \cdot (\alpha_2 \cdot \eta - c_1 \cdot \beta_2) \\ z_3 = z_2 \cdot (\alpha_3 \cdot \eta - c_2 \cdot \beta_3) - z_1 \cdot c_2 \cdot \beta_3 \end{cases} ; \quad (3.19)$$

2) коефіцієнти у, кг/с

$$\begin{cases} y_1 = G_n \cdot c_n \cdot \beta_1 \\ y_2 = G_n \cdot c_1 \cdot \beta_2 + y_1 \cdot (\alpha_2 \cdot \eta - c_1 \cdot \beta_2) \\ y_3 = G_n \cdot c_2 \cdot \beta_3 + y_2 \cdot (\alpha_3 \cdot \eta - c_2 \cdot \beta_3) - y_1 \cdot c_2 \cdot \beta_3 \end{cases} . \quad (3.20)$$

4. З урахуванням співвідношень (3.19), (3.20) система рівнянь (3.16) – (3.18) може бути представлена у вигляді:

$$w_1 = D_1 \cdot z_1 + y_1; \quad (3.21)$$

$$w_2 = D_1 \cdot z_2 + y_2; \quad (3.22)$$

$$w_3 = D_1 \cdot z_3 + y_3. \quad (3.23)$$

5. Позначимо

$$Z = z_1 + z_2 + z_3, \quad (3.24)$$

$$Y = y_1 + y_2 + y_3. \quad (3.25)$$

6. Виконаємо додавання рівнянь (3.21) – (3.23). З урахуванням рівняння балансу випарної установки по воді (3.13) і співвідношень (3.24), (3.25) отримаємо

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

звідки

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

7. Розрахувавши витрати нагрівальної пари для першого корпусу D_1 з рівнянь (3.21) - (3.23) отримуємо продуктивність корпусів установки по воді w_1, w_2, w_3 і далі за рівняннями (3.10) - (3.12) остаточно виконуємо розрахунок теплових навантажень за корпусами установки:

$$Q_1 = D_1 \cdot r_{нн 1}; \quad Q_2 = w_1 \cdot r_{нн 2}; \quad w_2 \cdot r_{нн 3}.$$

Уточнюємо концентрації розчину по корпусах, %:

$$x_1 = \frac{G_n \cdot x_n}{G_n - w_1}; \quad x_2 = \frac{G_n \cdot x_n}{G_n - w_1 - w_2}; \quad x_3 = \frac{G_n \cdot x_n}{G_n - w_1 - w_2 - w_3}.$$

3.5 Визначення коефіцієнтів теплопередачі

3.5.1 Теоретичні відомості

Коефіцієнт теплопередачі для кожного корпусу установки розраховується за формулою для плоскої багат шарової стінки, Вт/(м²·К)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{конд}}} + R_{\text{терм}} + \frac{1}{\alpha_{\text{кип}}}}, \quad (3.26)$$

де $\alpha_{\text{конд}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від нагрівальної пари, що конденсується, Вт/(м²·К);

$\alpha_{\text{кип}}$ – коефіцієнт тепловіддачі до киплячого розчину, Вт/(м²·К);

$R_{\text{терм}}$ – сумарний термічний опір багат шарової стінки, (м²·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, (м²·К)/Вт

$$R_{\text{терм}} = \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{\delta_{\text{нак}}}{\lambda_{\text{нак}}}. \quad (3.27)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від нагрівальної пари, що конденсується, до стінки кип'ятильної труби, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{конд}} = 1,21 \cdot \lambda_{\text{конд}} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{конд}}^2 \cdot r_{\text{нп}} \cdot g}{\mu_{\text{конд}} \cdot H_{\text{опт}}} \right)^{0,33} \cdot q^{-0,33}, = A_{\text{конд}} \cdot q^{-0,33}, \quad (3.28)$$

де q - питоме теплове навантаження даного корпусу, Вт/м²;

$r_{\text{нп}}$ теплота конденсації нагрівальної пари для даного корпусу(див. табл. 3.2), Дж/кг;

$H_{\text{опт}}$ – 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 парит_{нп} для даного корпусу (див. додаток К);

g – прискорення вільного падіння, м²/с.

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до киплячого розчину у вертикальних трубах при його природній циркуляції, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{кит}} = b \cdot \left(\frac{\rho_p \cdot \lambda_p^2}{\mu_p \cdot \sigma_p \cdot T_{\text{ск}}} \right)^{0.33} \cdot q^{0.67} = A_{\text{кит}} \cdot q^{0.67}, \quad (3.29)$$

де q - питоме теплове навантаження даного корпусу, Вт/м²;

$T_{\text{ск}}$ – абсолютна середня температура кипіння розчину для даного корпусу (див. табл. 3.6), 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

$$b = 0.075 \cdot \left[1 + 10 \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_n} - 1 \right)^{-0.67} \right], \quad (3.30)$$

де ρ_n - густина водяної пари при тиску в середньому перерізі кип'ятильних труб P_c даного корпусу (P_c див. табл. 3.5), кг/м³.

З урахуванням рівнянь (3.28) і (3.29) вираз (3.26) для коефіцієнта теплопередачі набуде вигляду

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

а питоме теплове навантаження q , Вт/м²

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

де Δt – 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

$$\frac{1}{A_{\text{кон}}} \cdot q^{1,33} + R_{\text{терм}} \cdot q + \frac{1}{A_{\text{кип}}} \cdot q^{0,33} - \Delta t = 0. \quad (3.31)$$

3.5.2 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 3.7.

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

1. За формулами (3.27) - (3.30) розраховуються: сумарний термічний опір стінки кип'ятильної труби $R_{\text{терм}}$, коефіцієнти $A_{\text{конд}}$ і $A_{\text{кип}}$.

2. Виконується графічне рішення рівняння (3.31) при цьому, ліву частину рівняння позначимо через Ψ :

- в першому наближенні задаються значенням питомого теплового навантаження q' і визначають величину Ψ' 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. 3.1);

- у другому наближенні задаються значенням питомого теплового навантаження q'' і визначають величину Ψ'' 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 № 2 (див. рис. 3.1);

- через точки № 1 і № 2 проводимо пряму лінію. У точці перетину цієї прямої з віссю абсцис визначаємо шукану величину питомого теплового навантаження даного корпусу q .

Таблиця 3.7 – 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 $P_{\text{нп}}$, Па			
Температура конденсації нагрівальної пари $t_{\text{нп}}$, °С			
Густина конденсату $\rho_{\text{конд}}$, кг/м ³			
Теплопровідність конденсату $\lambda_{\text{конд}}$, Вт/(м·К)			
Динамічна в'язкість конденсату $\mu_{\text{конд}}$, Па·с			
Тиск пари у середньому перерізі труб P_c , Па			
Теплота пароутворення r_c , Дж/кг			
Середня температура кипіння розчину $t_{\text{ск}}$, °С			
Густина розчину ρ_p , кг/м ³			
Теплопровідність розчину λ_p , Вт/(м·К)			
Теплоємність розчину c_p , Вт/(кг·К)			
Динамічна в'язкість розчину μ_p , Па·с			
Поверхневий натяг σ_p , Н/м			
Густина пари при тиску в середньому перерізі кип'ятильних труб ρ_n , кг/м ³			

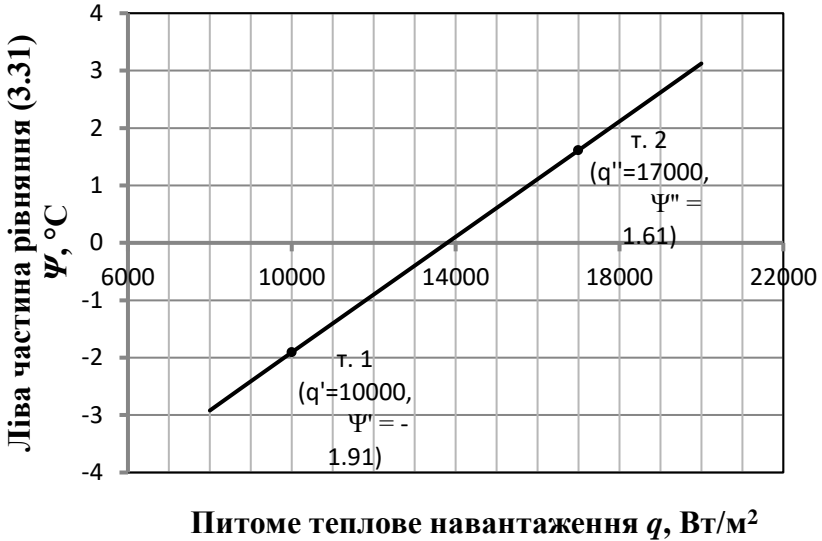


Рисунок 3.1 - Графічне визначення питомого теплового навантаження

3. Розрахунок коефіцієнта теплопередачі виконуємо за формулою, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$

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

де Δt - корисна різниця температур корпусу, який розраховується, $^\circ\text{C}$, (див. табл. 3.6).

3.6 Розподіл корисній різниці температур

Розподіл корисної різниці температур за умовою випарювання розчину в установці з однаковою поверхнею нагрівання всіх корпусів виконуємо за формулами, $^\circ\text{C}$:

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

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

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

де $\Sigma \Delta t$ – сумарна корисна різниця температур випарної установки, °С.
Перевірка сумарної корисної різниці температур установки, °С

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

Поверхня нагріву корпусів установки, м²:

$$F_1 = \frac{Q_1}{k_1 \cdot \Delta t_1}; \quad F_2 = \frac{Q_2}{k_2 \cdot \Delta t_2}; \quad F_3 = \frac{Q_3}{k_3 \cdot \Delta t_3}.$$

Корисні різниці температур, які розраховані в першому наближенні (див. табл. 3.6), і корисні різниці температур, які розподілені з умови рівності поверхонь нагріву корпусів, представлені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Корисні різниці температур

Корпуси	1	2	3
Розрахункові корисні різниці температур $\Delta t, ^\circ\text{C}$			
Корисні різниці температур, які розподілені, $\Delta t, ^\circ\text{C}$			

3.7 Коригування параметрів розчину і парів по корпусах установки

Як видно з таблиці 3.8 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 Δ'''' , як в першому, так і в другому наближенні.

Перший корпус:

- температура нагрівальної пари t_{nn1} першого корпусу відповідає варіанту завдання на розрахунок випарної установки;
- середня температура кипіння розчину, °C

$$t_{ck1} = t_{nn1} - \Delta t_1;$$

де Δt_1 - розподілена корисна різниця температур першого корпусу (див. табл. 3.8), °C;

- температура вторинної пари, °C

$$t_{en1} = t_{ck1} - (\Delta'_1 + \Delta''_1).$$

Другий корпус:

- температура нагрівальної пари, °C

$$t_{nn2} = t_{en1} - \Delta'_1;$$

- середня температура кипіння розчину, °C

$$t_{ck2} = t_{nn2} - \Delta t_2;$$

де Δt_2 - розподілена корисна різниця температур другого корпусу (див. табл. 3.8), °C;

- температура вторинної пари, °C

$$t_{en2} = t_{ck2} - (\Delta'_2 + \Delta''_2).$$

Третій корпус:

- температура нагрівальної пари, °C

$$t_{nn3} = t_{en2} - \Delta'_2;$$

- середня температура кипіння розчину, °C

$$t_{ck3} = t_{nn3} - \Delta t_3;$$

де Δt_3 - розподілена корисна різниця температур третього корпусу (див. табл. 3.8), °C;

- температура вторинної пари, °C

$$t_{en3} = t_{ck3} - (\Delta'_3 + \Delta''_3).$$

Барометричний конденсатор:

- температура конденсації пари в конденсаторі, °С

$$t_{\text{ок}} = t_{\text{ен 3}} - \Delta_3'''$$

Таблиця 3.9 – 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				-
Скоригована кінцева концентрація розчину, %	x				-
Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м ² ·К)	k				-
Розподілена корисна різниця температур, °С	Δt				-
Поверхня нагрівання, м ²	F				-
Середня температура кипіння розчину, °С	$t_{\text{ск}}$				-
Температура вторинної пари, °С	$t_{\text{вп}}$				-
Тиск вторинної пари, Па	$P_{\text{вп}}$				-
Температура нагрівальної пари, °С	$t_{\text{нп}}$				-
Тиск вторинної пари, Па	$P_{\text{вп}}$				-
Температура нагрівальної пари, °С	$t_{\text{нп}}$				-
Тиск нагрівальної пари, Па	$P_{\text{нп}}$				-

По таблицях термодинамічних властивостей води і водяної пари в стані насичення[1] за температурами парів $t_{\text{нп}}, t_{\text{ен}}, t_{\text{ок}}$ визначаємо їх тиск $P_{\text{нп}}, P_{\text{ен}}, P_{\text{ок}}$. Результати теплового розрахунку випарної установки заносимо до таблиці 3.9.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Москва: Энергия, 1985. 78 с.
- 2 Павлов К.Ф. Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Ленинград: Химия, 1987. 575 с.

Додаток А

Густина розчинів

Густина розчинів ρ в діапазоні температур (0-200) °С розраховується за формулою, кг/м³

$$\lg \rho = \lg \rho_{H_2O} + (a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2) \cdot X, \quad (\text{A.1})$$

де ρ_{H_2O} - густина води при заданій температурі, кг/м³;

X – концентрація розчиненої речовини, кг речовини/кг розчину;

t – температура, °С;

a_0, a_1, a_2 - коефіцієнти (представлено в таблиці А.1).

Таблиця А.1 – Коефіцієнти для розрахунку густини за рівнянням (А.1) в інтервалі температур (0-200) °С

Розчинна речовина	$a_0 \cdot 10^4$	$a_1 \cdot 10^6$	$- a_2 \cdot 10^8$
<i>BaCl₂</i>	3848,19	788,60	411,55
<i>CaCl₂</i>	3518,10	463,51	270,30
<i>K₂CO₃</i>	3658,27	489,43	274,16
<i>KOH</i>	3589,98	406,64	271,68
<i>MgCl₂</i>	3372,00	791,13	324,26
<i>NaCl</i>	2889,19	614,36	447,68
<i>NaOH</i>	3937,43	370,31	271,64

Густина води ρ_{H_2O} розраховується за залежністю, кг/м³

$$\rho_{H_2O} = 1000 - 0,062 \cdot t - 0,00355 \cdot t^2. \quad (A.2)$$

Приклад. Необхідно розрахувати густину розчину $NaOH$ з концентрацією $X=0,1$ кг/кг при 70 °С.

За формулою (A.2) розраховуємо густину води при 70 °С, кг/м³

$$\rho_{H_2O} = 1000 - 0,062 \cdot 70 - 0,00355 \cdot 70^2 = 978,265.$$

За таблицею А.1 знаходимо значення коефіцієнтів a_0, a_1, a_2 :

$$a_0 = 3937,43 \cdot 10^{-4}; \quad a_1 = 370,31 \cdot 10^{-6}; \quad a_2 = -271,64 \cdot 10^{-8}.$$

За формулою (A.1) розраховуємо густину розчину при 70 °С, кг/м³:

$$\begin{aligned} A = \lg \rho &= \lg 978,265 + [3937,43 \cdot 10^{-4} + \\ &+ 370,31 \cdot 10^{-6} \cdot 70 - 271,64 \cdot 10^{-8} \cdot 70^2] \cdot 0,1 = 3,031; \\ \rho &= 10^A = 1074. \end{aligned}$$

Додаток Б

В'язкість розчинів

В'язкість розчинів μ в діапазоні температур (0-200) °С розраховується за формулою, Па·с

$$\lg \mu = \lg \mu_{H_2O} + (d_0 + d_1 \cdot t + d_2 \cdot t^2) \cdot X, \quad (\text{Б.1})$$

де μ - динамічний коефіцієнт в'язкості розчину, Па·с;

μ_{H_2O} - динамічний коефіцієнт в'язкості води при заданій температурі, Па·с;

X – концентрація розчинної речовини, кг речовини/кг розчину;

t – температура, °С;

d_0, d_1, d_2 - коефіцієнти (представлено в таблиці Б.1).

Таблиця Б.1 – Коефіцієнти для розрахунку в'язкості за рівнянням (Б.1) в інтервалі температур (0-200) °С

Розчинна речовина	$d_0 \cdot 10^2$	$d_1 \cdot 10^4$	$d_2 \cdot 10^9$
<i>BaCl₂</i>	46,49	42,40	-103,45
<i>CaCl₂</i>	148,28	-13,30	-3648,23
<i>K₂CO₃</i>	146,67	4,80	-245,24
<i>KOH</i>	118,70	17,06	-1098,35
<i>MgCl₂</i>	217,86	-38,25	4170,79
<i>NaCl</i>	89,22	17,96	-45,46
<i>NaOH</i>	347,89	-122,35	544,64

Динамічний коефіцієнт в'язкості води, Па·с

$$\mu_{H_2O} = 0,59849 \cdot (43,252 + t)^{-1,5423}. \quad (\text{Б.2})$$

Приклад. Необхідно розрахувати в'язкість розчину $BaCl_2$ з концентрацією $X = 0,2$ кг/кг при 60 °С.

За формулою (Б.2) розраховуємо динамічний коефіцієнт в'язкості води при 60 °С, Па·с

$$\mu_{H_2O} = 0,59849 \cdot (43,252 + 60)^{-1,5423} = 4,688 \cdot 10^{-4}.$$

За таблицею Б.1 знаходимо значення коефіцієнтів d_0, d_1, d_2 :

$$d_0 = 46,49 \cdot 10^{-2}; \quad d_1 = 42,40 \cdot 10^{-4}; \quad d_2 = -103,45 \cdot 10^{-9}.$$

За формулою(Б.1) розраховуємо в'язкість розчину при 60 °С, Па·с:

$$A = \lg \mu = \lg 4,688 \cdot 10^{-4} + \\ + [46,49 \cdot 10^{-2} + 42,40 \cdot 10^{-4} \cdot 60 - 103,45 \cdot 10^{-9} \cdot 60^2] \cdot 0,2 = -3,185;$$

$$\mu = 10^A = 6,531 \cdot 10^{-4}.$$

Додаток В

Теплоємність розчинів

Питома теплоємність розчинів C в діапазоні температур (0-200) °С розраховується за формулою, Дж/(кг·К)

$$c = c_{H_2O} + (f_0 + f_1 \cdot X + f_2 \cdot t + f_3 \cdot t^2) \cdot X, \quad (B.1)$$

де C – питома теплоємність розчину, Дж/(кг·К);

c_{H_2O} - питома теплоємність води при заданій температурі, Дж/(кг·К);

X – концентрація розчиненої речовини, кг речовини/кг розчину;

t – температура, °С;

f_0, f_1, f_2, f_3 - коефіцієнти (представлено в таблиці В.1).

Таблиця В.1 – Коефіцієнти для розрахунку питомої теплоємності розчину за рівнянням (В.1) в інтервалі температур (0-200) °С

Розчинна речовина	$-f_0$	f_1	f_2	$-f_3 \cdot 10^3$
<i>BaCl₂</i>	5341,08	2602,96	6,43	10,93
<i>CaCl₂</i>	6497,23	5563,05	6,36	17,92
<i>K₂CO₃</i>	5086,14	2161,24	6,62	5,51
<i>KOH</i>	5343,49	2356,87	10,43	4,76
<i>MgCl₂</i>	6530,30	4804,79	5,64	19,79
<i>NaCl</i>	5479,43	7878,33	3,14	23,35
<i>NaOH</i>	5297,21	6942,68	14,84	14,15

Питома теплоємність води c_{H_2O} , Дж/(кг·К)

$$c_{H_2O} = 4223,6 + 2,476 \cdot t \cdot \lg(t/100). \quad (B.2)$$

Приклад. Необхідно розрахувати питому теплоємність розчину *КОН* з концентрацією $X = 0,065$ кг/кг при 32°C .

За формулою (B.2) розраховуємо питому теплоємність води при 32°C , Дж/(кг·К)

$$c_{H_2O} = 4223,6 + 2,476 \cdot 32 \cdot \lg(32/100) = 4184,4.$$

За таблицею B.1 знаходимо значення коефіцієнтів f_0, f_1, f_2, f_3 :

$$f_0 = -5343,49; \quad f_1 = 2356,87; \quad f_2 = 10,43; \quad f_3 = -4,76 \cdot 10^{-3}.$$

За формулою (B.1) розраховуємо питому теплоємність розчину при 32°C , Дж/(кг·К)

$$c = 4184,4 + (-5343,49 + 2356,87 \cdot 0,065 + \\ + 10,43 \cdot 32 - -4,76 \cdot 10^{-3} \cdot 32^2) \cdot 0,065 = 3868,4.$$

Додаток Г

Теплопровідність розчинів

Коефіцієнт теплопровідності розчину λ , Вт/(м·К), в діапазоні температур (0-200) °С

$$\lambda = \lambda_{H_2O} \cdot (1 - \beta \cdot X), \quad (\text{Г.1})$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності розчину при заданій температурі, Вт/(м·К);

λ_{H_2O} – теплопровідність води при заданій температурі, Вт/(м·К);

X – концентрація розчиненої речовини, кг речовини/кг розчину;

t – температура, °С;

β – коефіцієнт (представлено в таблиці Г.1).

Коефіцієнт теплопровідності води λ_{H_2O} , Вт/(м·К)

$$\lambda_{H_2O} = 0,5545 + 0,00246 \cdot t - 0,00001184 \cdot t^2$$

$$\lambda_{H_2O} = 0,5545 + 0,00246 \cdot t - 0,00001184 \cdot t^2 \quad (\text{Г.2})$$

Таблиця Г.1 – Коефіцієнти для розрахунку коефіцієнта теплопровідності розчину за рівнянням (Г.1) в інтервалі температур (0-200) °С

Розчиннаречовина	$\beta \cdot 10^3$	Розчиннаречовина	$\beta \cdot 10^3$
<i>BaCl₂</i>	141,68	<i>MgCl₂</i>	493,17
<i>CaCl₂</i>	69,74	<i>NaOH</i>	-128,84
<i>K₂CO₃</i>	180,14	<i>NaCl</i>	156,97
<i>KOH</i>	130,74	<i>Na₂CO₃</i>	143,84

Приклад. Необхідно розрахувати коефіцієнт теплопровідності розчину $MgCl_2$ з концентрацією $X = 0,02$ кг/кг при 73 °С.

За формулою (Г.2) розраховуємо коефіцієнт теплопровідності води при 73 °С, Вт/(м·К)

$$\lambda_{H_2O} = 0,5545 + 0,00246 \cdot 73 - 0,00001184 \cdot 73^2 = 0,671.$$

За таблицею Г.1 знаходимо значення коефіцієнта $\beta = 493,17 \cdot 10^{-3}$.

За формулою (Г.1) розраховуємо коефіцієнт теплопровідності розчину при 73 °С, Вт/(м·К)

$$\lambda = 0,671 \cdot (1 - 493,17 \cdot 10^{-3} \cdot 0,02) = 0,6644.$$

Додаток Д

Активність води

Активність води в розчині визначається за формулою

$$\lg a_w = \left(F + Q \cdot \frac{N}{K} \right) \cdot \frac{N}{K}, \quad (\text{Д.1})$$

де a_w – активність води;

F, Q, K - коефіцієнти;

t – температура, °С;

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

Концентрація розчиненої речовини N , моль/кмоль

$$N = \frac{18020 \cdot X}{M \cdot (1-X)}, \quad (\text{Д.2})$$

де X – концентрація розчиненої речовини, кг речовини/кг розчину;

M – молекулярна маса розчиненої речовини (див. табл. Д.1), кг.

Коефіцієнти F, Q розраховуються за формулами

$$F = f_0 + f_1 \cdot t + f_2 \cdot t^2, \quad Q = q_0 + q_1 \cdot t + q_2 \cdot t^2, \quad (\text{Д.3})$$

де f_0, f_1, f_2 – коефіцієнти (див. табл. Д.1);

q_0, q_1, q_2, K - коефіцієнти – (див. табл. Д.2).

Приклад. Необхідно розрахувати активність води у розчині $\text{NaCl} - \text{H}_2\text{O}$ концентрацією $X = 0,2$ кг/кг при 25 °С.

За формулами (Д.3) знаходимо коефіцієнти F і Q для NaCl , використовуючи дані таблиць Д.1 і Д.2:

$$M = 58,44; \quad f_0 = -1473 \cdot 10^{-6}; \quad f_1 = 0,01 \cdot 10^{-6}; \quad f_2 = -0,0011 \cdot 10^{-6};$$

$$q_0 = -1438 \cdot 10^{-8}; \quad q_1 = 4,307 \cdot 10^{-8}; \quad q_2 = -0,0009 \cdot 10^{-8}; \quad K = 2;$$

$$F = (-1473 + 0.01 \cdot 25 - 0.0011 \cdot 25^2) \cdot 10^{-6} = -1,4734 \cdot 10^{-3};$$

$$Q = (-1438 + 4,307 \cdot 25 - 0.0009 \cdot 25^2) \cdot 10^{-8} = -1,3309 \cdot 10^{-5}.$$

За формулою (Д.2) розраховуємо концентрацію N

$$N = \frac{18020 \cdot 0,2}{58,44 \cdot (1 - 0,2)} = 77,088.$$

За формулою (Д.1) розраховуємо активність води в розчині

$$A = \lg a_w = \left(-1,4734 \cdot 10^{-3} - 1,3309 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{77,088}{2} \right) \cdot \frac{77,088}{2} = -0,076564$$

$$a_w = 10^A = 0,8384$$

Таблиця Д.1 – Молекулярна маса розчиненої речовини і коефіцієнти для розрахунку величини F за рівнянням (Д.3)

Розчинна речовина	M	$-f_0 \cdot 10^6$	$-f_1 \cdot 10^6$	$-f_2 \cdot 10^6$
$BaCl_2$	208,24	800,0	0	0
$CaCl_2$	110,98	839,0	32,9	-0,2
K_2CO_3	138,2	475,25	13,25	-0,113
KOH	56,11	1736,0	4,64	-0,0121
$MgCl_2$	95,21	496,0	20,6	-0,31
$NaCl$	58,44	1473,0	-0,01	0,0011
$NaOH$	40,0	1239,0	7,1	-0,0292

Таблиця Д.2 – Коefіцієнт K і коefіцієнти для розрахунку величини Q за рівнянням (Д.3)

Розчинна речовина	$-q_0 \cdot 10^8$	$-q_1 \cdot 10^8$	$-q_2 \cdot 10^8$	K
<i>BaCl₂</i>	0	0	0	1
<i>CaCl₂</i>	2919,0	-52,3	0,271	1
<i>K₂CO₃</i>	1239,0	-12,477	0,0849	1
<i>KOH</i>	2446,4	-14,331	0,0335	2
<i>MgCl₂</i>	4107,0	-47,0	0,365	1
<i>NaCl</i>	1438,0	-4,307	0,0009	2
<i>NaOH</i>	2599,0	-21,53	0,0506	2

Додаток Е

Поверхневий натяг

Поверхневий натяг розчину σ , Н/м, розраховується за формулою

$$\sigma = \sigma_0 + 0,049 \cdot (1 - a_w), \quad (\text{E.1})$$

де σ_0 – поверхневий натяг води, Н/м;

a_w – активність води у розчині.

Поверхневий натяг води при даній температурі розраховується за такою залежністю

$$\sigma_0 = 7,56662 \cdot 10^{-2} - 1,42939 \cdot 10^{-4} \cdot t - 2,52178 \cdot 10^{-7} \cdot t^2, \quad (\text{E.2})$$

де t – температура, °С.

Приклад. Необхідно розрахувати поверхневий натяг розчину $\text{NaCl} - \text{H}_2\text{O}$ з концентрацією $X = 0,2$ кг/кг при 25 °С.

Розрахунок активності води a_w у розчині $\text{NaCl} - \text{H}_2\text{O}$ дивись у додатку Д.

За формулою (E.2) розраховуємо поверхневий натяг води, Н/м

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= 7,56662 \cdot 10^{-2} - 1,42939 \cdot 10^{-4} \cdot 25 - 2,52178 \cdot 10^{-7} \cdot 25^2 = \\ &= 7,19351 \cdot 10^{-2}. \end{aligned}$$

За формулою (E.1) розраховуємо поверхневий натяг розчину, Н/м

$$\sigma = 7,19351 \cdot 10^{-2} + 0,049 \cdot (1 - 0,8384) = 7,9855 \cdot 10^{-2}.$$

Додаток К

Таблиця К.1 – Фізичні властивості води на лінії насичення

t , °C	$p \cdot 10^{-5}$, Па	ρ , кг/м ³	i , кДж/кг	C_p , Дж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^6$, м ² /К	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, 1/К	$\sigma \cdot 10^4$, Н/м	Pr
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	1,013	999,9	0	4,212	55,1	13,1	1788	1,789	-0,63	756,4	13,67
10	1,013	999,7	42,04	4,191	57,4	13,7	1306	1,306	+0,70	741,6	9,52
20	1,013	998,2	83,91	4,183	59,9	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,02
30	1,013	995,7	125,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805	3,21	712,2	5,42
40	1,013	992,2	167,5	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659	3,87	696,5	4,31
50	1,013	988,1	209,3	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556	4,49	676,9	3,54
60	1,013	983,1	251,1	4,179	65,9	16,0	469,9	0,478	5,11	662,2	2,98
70	1,013	977,8	293,0	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415	5,70	643,5	2,55
80	1,013	971,8	355,0	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365	6,32	625,9	2,21
90	1,013	965,3	377,0	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326	6,95	607,2	1,95
100	1,013	958,4	419,1	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	68,5	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	68,6	17,1	237,4	0,252	8,64	548,4	1,47

продовження таблиці К.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
130	2,70	934,8	546,4	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233	9,19	528,8	1,36
140	3,61	926,1	589,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	6,18	907,0	975,4	4,346	68,3	17,3	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,92	897,3	719,3	4,380	67,9	17,3	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	67,4	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,00
190	12,55	876,0	807,8	4,459	67,0	17,1	144,2	0,165	12,6	400,2	0,96
200	15,55	863,0	852,5	4,505	66,3	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,93
210	19,08	852,8	897,7	4,555	65,5	16,9	130,5	0,153	14,1	354,1	0,91
220	23,20	840,3	943,7	4,614	64,5	16,6	124,6	0,148	14,8	331,6	0,89
230	27,98	827,3	990,2	4,681	63,7	16,4	119,7	0,145	15,9	310,0	0,88
240	33,48	813,6	1037,5	4,756	62,8	16,2	114,8	0,141	16,8	285,5	0,87
250	39,78	799,0	1085,7	4,844	61,8	15,9	109,9	0,137	18,1	261,9	0,86

