

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

**ПРОЦЕСИ, АПАРАТИ ТА  
УСТАТКУВАННЯ  
БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ  
ВИРОБНИЦТВ  
ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ  
(ЧАСТИНА 1)**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів,  
які навчаються за спеціальністю 162 «Біотехнології та біоінженерія»,  
освітньої програми «Біотехнології»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2021

Процеси, апарати та устаткування біотехнологічних виробництв: Лабораторний практикум (Частина 1) [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія» освітньої програми «Біотехнології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Л.І. Ружинська, М.В. Шафаренко, О.В. Воробйова. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,25 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 76 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 6 від 25.02.2021 р.)  
за поданням Вченої ради факультету біотехнології і біотехніки (протокол № 6 від 25.01.2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

# ПРОЦЕСИ, АПАРАТИ ТА УСТАТКУВАННЯ БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ (ЧАСТИНА 1)

Укладачі: *Ружинська Людмила Іванівна*, доцент кафедри біотехніки та інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського, канд. техн. наук, доцент  
*Шафаренко Микола Васильович*, асистент кафедри біотехніки та інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського  
*Воробйова Ольга Володимирівна*, асистент кафедри біотехніки та інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Мельник Вікторія Миколаївна*, завідувач кафедрою біотехніки та інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського, д-р техн. наук, професор

Рецензент *Поліщук В.Ю.*, доцент кафедри промислової біотехнології КПІ ім. Ігоря Сікорського, канд. техн. наук

Посібник містить роз'яснення щодо виконання 3 лабораторних робіт та методики їх розрахунків, передбачених робочою програмою дисципліни «Процеси, апарати та устаткування біотехнологічних виробництв». Наведено теоретичні відомості і описано методичні рекомендації по проведенню лабораторних робіт.

Для студентів спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія» освітньої програми «Біотехнології».

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

## ЗМІСТ

Зміст.....	3
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1	
Дослідження процесу теплообміну в теплообмінних апаратах типу «труба в трубі».....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2	
Дослідження процесу кипіння і конденсації насиченої водяної пари на вертикальній поверхні .....	24
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3	
Дослідження процесу випарювання.....	48
Список літератури.....	65
Додатки.....	67

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛООБМІНУ В ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТАХ ТИПУ «ТРУБА В ТРУБІ»

Мета роботи: Дослідити процес теплообміну при нагріванні розчинів в апараті типу «труба в трубі».

### 1 Основні теоретичні відомості

В фармацевтичній та мікробіологічній промисловостях процеси нагрівання або охолодження часто здійснюються в теплообмінниках типу «труба в трубі». Ці апарати прості по конструкції та надійні в експлуатації. При цьому теплота підводиться і відводиться від теплоносіїв при невеликих питомих теплових навантаженнях.

Необхідною умовою передачі тепла є різниця температур, причому цей процес відбувається в напрямі зниження температури.

Дослідження теплообміну полягає в тому, щоб встановити взаємозв'язок між розподілом температури в тілі і тепловими потоками, що виникають у ньому. З розподілом температури пов'язане поняття температурного поля тіла.

*Температурне поле* – це сукупність значень температур у різних точках простору на даний момент часу. Якщо температура  $t$  змінюється в часі  $\tau$ , то температурне поле називається нестационарним. Математичним записом тривимірного нестационарного температурного поля є

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (1.1)$$

де  $x, y, z$  – координати.

Якщо температура в будь-якій точці тіла не залежить від часу, розглядають тривимірне стаціонарне температурне поле

$$t = f(x, y, z) \quad (1.2)$$

Сукупність точок тіла, що мають однакову температуру, називається ізотермічною поверхнею. Ізотермічні поверхні не перетинаються і не стискаються, а замикаються самі на себе або закінчуються на межах тіла.

*Градiєнт температури* є вектором, напрям якого відповідає напрямку підвищення температури. У загальному випадку в різних точках даної ізотерми

значення  $gradt$  за величиною і напрямом різні. Величина градієнта визначається границею відношення зміни температури  $\Delta t$  до відстані між двома ізотермічними поверхнями вздовж нормалі  $n$  і також називається температурним градієнтом:

$$\lim \frac{\Delta t}{\Delta n} \rightarrow 0 = \frac{\partial t}{\partial n} = gradt. \quad (1.3)$$

Величина  $gradt$  є мірою інтенсивності зміни температури в певній точці.

*Тепловий потік*  $Q$  – кількісна характеристика теплообміну, яка характеризує кількість переданого тепла.

Кількість теплоти, що проходить в одиницю часу через одиницю площі ізотермічної поверхні, називається *питомим тепловим потоком*

$$q = \frac{dQ}{dF \cdot d\tau}. \quad (1.4)$$

Інакше кажучи, питомий тепловий потік характеризує інтенсивність теплообміну в даній точці простору.

У теорії теплообміну залежно від фізичної природи процесу теплообміну розрізняють три прості види або способи перенесення тепла: теплопровідність, конвективний теплообмін (конвекція) і променистий теплообмін.

### 1.1 Теплопровідність

Теплопровідність – процес перенесення тепла в тілах (або між тілами) при безпосередньому зіткненні елементарних часток речовин (у мікросередовищі) в процесі їх (частинок) температурного руху.

В основі розрахунку процесу теплопровідності лежить закон Фур'є. Цим законом встановлено, що тепловий потік виникає тільки при наявності температурного градієнта і виражає пряму пропорційність між градієнтом температури і густиною теплового потоку. В аналітичній формі закон Фур'є має такий вигляд

$$q = -\lambda gradt, \quad (1.5)$$

де  $\lambda$  називається коефіцієнтом теплопровідності. Знак мінус показує, що вектор  $q$  напрямлений в бік, протилежний до вектора  $gradt$ .

Вектор для кількості тепла в диференціальній формі

$$dQ = q \cdot dF \cdot d\tau = -\lambda \operatorname{grad} t \cdot dF \cdot d\tau. \quad (1.6)$$

Очевидно, що тепловий потік  $Q$  можна визначити при інтегруванні рівняння (1.6) враховуючи конкретні умови процесу теплопровідності.

## 1.2 Теплопровідність через плоску стінку

Для плоскої ізотропної однорідної суцільної стінки при  $\lambda = \text{const}$ , висота і ширина якої значно більші порівняно з товщиною  $\delta$ , температурне поле в стінці можна вважати одновимірним, при якому температура змінюється тільки по товщині, тобто вздовж осі  $x$ .

Відповідно до граничних умов I роду на поверхнях стінки задані температури  $t_{cm1}$  і  $t_{cm2}$ , значення яких в якій завгодно точці кожної поверхні відповідно сталі; вважатимемо, що  $t_{cm1} > t_{cm2}$ .

Рівняння розподілу температури в плоскій однорідній стінці :

$$t = t_{cm1} - \frac{t_{cm1} - t_{cm2}}{\delta} \cdot x. \quad (1.7)$$

На підставі формули (1.7) робимо висновок, що при таких умовах температура по товщині стінки розподіляється за лінійним законом.

Густина теплового потоку через плоску стінку:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{cm1} - t_{cm2}) = \frac{\Delta t_{cm}}{\delta/\lambda} = \frac{\Delta t_{cm}}{R}, \quad (1.8)$$

де  $\Delta t_{cm} = t_{cm1} - t_{cm2}$  – температурний напір;  $R = \frac{\delta}{\lambda}$  – термічний опір

При заданому  $q$  з формули (1.7), враховуючи (1.8), можна дістати рівняння для температурного поля плоскої стінки у формі

$$t = t_{cm1} - \frac{q}{\lambda} x. \quad (1.9)$$

Виходячи з формули (1.6) і враховуючи незалежність розподілу температури від величин  $F$  і  $\tau$ , можна визначити тепловий потік через дану поверхню  $F$  за період часу  $\tau$

$$Q = qF\tau = \frac{\lambda}{\delta} (t_{cm1} - t_{cm2}) F \tau. \quad (1.10)$$

### 1.3 Теплопровідність через циліндричну стінку

Рівняння температурного поля

$$t = t_{cm1} - \frac{t_{cm1} - t_{cm2}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln \frac{r}{r_1}, \quad (1.11)$$

де  $r_1$  і  $r_2$  відповідно внутрішній та зовнішній радіуси циліндричної стінки

Тепловий потік

$$Q = qF\tau = \lambda \frac{t_{cm1} - t_{cm2}}{r \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} 2\pi r l = \frac{t_{cm1} - t_{cm2}}{\frac{1}{2\pi\lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} l, \quad (1.12)$$

де  $l$  – довжина циліндричної труби.

### 1.4 Конвективний теплообмін

Конвективним теплообміном називається процес передачі тепла в краплинних і пружних рідинах (газах), пов'язаний з переміщенням макроскопічних об'ємів цих рідин.

Серед багатьох задач конвективного теплообміну в інженерних розрахунках найчастіше трапляються задачі конвективного теплообміну між потоком робочої рідини і поверхнею твердого тіла, які називають конвективною тепловіддачею, або просто тепловіддачею.

На відміну від процесу теплопровідності при конвективному теплообміні на розподіл температури в робочій рідині значною мірою впливає розподіл швидкостей, який залежить від природи виникнення і характеру руху середовища.

Природа виникнення руху робочої рідини різна – буває вільний і вимушений рух.

Вільний рух (вільна конвекція) відбувається під дією нерівномірного поля масових сил прикладених до частинок цієї рідини. Ці сили виникають під дією зовнішніх полів, наприклад гравітаційного (сил тяжіння), магнітного, електричного та ін.

Вимушений рух (вимушена конвекція) робочої рідини спричинюється зовнішніми поверхневими силами (наприклад, течія рідини в каналі під дією сили тиску), або рівномірним полем масових сил (наприклад, перетікання рідини з

верхнього рівня на нижній під дією сили тяжіння), або за рахунок кінетичної енергії, переданої робочій рідині в перекачувальній пристрої – насосі, компресорі тощо.

При вимушеному русі, дуже поширеному в техніці, на закономірності теплообміну істотно впливає режим або характер руху потоку. У гідродинаміці розрізняють ламінарний, перехідний і турбулентний режим.

Для характеристики переходу від одного режиму до другого під час руху робочої рідини в каналі користуються величиною критичного значення критерія Рейнольдса.

Для практичних розрахунків конвективної тепловіддачі (як правило для стаціонарного режиму) застосовують формулу Ньютона-Ріхмана

$$Q = \alpha \Delta t_{cp} F, \quad (1.13)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, що характеризує інтенсивність процесу;  $F$  – поверхня стінки, з якою відбувається теплообмін;  $\Delta t_{cp}$  – різниця середніх температур потоку робочої рідини і стінки.

Зауважимо що коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ , який враховує вплив багатьох факторів, що обумовлюють закономірність тепловіддачі, визначити важко. Тому визначення величини  $\alpha$ , треба вважати основним завданням при розрахуванні конвективного теплообміну.

### 1.5 Тепловіддача при вимушеному русі рідини в трубі

Потік робочої рідини в цьому разі обмежений стінками труби. Тому робоча рідина під час руху зазнає гальмівної дії стінок. Внаслідок дії сил внутрішнього тертя (в'язкості) закономірності процесу тепловіддачі значною мірою залежать від режимів руху потоку.

Спинімося на одній з рекомендованих формул для ламінарного руху рідини, у якій враховано вільну конвекцію (при критерії Рейнольдса  $Re \leq 2 \cdot 10^3$ ):

$$Nu = 0,15 Re^{0,33} \cdot Pr^{0,33} \cdot (Gr Pr)^{0,1} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (1.14)$$

де  $Re = \frac{wd}{\nu}$  – критерій Рейнольдса;



$Pr = \frac{\mu c}{\lambda}$  – критерій Прандля;

$Gr = \frac{gd^3}{\nu^2} \beta \Delta t$  – критерій Грасгофа;

$w$  – середня швидкість робочої рідини в трубі;

$d$  – внутрішній діаметр труби;

$\mu, \nu$  – відповідно динамічна і кінематична в'язкість рідини;

$c, \lambda$  – питома теплоємність і теплопровідність рідини;

$\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення рідини.

При перехідному режимі ( $2 \cdot 10^3 < Re < 10^4$ ) наближено розрахувати коефіцієнт тепловіддачі можна за формулою

$$Nu = K_0 \cdot Pr^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (1.15)$$

де  $K_0 = f(Re)$ .

При розвинутому турбулентному режимі ( $Re \geq 10^4$ ) для прямих технічно рівних труб коефіцієнт тепловіддачі можна розрахувати за формулою:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (1.16)$$

### 1.6 Тепловіддача при вимушеному русі рідини в кільцевому каналі

Цей випадок тепловіддачі спостерігається при русі рідини між коаксіальними трубами, наприклад в теплообмінниках типу “труба в трубі”. Якщо зовнішній діаметр внутрішньої труби, яка омивається теплоносієм зовні, дорівнює  $D_3$ , а внутрішній діаметр зовнішньої труби (кожуха) дорівнює  $D_B$ , то коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left( \frac{D_g}{D_3} \right)^{0,45}, \quad (1.17)$$

В рівнянні (1.17) визначальним геометричним розміром являється  $D_3$ .

## 2 Методика проведення досліджень та основні виміри

### 2.1 Приготування робочих розчинів

1) I-е відпрацювання.

В колбу залити 4000 г води та 55 мл 35%-го розчину  $HCl$ .

Маса 35%-го розчину  $HCl$ :  $55 \cdot 1,174 = 64,57$  г

Маса 100%-ої  $HCl$  в розчині:  $64,57 \cdot 0,35 = 22,66$  г

Концентрація робочого розчину:  $c = \frac{22,66 \cdot 100}{4000 \cdot 67,57} = 0,56\%$

2) II - е відпрацювання.

В колбу залити 4074,8 г 0,64%-го розчину  $HCl$  та 70 мл 35%-го розчину  $HCl$ .

Маса 35%-го розчину  $HCl$ :  $70 \cdot 1,174 = 82,18$  г

Маса 100%-ої соляної кислоти в 70 мл розчину:  $95,2 \cdot 0,35 = 28,76$  г

Концентрація робочого розчину:  $c = \frac{(22,66 + 28,76) \cdot 100}{4067,57 + 82,18} = 1,24\%$

3) III - е відпрацювання.

В колбу залити 4149,75 г 1,24%-го розчину  $HCl$  та 55 мл 35%-го розчину  $HCl$ .

Концентрація робочого розчину:  $c = \frac{(2 \cdot 22,66 + 28,76) \cdot 100}{4149,75 + 64,57} = 1,76\%$

4) IV - е відпрацювання.

В колбу залити 4214,32 г 1,76%-го розчину  $HCl$  та 55 мл 35%-го розчину  $HCl$ .

Концентрація робочого розчину:  $c = \frac{(3 \cdot 22,66 + 28,76) \cdot 100}{4214,32 + 64,57} = 2,26\%$

5) V - е відпрацювання.

В колбу залити 4278,89 г 2,26%-го розчину  $HCl$  та 55 мл 35%-го розчину  $HCl$ .

Концентрація робочого розчину:  $c = \frac{(4 \cdot 22,66 + 28,76) \cdot 100}{4278,89 + 64,57} = 2,74\%$

6) VI - е відпрацювання.

В колбу залити 4343,46 г 2,74%-го розчину  $HCl$  та 55 мл 35%-го розчину  $HCl$ .

Концентрація робочого розчину:  $c = \frac{(5 \cdot 22,66 + 28,76) \cdot 100}{4343,46 + 64,57} = 3,22\%$ .

7) VII - е відпрацювання.

В колбу залити 4408,03 г , 3,22%-го розчину  $NaCl$  та 55 мл 35%-го розчину  $HCl$ .

$$\text{Концентрація робочого розчину: } c = \frac{(6 \cdot 22,66 + 28,76) \cdot 100}{4408,03 + 64,57} = 3,67\% .$$

## 2.2 Проведення досліджень

Ввімкнути подачу гарячого теплоносія з термостата в рубашки скляних теплообмінників. Ввімкнути перистальтичний насос і подати робочий розчин в теплообмінники.

Через проміжки часу, вказані викладачем, вимірюються температури гарячого теплоносія в термостаті і на виході з рубашки теплообмінника, температури розчину на вході в теплообмінник та на виході із теплообмінника. Час контролюється секундоміром.

При проведенні досліджень проводяться наступні виміри:

1. об'єм зібраного гарячого теплоносія  $V_1, \text{ м}^3$ ;
2. час виміру об'єму гарячого теплоносія  $\tau_1, \text{ с}$ ;
3. об'єм зібраного розчину  $V_2, \text{ м}^3$ ;
4. час виміру об'єму розчину  $\tau_2, \text{ с}$ ;
5. температура гарячого теплоносія на вході в теплообмінник(початкова температура)  $t_{1п}, \text{ }^\circ\text{C}$ ;
6. температура гарячого теплоносія на виході з рубашки теплообмінника (кінцева температура)  $t_{1к}, \text{ }^\circ\text{C}$ ;
7. температура розчину на вході в теплообмінник (початкова температура)  $t_{2п}, \text{ }^\circ\text{C}$ ;
8. температура розчину на виході з теплообмінника (кінцева температура)  $t_{2к}, \text{ }^\circ\text{C}$ ;
9. час проведення дослідів  $\tau, \text{ с}$ .

Результати вимірів заносяться до табл. 1.1.

Таблиця 1.1- Результати вимірювань.

№	$V_1, \text{ м}^3$	$\tau_1, \text{ с}$	$V_2, \text{ м}^3$	$\tau_2, \text{ с}$	$t_{1п}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{1к}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{2п}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{2к}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\tau, \text{ с}$
1									
2									

№	$V_1, \text{м}^3$	$\tau_1, \text{с}$	$V_2, \text{м}^3$	$\tau_2, \text{с}$	$t_{1n}, ^\circ\text{C}$	$t_{1k}, ^\circ\text{C}$	$t_{2n}, ^\circ\text{C}$	$t_{2k}, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{с}$
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									

### 3 Методика обробки експериментів

Таблиця 1.2 – обробка результатів вимірювань

№	$G_1, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$G_2, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$Q_1, \text{Вт}$	$Q_2, \text{Вт}$	$t_{\text{cm1}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{cm2}}, ^\circ\text{C}$	$\alpha_1, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	$\alpha_2, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

#### 3.1 Розрахунок середніх температур:

Середня температура гарячого теплоносія:

$$t_1 = 0,5(t_{1n} + t_{1k}), ^\circ\text{C}; \quad (1.18)$$

Середня температура розчину кислоти:

$$t_2 = 0,5(t_{2n} + t_{2k}), ^\circ\text{C} \quad (1.19)$$

#### 3.2 Матеріальний баланс

Масова витрата гарячого теплоносія:

$$G_1 = \frac{V_1}{\tau_1} \rho_1, \text{ кг / с} \quad (1.20)$$

де  $\rho_1$  — густина гарячого теплоносія при температурі  $t_1$ ,  $\text{кг/м}^3$  [1].  
Масова витрата розчину кислоти:

$$G_2 = \frac{V_2}{\tau_2} \rho_2, \text{ кг / с} \quad (1.21)$$

де  $\rho_2$  — густина розчину кислоти при температурі  $t_2$ ,  $\text{кг/м}^3$ .

### 3.3 Тепловий баланс

Кількість теплоти, яка виділяється при охолодженні гарячого теплоносія:

$$Q_1 = G_1 c_1 (t_{1n} - t_{1к}), \text{ Вт} \quad (1.22)$$

Кількість тепла, яка витрачається на нагрівання розчину кислоти:

$$Q_2 = G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2n}), \text{ Вт}; \quad (1.23)$$

де  $C_1$  — питома теплоємність гарячого теплоносія при температурі  $t_1$ ,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;

$C_2$  — питома теплоємність розчину при температурі  $t_2$ ,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ .

### 3.4 Розрахунок експериментальних коефіцієнтів тепловіддачі

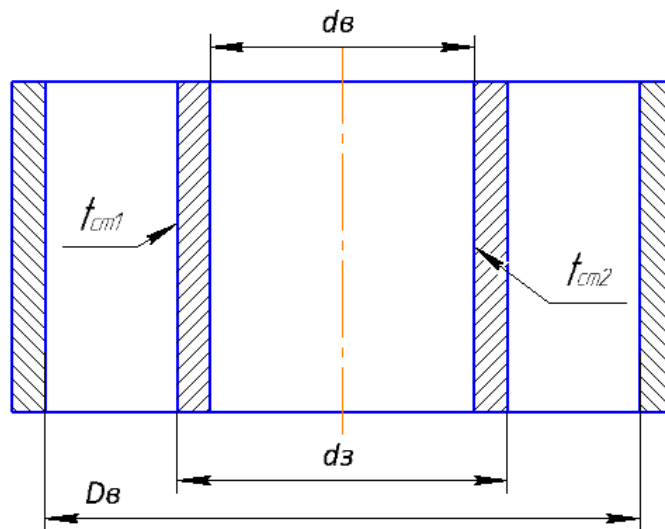


Рис. 1.2 Схема розподілення температур

Температура внутрішньої поверхні коаксіальної труби:

$$t_{cm2} = 0,5(t_1 + t_2) - 10, \text{ }^\circ\text{C} \quad (1.24)$$

Температура зовнішньої поверхні коаксіальної труби:

$$t_{cm1} = t_{cm2} + \frac{Q_1 \delta_{cm}}{F_1 \lambda_{cm}}, \text{ }^\circ\text{C} \quad (1.25)$$

де  $\delta_{cm} = 0,0015\text{ м}$  – товщина стінки коаксіальної труби;

$\lambda_{cm} = 1,121\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу коаксіальної труби – скла ;

$F_1$  – зовнішня поверхня коаксіальної труби

$$F_1 = \pi d_3 H \cdot 2 = 3,14 \cdot 0,012 \cdot 0,195 \cdot 2 = 0,0147\text{ м}^2.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від гарячого теплоносія до стінки коаксіальної труби:

$$\alpha_1 = \frac{Q_1}{F_1(t_1 - t_{cm1})}, \text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (1.26)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від коаксіальної труби до розчину кислоти:

$$\alpha_2 = \frac{Q_2}{F_2(t_{cm2} - t_2)}, \text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (1.27)$$

де  $F_2$  – внутрішня поверхня коаксіальної труби

$$F_2 = \pi d_6 H \cdot 2 = 3,14 \cdot 0,009 \cdot 0,195 \cdot 2 = 0,011\text{ м}^2.$$

Таблиця 1.3 – теоретичні розрахунки

№	$W_1, \text{ м/с}$	$W_2, \text{ м/с}$	$Re_1$	$Re_2$	$Nu_1$	$Nu_2$	$\alpha_1, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\alpha_2, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

### 3.5 Розрахунок теоретичних коефіцієнтів тепловіддачі

3.5.1 Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі від гарячого теплоносія до коаксіальної труби

Швидкість гарячої води в рубашці теплообмінника:

$$W_1 = \frac{V_1}{0,785(D_6^2 - d_3^2)\tau_1}, \text{ м / с} \quad (1.28)$$

де  $D_6 = 0,021 \text{ м}$  — внутрішній діаметр рубашки;  
 $d_3 = 0,012 \text{ м}$  — зовнішній діаметр коаксіальної труби.

Критерій Рейнольдса для гарячого теплоносія:

$$Re_1 = \frac{W_1 d_3}{\nu_1}, \quad (1.29)$$

де  $\nu_1$  — коефіцієнт кінематичної в'язкості води при температурі  $t_1, \text{ м}^2 / \text{ с}$ .

Критерій Нуссельта для гарячого теплоносія:

$$Nu_1 = 0,023 Re_1^{0,8} Pr_1^{0,4} \left( \frac{D_6}{d_3} \right)^{0,45} \quad (1.30)$$

де  $Pr_1$  — критерій Прандтля для гарячого теплоносія при температурі  $t_1, \text{ м}^2 / \text{ с}$

Розрахунковий коефіцієнт теплопровідності від гарячого теплоносія до стінки коаксіальної труби:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \lambda_1}{d_3}, \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К)} \quad (1.31)$$

де  $\lambda_1$  — коефіцієнт теплопровідності для води при температурі  $t_1, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

*3.5.2 Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі від коаксіальної труби до розчину кислоти*

Швидкість розчину в коаксіальній трубі:

$$W_2 = \frac{V_2}{0,785 d_6^2 \tau_2}, \text{ м / с} \quad (1.32)$$

Критерій Рейнольдса для розчину:

$$Re_2 = \frac{W_2 d_6}{\nu_2}, \quad (1.33)$$

де  $\nu_2$  — коефіцієнт кінематичної в'язкості розчину кислоти при температурі  $t_2, \text{ м}^2 / \text{ с}$ .

Критерій Нуссельта для розчину:

при  $Re_2 < 2 \cdot 10^3$

$$Nu_2 = 0,15 Re_2^{0,33} Pr_2^{0,33} (Gr_2 Pr_2)^{0,1} \left( \frac{Pr_2}{Pr_{cm2}} \right)^{0,25} \quad (1.34)$$

при  $2 \cdot 10^3 < Re_2 < 10^4$

$$Nu_2 = K_0 Pr_2^{0,43} \left( \frac{Pr_2}{Pr_{cm2}} \right)^{0,25} \quad (1.35)$$

при  $Re_2 \geq 10^4$

$$Nu_2 = 0,021 Re_2^{0,8} Pr_2^{0,43} \left( \frac{Pr_2}{Pr_{cm2}} \right)^{0,25} \quad (1.36)$$

де  $Pr_2 = \frac{\mu_2 c_2}{\lambda_2}$  — критерій Прандтля при температурі  $t_2, M^2 / c$ ;

$Pr_{cm2} = \frac{\mu_{cm2} c_{cm2}}{\lambda_{cm2}}$  — критерій Прандтля при температурі  $t_{cm2}, M^2 / c$ ;

$K_0 = f(Re_2)$  — коефіцієнт, який залежить від  $Re_2$ ;

$Gr_2 = \frac{g d_6^3}{\nu_2^2} \beta_2 (t_{cm2} - t_2)$  — критерій Грасгофа;

$\mu_2, \mu_{cm2}$  — коефіцієнт динамічної в'язкості розчину кислоти при температурі  $t_2$  і  $t_{cm2}, Pa \cdot c$ ;

$\nu_2$  — коефіцієнт кінематичної в'язкості розчину кислоти при температурі  $t_2, M^2 / c$ ;

$c_{cm2}$  — питома теплоємність розчину кислоти при температурі  $t_{cm2}, Pa \cdot c$ ;

$\lambda_2, \lambda_{cm2}$  — коефіцієнт теплопровідності розчину кислоти при температурі  $t_2$  і  $t_{cm2}, Wm / (M \cdot K)_{ct2}$ ;

$d_6 = 0,009 m$  — внутрішній діаметр коаксіальної труби;

$\beta_2$  — коефіцієнт об'ємного розширення розчину кислоти при температурі  $t_2,$

$K^{-1}$ .

Розрахунковий коефіцієнт тепловіддачі від стінки коаксіальної труби до розчину:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \lambda_2}{d_6}, Wm / (M^2 \cdot K) \quad (1.37)$$



## Контрольні запитання

1. Види температурних полів.
2. Поняття теплового потоку.
3. Способи передачі тепла.
4. Закон Фур'є.
5. Рівняння Ньютона-Ріхмана.
6. Режими при вимушеному русі рідини в трубі.
7. Який критерій визначає режим руху рідини?
8. Види конвективного теплообміну
9. Що називається температурним полем?
10. Градієнт температури величина векторна чи скалярна?
11. Теплопровідність – це ...
12. Конвективний теплообмін – це ...
13. Які Ви знаєте режими руху рідини
14. Які бувають види теплообміну?
15. Які види теплообміну були в лабораторній роботі?

## ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ № 1

### Вихідні дані:

Об'єм зібраного гарячого теплоносія  $V_1 = 1,02 \times 10^{-3} \text{ м}^3$ ;

Час збору гарячого теплоносія  $\tau_1 = 60 \text{ с}$ ;

Об'єм зібраного розчину кислоти  $V_2 = 1,5 \times 10^{-4} \text{ м}^3$ ;

Час збору розчину кислоти  $\tau_2 = 30 \text{ с}$ ;

Температура гарячого теплоносія на вході в теплообмінники  $t_{1н} = 79,9^\circ\text{C}$ ;

Температура гарячого теплоносія на виході із теплообмінників  $t_{1к} = 75,8^\circ\text{C}$ ;

Температура розчину кислоти на вході в теплообмінники  $t_{2н} = 20^\circ\text{C}$ ;

Температура розчину кислоти на виході із теплообмінників  $t_{2к} = 32,2^\circ\text{C}$ ;

Концентрація розчину соляної кислоти 3,76 %.

### 1.1 Середні температури

Середня температура гарячого теплоносія (1.18):

$$t_1 = 0,5(79,9 + 75,8) = 77,85^\circ\text{C}$$

Середня температура розчину кислоти (1.19):

$$t_2 = 0,5(20 + 32,2) = 26,1^\circ\text{C}$$

### 1.2 Матеріальний баланс

Масова витрата гарячого теплоносія (1.20):

$$G_1 = \frac{1,02 \cdot 10^{-3}}{60} \cdot 973,29 = 1,655 \cdot 10^{-2} \text{ кг / с}$$

де  $\rho_1 = \rho_1^{70} - \frac{\rho_1^{70} - \rho_1^{80}}{80 - 70}(t_1 - 70) = 978 - \frac{978 - 972}{80 - 70}(77,85 - 70) = 973,29 \text{ кг / м}^3$ ;

$\rho_1^{70} = 978 \text{ кг / м}^3$ ,  $\rho_1^{80} = 972 \text{ кг / м}^3$  – густина води відповідно при температурі  $70^\circ\text{C}$  та  $80^\circ\text{C}$ . (Додаток 1)

Масова витрата розчину кислоти (1.21):

$$G_2 = \frac{1,5 \cdot 10^{-4}}{30} \cdot 1010,38 = 5,052 \cdot 10^{-3} \text{ кг / с}$$

де  $\rho_2 = \rho_2^{20} - \frac{\rho_2^{20} - \rho_2^{30}}{30 - 20}(t_2 - 20) = 1011,6 - \frac{1011,6 - 1009,6}{30 - 20}(26,1 - 20) = 1010,38 \text{ кг / м}^3$ ;

$\rho_2^{20} = 1011,6 \text{ кг} / \text{м}^3, \rho_2^{30} = 1009,6 \text{ кг} / \text{м}^3$  – густина розчину кислоти відповідно при температурі  $20^\circ\text{C}$  і  $30^\circ\text{C}$ . (Додаток 2)

### 1.3 Тепловий баланс

Кількість теплоти, яка виділяється при охолодженні гарячого теплоносія (1.22):

$$Q_1 = 1,655 \cdot 10^{-2} \cdot 4190(79,9 - 75,8) = 284,312 \text{ Вт},$$

де  $c_1 = 4190 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$  – питома теплоємність води при температурі  $t_1 = 77,85^\circ\text{C}$ .

Кількість тепла, яке витрачається на нагрівання розчину кислоти (1.23):

$$Q_2 = 5,052 \cdot 10^{-3} \cdot 4061,5(32,2 - 20) = 250,328 \text{ Вт},$$

$$\text{де } c_2 = c_2^{20} - \frac{c_2^{20} - c_2^{30}}{30 - 20}(t_2 - 20) = 4066,3 - \frac{4066,3 - 4058,5}{30 - 20}(26,1 - 20) = 4061,5 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K});$$

$$c_2^{20} = 4066,3 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K});$$

$c_2^{30} = 4058,5 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$  — питома теплоємність розчину кислоти відповідно при температурі  $20^\circ\text{C}$  та  $30^\circ\text{C}$ . (Додаток 2)

### 1.4 Експериментальні коефіцієнти тепловіддачі

Температура внутрішньої поверхні коаксіальної трубки (1.24):

$$t_{cm2} = 0,5(77,85 + 26,1) - 10 = 41,98^\circ\text{C}$$

Температура зовнішньої поверхні коаксіальної трубки (1.25):

$$t_{cm1} = 41,98 + \frac{284,312 \cdot 0,0015}{0,0147 \cdot 1,121} = 67,86^\circ\text{C}$$

Коефіцієнт тепловіддачі від гарячого теплоносія до стінки коаксіальної труби (1.26):

$$\alpha_1 = \frac{284,312}{0,0147(77,85 - 67,86)} = 1936 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{K})$$

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки коаксіальної труби до розчину кислоти (1.27):

$$\alpha_2 = \frac{250,328}{0,011(41,98 - 26,1)} = 1433, \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

### 1.5 Теоретичні коефіцієнти тепловіддачі

Швидкість гарячого теплоносія (1.28):

$$W_1 = \frac{1,02 \cdot 10^{-3}}{0,785(0,021^2 - 0,012^2)60} = 0,0729 \text{ м} / \text{с}.$$

Критерій Рейнольдса (1.29):

$$Re_1 = \frac{0,0729 \cdot 0,012}{0,376 \cdot 10^{-6}} = 2326,6$$

$$\begin{aligned} \text{де } \nu_1 &= \nu_1^{70} - \frac{\nu_1^{70} - \nu_1^{80}}{80 - 70}(t_1 - 70) = 0,415 \cdot 10^{-6} - \frac{(0,415 - 0,365) \cdot 10^{-6}}{80 - 70}(77,85 - 70) = \\ &= 0,376 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}; \end{aligned}$$

$\nu_1^{70} = 0,415 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$ ,  $\nu_1^{80} = 0,365 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$  – коефіцієнти кінематичної в'язкості води відповідно при температурі  $70^\circ\text{C}$  та  $80^\circ\text{C}$ . (Додаток 1)

Критерій Нуссельта (1.30):

$$Nu_1 = 0,023 \cdot 2326,6^{0,8} \cdot 2,283^{0,4} \cdot \left(\frac{0,021}{0,012}\right)^{0,45} = 20,318,$$

$$\text{де } Pr_1 = Pr_1^{70} - \frac{Pr_1^{70} - Pr_1^{80}}{80 - 70}(t_1 - 70) = 2,55 - \frac{2,55 - 2,21}{80 - 70}(77,85 - 70) = 2,283$$

де

$Pr_1^{70} = 2,55$ ,  $Pr_1^{80} = 2,21$  – критерії Прандтля для води відповідно при температурі  $70^\circ\text{C}$  та  $80^\circ\text{C}$ . (Додаток 1)

Коефіцієнт тепловіддачі від гарячого теплоносія до стінки (1.31):

$$\alpha_1 = \frac{20,318 \cdot 0,672}{0,012} = 1137,8, \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

$$\begin{aligned} \text{де } \lambda_1 &= \lambda_1^{70} + \frac{\lambda_1^{80} - \lambda_1^{70}}{80 - 70}(t_1 - 70) = 0,668 + \frac{0,673 - 0,668}{80 - 70}(77,85 - 70) = \\ &= 0,672 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}); \end{aligned}$$

де  $\lambda_1^{70} = 0,668 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $\lambda_1^{80} = 0,673 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$  – коефіцієнт теплопровідності води відповідно при температурах  $70^\circ\text{C}$  та  $80^\circ\text{C}$ . (Додаток 1)

Швидкість розчину кислоти (1.32):

$$W_2 \frac{1,5 \cdot 10^4}{0,785 \cdot 0,009^2 \cdot 30} = 0,0786 \text{ м / с.}$$

Критерій Рейнольдса (1.33):

$$Re_2 = \frac{0,0786 \cdot 0,009}{0,955 \cdot 10^{-6}} = 740,733,$$

$$\begin{aligned} \text{де } v_2 &= v_2^{20} - \frac{v_2^{20} - v_2^{30}}{30 - 20} (t_2 - 20) = 1,075 \cdot 10^{-6} - \frac{(1,075 - 0,878) \cdot 10^{-6}}{30 - 20} (26,1 - 20) = \\ &= 0,955 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}; \end{aligned}$$

де  $v_2^{20} = 1,075 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$ ,  $v_2^{30} = 0,878 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$  – коефіцієнти кінематичної в'язкості розчину кислоти відповідно при температурі  $20^\circ\text{C}$  та  $30^\circ\text{C}$ . (Додаток 2)

Критерій Грасгофа:

$$Gr_2 = \frac{g d_e^3}{V_2^2} \beta_2 (t_{cm2} - t_2) = \frac{9,81 \cdot 0,009^3}{(0,955 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 3,647 \cdot 10^{-4} (41,98 - 26,1) = 45412,57$$

$$\begin{aligned} \text{де } \beta_2 &= \beta_2^{20} + \frac{\beta_2^{30} - \beta_2^{20}}{30 - 20} (t_2 - 20) = 2,488 \cdot 10^{-4} + \frac{(4,388 - 2,488) \cdot 10^{-4}}{30 - 20} (26,1 - 20) = \\ &= 3,647 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}; \end{aligned}$$

де  $\beta_2^{20} = 2,488 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ ,  $\beta_2^{30} = 4,388 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$  – коефіцієнти об'ємного розширення розчину кислоти відповідно при температурах  $20^\circ\text{C}$  і  $30^\circ\text{C}$ . (Додаток 2)

Критерій Прандтля:

$$Pr_2 = \frac{\mu_2 c_2}{\lambda_2} = \frac{0,964 \cdot 10^{-3} \cdot 4061,5}{0,5475} = 7,151$$

де

$$\begin{aligned} \mu_2 &= \mu_2^{20} - \frac{\mu_2^{20} - \mu_2^{30}}{30 - 20} (t_2 - 20) = 1,084 \cdot 10^{-3} - \frac{(1,084 - 0,887) \cdot 10^{-3}}{30 - 20} (26,1 - 20) = \\ &= 0,964 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}; \end{aligned}$$

де  $\mu_2^{20} = 1,084 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,  $\mu_2^{30} = 0,887 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$  – коефіцієнти динамічної в'язкості розчину кислоти відповідно при температурі  $20^\circ\text{C}$  і  $30^\circ\text{C}$ ; (Додаток 2)

$$\lambda_2 = \lambda_2^{20} - \frac{\lambda_2^{20} - \lambda_2^{30}}{30 - 20} (t_2 - 20) = 0,5525 - \frac{0,5525 - 0,5443}{30 - 20} (26,1 - 20) = 0,5475 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К});$$

де  $\lambda_2^{20} = 0,5525 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $\lambda_2^{30} = 0,5443 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$  – коефіцієнт теплопровідності розчину кислоти відповідно при температурі  $20^\circ\text{C}$  і  $30^\circ\text{C}$ . (Додаток 2)

Критерій Прандтля при температурі стінки:

$$Pr_{cm2} = \frac{\mu_{cm2} c_{cm2}}{\lambda_{cm2}} = \frac{0,712 \cdot 10^{-3} \cdot 4059,8}{0,545} = 5,304,$$

$$\text{де } \mu_{cm2} = \mu_2^{40} - \frac{\mu_2^{40} - \mu_2^{50}}{50 - 40} (t_{cm2} - 40) = 0,735 \cdot 10^{-3} - \frac{(0,735 - 0,619) \cdot 10^{-3}}{50 - 40} \times (41,98 - 40) = 0,712 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

де  $\mu_2^{40} = 0,735 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,  $\mu_2^{50} = 0,619 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ , – коефіцієнт динамічної в'язкості розчину кислоти відповідно при температурі  $40^\circ\text{C}$  і  $50^\circ\text{C}$ ; (Додаток 2)

$$c_{cm2} = c_2^{40} + \frac{c_2^{50} - c_2^{40}}{50 - 40} (t_{cm2} - 40) = 4059,6 + \frac{4060,4 - 4059,6}{50 - 40} (41,98 - 40) = 4059,8 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К});$$

де  $c_2^{40} = 4059,6 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ ,  $c_2^{50} = 4060,4 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$  – питома теплоємність розчину кислоти відповідно при температурі  $40^\circ\text{C}$  і  $50^\circ\text{C}$ ; (Додаток 2)

$$\lambda_{cm2} = \lambda_2^{40} - \frac{\lambda_2^{40} - \lambda_2^{50}}{50 - 40} (t_{cm2} - 40) = 0,5466 - \frac{0,5466 - 0,5386}{50 - 40} (41,98 - 40) = 0,545 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К});$$

де  $\lambda_2^{40} = 0,5466 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $\lambda_2^{50} = 0,5386 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$  — коефіцієнт теплопровідності розчину кислоти відповідно при температурі  $40^\circ\text{C}$  і  $50^\circ\text{C}$ . (Додаток 2)

Критерій Нуссельта:

$$Nu_2 = 0,15 Re_2^{0,33} Pr_2^{0,33} (Gr_2 Pr_2)^{0,1} \left( \frac{Pr_2}{Pr_{cm2}} \right)^{0,25} = 0,15 \cdot 740,733^{0,33} \times$$

$$\times 7,151^{0,33} (45412,57 \cdot 7,151)^{0,1} \left( \frac{7,151}{5,304} \right)^{0,25} = 9,741.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки коаксіальної труби до розчину кислоти (1.34):

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \lambda_2}{d_g} = \frac{9,741 \cdot 0,5475}{0,009} = 592,6 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Таблиця 1.4 Залежність  $K_0 = f(Re)$

Re	2100	2200	2300	2400	2500	3000	3500	4000	5000	6000	7000	8000	9000
$K_0$	2	2,7	3,6	4,1	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КИПІННЯ І КОНДЕНСАЦІЇ НАСИЧЕНОЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ НА ВЕРТИКАЛЬНІЙ ПОВЕРХНІ

Мета роботи: Дослідити процес конденсації насиченої водяної пари на вертикальній поверхні та процес кипіння у великому об'ємі.

#### 1 Основні теоретичні відомості

У біотехнологічній промисловості теплові процеси здійснюються при всіляких температурах. Часто в процесі теплообміну теплоносії змінюють свій агрегатний стан, наприклад, випаровуються, конденсуються. При цьому теплота підводиться до теплоносіїв чи відводиться від них при постійній температурі, поширюючись в двох фазах.

*Кипінням* називають процес пароутворення\*, що характеризується виникненням нових вільних поверхонь поділу рідкої та парової фаз всередині рідини, нагрітої вище температури насичення, рідина закипає, коли її температура  $T_{жс}$  стає вище температури насичення  $T''$  при даному тиску (рідина перегріта відносно її температури насичення  $T_{жс} > T''$ ).

Розрізняють два основних види (режими) кипіння – бульбашкове і плівкове.

Бульбашковим кипінням називають таке, при якому пара утворюється у вигляді бульбашок, що періодично зароджуються і ростуть на поверхні нагріву. Парова фаза може виникати і в об'ємі рідини, наприклад, при скиданні тиску в посудині. На поверхні нагріву найбільш сприятлива фізична обстановка для утворення бульбашок. Наприклад, у тонкому шарі біля стінки рідина перегріта більше, ніж в іншому об'ємі, на стінці є зародки парової фази у формі мікровпадин кінцевого радіуса кривизни, які заповнені газом або парою даної рідини; в зародках утворюються бульбашки.

У процесі бульбашкового кипіння теплота відводиться із пристінної області з парою парових бульбашок, тобто у формі теплоти пароутворення. Деяка частина теплоти відводиться у вигляді надлишкової ентальпії перегрітої рідини, що

---

\* Пароутворення – перехід речовини від рідкого чи твердого стану в газоподібний (пароподібний). Пароутворення з твердого стану називається сублимацією.



витісняється із пристінного шару паровими бульбашками при їх відриві від поверхні, яка віддає тепло.

Парові бульбашки в період росту та відриву від поверхні нагрівання інтенсифікують теплообмін.

По одній з гіпотез висока інтенсивність теплообміну при кипінні обумовлена турбулізацією пристінного шару рідини бульбашками пари, які утворюються на поверхні нагрівання. Бульбашки пари, що ростуть, відтискують від стінки шари перегрітої рідини, після відриву бульбашок на їхнє місце надходить «холодна» рідина.

По іншій гіпотезі висока інтенсивність теплообміну при кипінні обумовлена інтенсивним випаром мікрошару рідини під бульбашкою під час її росту; є експериментальні результати, що свідчать на користь цієї гіпотези.

Плівковим кипінням називають таке, при якому на поверхні нагрівання утворюється суцільна плівка пари, що періодично проривається в об'єм рідини.

Поверхня нагрівання в зазначених умовах відділена від рідини шаром пари, тепловий опір шару великий, тому інтенсивність теплообміну при плівковому кипінні на порядок менше, ніж при бульбашковому.

Вид кипіння (бульбашкове, плівкове) визначається значенням густини теплового потоку в поверхні нагрівання  $q_\omega$ , фізичними властивостями рідини і гідродинамічним режимом потоку.

Механізм переносу теплоти при бульбашковому кипінні досить складний і до кінця не з'ясований.

Встановлено, що інтенсивність теплообміну при кипінні залежить від:

- процесів зародження, росту й відриву бульбашки (характеристики процесів – критичний радіус бульбашки, швидкість росту, відривний діаметр і частота відриву);
- параметрів рідини (перегрів рідини  $T_{жс} > T''$ ; недогрів рідини  $T_{жс} < T''$ );
- швидкості примусової циркуляції рідини  $\omega_{ц}$ ;
- умов реалізації процесу або проведення дослідів  $q_\omega = \text{const}$  або  $T_\omega = \text{const}$ ).

Коефіцієнт тепловіддачі при кипінні води досягає значень порядку

$\alpha = 2 \cdot 10^3 \dots 4 \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . При високих тисках  $\alpha$  досягає значень  $(2 \dots 3) 10^5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

### *Кипіння у великому об'ємі*

Бульбашкове кипіння складається із двох явищ: першого – *зародження бульбашки*, другого – *росту і спливання*. Механізм зародження бульбашок поки не повністю ясний. Припускають, що зародок існує і з нього виростає бульбашка. Точна природа та походження зародків поки залишаються невідомими.

Розглянемо процес утворення бульбашки. Бульбашки пари зароджуються в центрах пароутворення (зародках). Мінімальний радіус зародка парової фази, у якій може випаруватися рідина при даному її перегріві, називається *критичним радіусом*  $R_K$ .

На твердій поверхні нагріву центрами паротворення є невеликі поглиблення і тріщини, заповнені газом або паром. Такі нерівності звичайно виникають на поверхні в процесі виготовлення елементів теплообмінників, наприклад труб або плоских стінок. Чим більше таких центрів, тим інтенсивніше відбувається процес пароутворення.

У процесі кипіння рідина випаровується в парові бульбашки, тобто з увігнутої поверхні поділу фаз. При рівноважній температурі насичення тиск пари над увігнутою поверхнею поділу фаз менше, ніж над плоскою, на величину

$$\Delta_1 p = \frac{2\sigma}{R} \frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \text{ (уточнення Томсона)}. \quad (2.1)$$

Тут  $\sigma$  – поверхневий натяг рідини;  $R$  – радіус кривизни поверхні поділу фаз;  $\rho'$  і  $\rho''$  – відповідно густина рідини та пари.

Щоб підняти тиск пари над увігнутою поверхнею до його тиску при випарі із плоскої границі поділу фаз, необхідно збільшити кінетичну енергію молекул рідини, підвищивши її температуру на деяку величину  $\Delta_1 T$ .

---

\* Кипіння при вільному русі в об'ємі рідини, розміри якого по всім напрямкам великі в порівнянні з відривним діаметром бульбашки.

Поверхня бульбашки є замкнутою. У результаті дії молекулярних сил зчеплення, нормальних до поверхні бульбашки, тиск пари в бульбашці  $p_{II}$  більше тиску в оточуючій його рідині  $p_{ж}$  на величину

$$\Delta_2 p = \frac{2\sigma}{R} \quad (\text{уточнення Лапласа}). \quad (2.2)$$

Для того щоб рідина могла випаровуватися в простір з більшим тиском, вона повинна бути додатково перегріта на величину  $\Delta_2 T$ . Сумарний перегрів рідини  $\Delta T = \Delta_1 T + \Delta_2 T$  необхідний для компенсації ефектів Лапласа й Томсона, тобто для компенсації сумарного перепаду тиску

$$\Delta p = \Delta_1 p + \Delta_2 p = \frac{2\sigma}{R} \frac{\rho''}{\rho' - \rho''} + \frac{2\sigma}{R} = \frac{2\sigma}{R} \frac{\rho'}{\rho' - \rho''}. \quad (2.3)$$

Рівняння (2.3) є умовою механічної рівноваги бульбашки.

Тиск пари усередині бульбашки більше, ніж тиск над плоскою поверхнею, тому температура насичення у середині бульбашки пари  $T_R''$  більше температури насичення над плоскою поверхнею  $T''$  при тиску рідини.

Для різних рідин відомі експериментальні залежності  $T'' = f(p)$  температури насичення від тиску.

Знаючи зазначену залежність, можна визначити температуру  $T_R''$  по наступній формулі:

$$T_R'' = T'' + \frac{dT''}{dp} \Delta p = T'' + \frac{dT''}{dp} \frac{2\sigma}{R} \frac{\rho'}{\rho' - \rho''}.$$

По формулі Клапейрона – Клаузіуса визначимо похідну  $dT''/dp$  на лінії насичення

$$\frac{dT''}{dp} = \frac{T''(\rho' - \rho'')}{r\rho'\rho''}.$$

Сполучаючи дві останні формули з урахуванням позначення  $\Delta T_R = T_R - T''$ , одержимо мінімальний радіус бульбашки, що виникає при даному перегріві рідини  $\Delta T_R$

$$R_{\min} = \frac{2T''\sigma}{r\rho''\Delta T_R}. \quad (2.4)$$

З (2.4) випливає, що при  $R \rightarrow 0 \quad \Delta T \rightarrow \infty$ . У реальних умовах перегрів має кінцеве та невелике значення, тобто утворення бульбашок може відбуватися при існуванні зародків парової фази кінцевого радіуса кривизни. Отже, формула (2.4) дозволяє знайти мінімальний радіус  $R_{\min}$  бульбашки, що може існувати при даному перегріві  $\Delta T_R$ .

Процес росту бульбашки біля центра пароутворення на поверхні нагрівання вивчався, наприклад, у такий спосіб. Обстежувався процес пароутворення в штучно створеному кінчному поглибленні (центрі пароутворення) на полірованій поверхні мідної пластини. Поглиблення одержували шляхом вдавлення в мідь голки з кутом при вершині, рівним  $18^\circ$ . Пластина з одним поглибленням поринала у воду. Вода нагрівалася повільно, так щоб температури води та пластини постійно були однакові. Нагрівання проводилося доти, доки не починався стабільний процес утворення бульбашок у поглибленні, їх відрив від поверхні та спливання. У цей момент вимірявся перегрів води. Значення перегріву, отримані шляхом розрахунку по формулі (2.4) і шляхом вимірювання, задовільно збіглися. При розрахунку в формулу (2.4) підставляли радіус поглиблення.

Експеримент показує, що процеси випарювання в бульбашку пари та у поглиблення, наповнене паром, однакові й можуть протікати при дуже малому перегріві рідини. У реальних умовах на технічних поверхнях, наприклад на металевих, процес кипіння при атмосферному тиску починається при малому перегріві рідини – всього в кілька градусів. Якщо в якості поверхні нагрівання використовувати скло, на якому значно менше поглиблень, чим, наприклад, на металі, то виявляється, що процес кипіння при атмосферному тиску починається при перегріві приблизно  $50^\circ\text{C}$ .

Результати експерименту з врахуванням сказаного вище підтверджують припущення, що центрами пароутворення на твердій поверхні нагрівання є малі поглиблення і тріщинки, заповнені газом або парою. Пара, що залишається в поглибленні, після відриву бульбашки служить зародком нової фази (пари). Якщо розміри зародка перевищують рівноважний розмір бульбашки пари при

даному перегріві рідини, то зародок називають життєздатним, тому що з нього будуть безупинно розвиватися бульбашки пари, відриватися від поверхні й спливати.

Всі зародки нової фази на поверхні нагрівання, розміри яких перевищують критичний розмір бульбашки, є життєздатними при даному перегріві рідини. При збільшенні перегріву рідини число життєздатних зародків збільшиться. З формули (2.4) випливає, що більшому  $\Delta T$  відповідає менший  $R_{\min}$ , тобто зародки, які при даному перегріві через малі розміри були нежиттєздатними, при більш високому перегріві, стають життєздатними.

Ріст бульбашки відбувається протягом малої частки секунди. Після відриву бульбашки потрібна пауза, а потім починається ріст наступної бульбашки. Після відриву бульбашки від поверхні нагріву простір, що звільнився, заповнюється рідиною. Температура рідини в основному об'ємі менше її температури в пристінному шарі, тому потрібен час (пауза) на прогрів рідини, після чого вона знову починає випаровуватися в зародок парової фази й на поверхні починається ріст нової бульбашки.

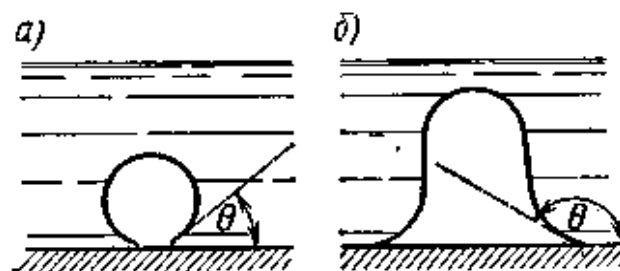


Рис. 2.1. Форма парових бульбашок на змочуваній (а) і не змочуваній рідиною (б) поверхнях:  $\theta$  – краєвий кут змочуваності

Бульбашка пари, що утворилася, швидко росте, досягає певного розміру (відривний діаметр  $d_0$ ), відривається від поверхні нагріву й спливає. Відривний діаметр бульбашки визначається взаємодією підйомної сили, поверхневого натягу та динамічного впливу потоку. Утворення бульбашок пари і відрив їх від поверхні відбувається по-різному в рідинах, що змочують і не змочують поверхню. Здатність рідини змочувати поверхню характеризується крайовим кутом  $\theta$ . Для рідин, що змочують поверхню,  $\theta < 90^\circ$ , наприклад для ефіру  $\theta = 16^\circ$ , гасу  $\theta = 26^\circ$ , води  $\theta = 50^\circ$ ; для рідин, що не змочують поверхню,  $\theta > 90^\circ$ , наприклад для ртуті  $\theta = 137^\circ$  (рис. 2.1).

Відривний діаметр  $d_0$  парових пухирців у спокійній рідині може визначатися в такий спосіб:

$$d_0 = 0,02 \cdot \theta \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}}. \quad (2.5)$$

Користуватися формулою (2.5) у практичних розрахунках важко, тому що даних про значення  $\theta$  мало, вони недостатньо надійні та суперечливі.

Відривний діаметр бульбашки пари для води, якщо кипіння відбувається у великому об'ємі при атмосферному тиску ( $T'' = 273 + 100 = 373 \text{ K}$ ), дорівнює приблизно  $d_0 = 2,5 \text{ мм}$ . Зі збільшенням тиску  $p$  відривний діаметр бульбашки  $d_0$  зменшується, а зі зменшенням  $p$  збільшується.

Дослідами встановлено, що температура киплячої рідини вище температури насичення  $T''$ , а коефіцієнт тепловіддачі від води до пари дуже великий, тому в процесі спливання відбувається збільшення об'єму бульбашки.

Частота утворення парових бульбашок  $f$ , вимірювана в  $\text{с}^{-1}$ , залежить від розміру відривного діаметра бульбашки  $d_0$ . Досліди показують, що ця залежність приблизно описується гіперболою, тобто  $d_0 \cdot f = \text{const}$ . Величина  $d_0 \cdot f$  ( $\text{м/с}$ ) характеризує швидкість росту парової бульбашки на поверхні нагрівання; вона залежить від багатьох факторів, урахувати їх поки не вдається (наприклад, при кипінні води у великому об'ємі, якщо тиск атмосферний, частота утворення дорівнює  $f = 62 \text{ с}^{-1}$ ).

Вище розглянуті процеси утворення, росту, відриву та спливання бульбашки, які дозволяють скласти деяке уявлення про складну фізичну обстановку при бульбашковому кипінні у великому об'ємі. Характеристики зазначених процесів (критичний радіус, швидкість росту, відривний діаметр і частота відриву) для одиночної бульбашки зміняться, коли вона виявиться серед безлічі інших, де всі вони впливають одна на одну. Створити методику розрахунку теплообміну при бульбашковому кипінні по відомих характеристиках для одиночної бульбашки не можна.

Коефіцієнт тепловіддачі при кипінні у великому об'ємі можна розрахувати по формулі:

$$Nu_{\sigma} = c(Pe_* K_t^{0,63} K_{\sigma}^{0,5})^n, \quad (2.6)$$

де  $Pe_* = ql_*/(rp''a)$  – критерій Пекле для процесу пароутворення;  $q/rp''$  – швидкість пароутворення,  $m^3/(m^2 \cdot c)$  – визначає кількість кубічних метрів пари, що утворюються в одиницю часу на  $1 m^2$  поверхні нагрівання;

$$K_t = \frac{(rp'')^2 l_*}{T'' c_p \sigma \rho'}; \quad K_{\sigma} = \frac{r}{gl_*}; \quad l_* = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}}.$$

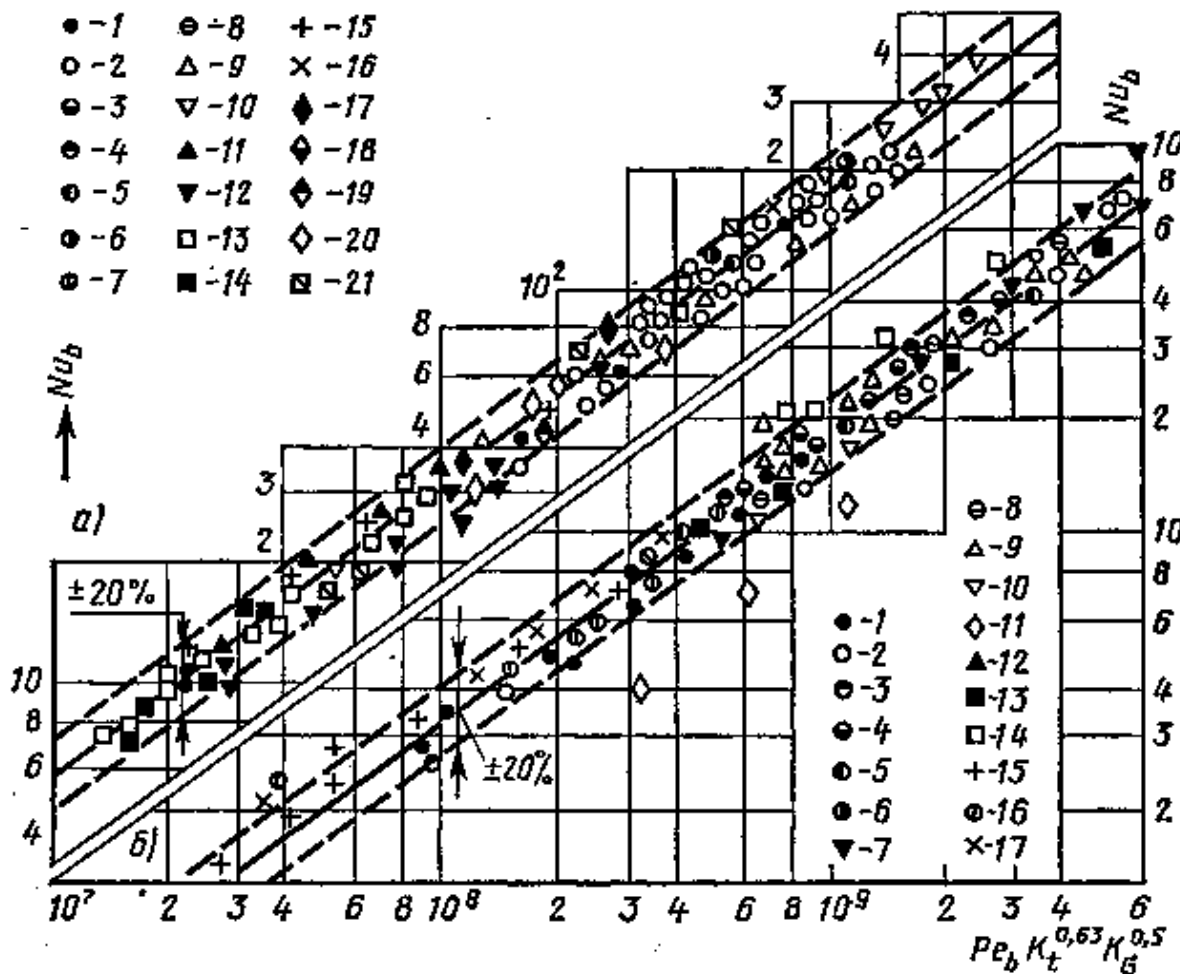


Рис. 2.2. Тепловіддача при кипінні деяких рідин у великому об'ємі. Зіставлення експериментальних значень чисел Нуссельта (точки) з обчисленими по узагальненій залежності (6) (лінії):

*a* – *t* – 7 – вода,  $p = 0,098; 0,587; 2,25; 5,48; 9,8; 14,7$  і  $17,8$  МПа 8 – 10 – вода  $p = 0,45; 0,98$  і  $19,6$  МПа; 11 – метиловий спирт,  $p = 0,098$  МПа; 12 – *H*-(нормальний) бутиловий спирт,  $p = 0,098$  МПа; 13 – ізопропіловий спирт,  $p = 0,098$  МПа; 14 – чотирьох хлористий вуглець,  $p = 0,098$  МПа; 15 – азот,  $p = 0,098$  МПа; 16 – 20 – вода,  $p = 0,1; 0,05; 0,03; 0,02$  і  $0,011$  МПа; 21 – дифеніл,  $p = 0,252$  МПа;

*б* – *t* – 10 – етиловий спирт,  $p = 0,098; 0,3; 0,5; 0,686; 0,98; 1,94; 2,94; 3,95; 4,9$  і  $5,29$  МПа; 11 – 14 – етиловий спирт,  $p = 0,294; 0,98; 1,96$  і  $3,36$  МПа; 15 – 17 – бензол,  $p = 0,101; 0,245$  і  $0,353$  МПа

Зіставлення дослідних даних з формулою (2.6) показано на рис. 2.2. Із графіків зазначеного рисунка випливає, що при значеннях комплексу  $N = Pe_{\sigma} K_t^{0,63} K_{\sigma}^{0,5} \geq 10^7$  величини  $c$  і  $n$  рівні:  $c = 3,2 \cdot 10^{-5}$ ;  $n = 0,75$ . За умови  $10^5 < N < 10^7$ :  $c = 0,1$ ;  $n = 0,25$ .

Як видно з рис. 2.2, більша частина дослідних даних, отриманих при кипінні рідин з різними фізичними властивостями, узагальнюються формулою (2.6) з точністю  $\pm 20\%$ .

*Конденсацією* називають процес переходу речовини з газоподібного стану в рідкий або твердий. Конденсація у твердий стан називається десублімацією. Розрізняють конденсацію в об'ємі пари або парогазовій суміші й конденсацію на поверхні твердого тіла або рідини, з якими пара (парогазова суміш) перебуває в контакті.

Розглянемо тепловіддачу в процесі конденсації чистої пари на твердій поверхні. *Чистою* називається пара, що не містить домішок інших парів і газів.

Робота багатьох теплообмінних пристроїв супроводжується конденсацією й тому тепловіддача в цих умовах повинна бути вивчена.

Пара починає конденсуватися на поверхні, якщо її температура підтримується нижче температури насичення при даному тиску. Розрізняють плівкову й краплинну конденсації.

*Плівкова конденсація* – це процес переходу речовини з газоподібного стану в рідке на *гідрофільній* (добре змочуваній рідиною) поверхні твердого тіла, при якому утворюється суцільна плівка конденсату.

*Краплинна конденсація* – це процес переходу речовини з газоподібного стану в рідкий на *гідрофобній* (не змочуваною рідиною) поверхні твердого тіла, при якому на ній утворюються окремі краплі конденсату.

При плівковій конденсації на вертикальній стінці плівка конденсату під дією сили тяжіння стікає зверху вниз; товщина плівки в міру її просування вниз збільшується. У верхній частині товщина плівки мала і режим руху ламінарний. Якщо висота вертикальної поверхні досить велика, то на деякій відстані від верхнього краю товщина плівки досягає критичного значення та режим її руху



переходить у турбулентний. При конденсації пари на поверхні горизонтальних труб довжина поверхні конденсації незначна, тому режим течії плівки конденсату практично завжди ламінарний.

Коефіцієнт тепловіддачі в процесі плівкової конденсації водяної пари при атмосферному тиску досягає значень порядку  $\alpha = (7...12) \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . При краплинній конденсації на поверхні нагрівання утворюються крапельки рідини, згодом вони ростуть і, досягаючи певного розміру, скачуються по вертикальній стінці, захоплюючи за собою інші краплі, при цьому створюються сприятливі умови для тепловіддачі. Краплі збільшують поверхню теплообміну і, крім того, процес скочування краплі інтенсифікує перенос теплоти. У результаті коефіцієнт тепловіддачі в процесі краплинної конденсації водяної пари при атмосферному тиску може досягати значень порядку  $(4...10) \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Можна одержати компактний конденсатор, якщо здійснювати в ньому краплинну конденсацію. Були початі спроби створити умови, при яких повинна відбуватися краплинна конденсація, наприклад, шляхом добавки гідрофобізаторів\* у пару або нанесення їх на поверхню стінки. Однак такий спосіб інтенсифікації тепловіддачі при конденсації поки не одержав широкого поширення. У сучасних конденсаторах практично завжди здійснюється плівкова конденсація.

Процес теплообміну при конденсації описується критеріальним рівнянням виду

$$Nu = c(Ga \cdot Pr \cdot K)^n,$$

де  $Nu$  – критерій Нусельта, який характеризує процес теплообміну конвекцією в об'ємі пари і теплопровідності в шарі конденсату на поверхні конденсації.

$$Nu = \frac{\alpha_1 H}{\lambda}, \text{ звідки } \alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{H},$$

де  $\alpha_1$  – коефіцієнт тепловіддачі від пари до поверхні трубки,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності конденсату  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  при температурі  $T_{\text{конд}}$ ,

---

\* Гідрофобізатор – речовина, яка наноситься на поверхню тіла з ціллю підтримання крапельної конденсації (шляхом утворення гідрофобного поверхневого шару), наприклад деякі жири і парафіни.

$H$  – визначальний розмір,  $m$ , у випадку конденсації на вертикальній поверхні;  
 $Ga$  – критерій Галілея;  $Pr$  – критерій Прандтля;  $K$  – критерій конденсації.

$$Ga = \frac{gH^3}{\nu^2}; \quad K = \frac{r}{C\Delta t}. \quad (2.8)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від поверхні трубки до охолоджуючої води,  $Bm/(m^2 \cdot K)$ :

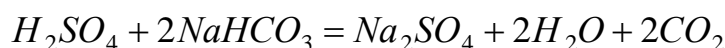
$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{H}, \quad (2.9)$$

де  $\lambda_2$  – коефіцієнт теплопровідності води,  $Bm/(m \cdot K)$ , а критерій Нуссельта визначимо:

$$Nu_6 = 0,023 Re_6^{0,8} Pr_6^{0,4} \left( \frac{D_6}{d_3} \right)^{0,45}. \quad (2.10)$$

## 2 Приготування робочого розчину

При приготуванні робочого розчину використовуємо взаємодію сірчаної кислоти з питною содою, яка проходить за хімічною реакцією:



де  $M_{H_2SO_4} = 98,07 \text{ г / моль}$  молекулярна маса сірчаної кислоти;

$M_{NaHCO_3} = 84,01 \text{ г / моль}$  молекулярна маса питної соди;

$M_{Na_2SO_4} = 142,04 \text{ г / моль}$  молекулярна маса сірчаноокислого натрію або сульфату натрію.

Для проведення реакції беремо  $V_{H_2SO_4}^{98\%} = 32 \text{ мл}$  розчину 98%-ої сірчаної кислоти,

в якому міститься:

100% -ої сірчаної кислоти

$$G_{H_2SO_4}^{100\%} = 0,98 \cdot V_{H_2SO_4}^{98\%} \cdot \rho_{H_2SO_4}^{98\%} = 0,98 \cdot 32 \cdot 1,837 = 57,608 \text{ г}$$

води

$$G_{H_2O}^k = 0,02 \cdot V_{H_2SO_4}^{98\%} \cdot \rho_{H_2SO_4}^{98\%} = 0,02 \cdot 32 \cdot 1,837 = 1,176 \text{ г}.$$

Визначаємо масу питної соди, яка потрібна для проведення реакції:

$$G_{NaHCO_3} = \frac{G_{H_2SO_4}^{100\%} \cdot 2 \cdot M_{NaHCO_3}}{M_{H_2SO_4}} = \frac{57,608 \cdot 2 \cdot 84,01}{98,07} = 98,698 \text{ г}.$$

Визначимо масу сульфату натрію, який утворився в результаті реакції:

$$G_{Na_2SO_4} = \frac{G_{H_2SO_4}^{100\%} \cdot M_{Na_2SO_4}}{M_{H_2SO_4}} = \frac{57,608 \cdot 142,04}{98,07} = 83,437 \text{ г}$$

Визначаємо масу води, яка утворюється в результаті реакції:

$$G_{H_2O}^p = \frac{G_{H_2SO_4}^{100\%} \cdot 2 \cdot M_{H_2O}}{M_{H_2SO_4}} = \frac{57,608 \cdot 2 \cdot 18}{98,07} = 21,147 \text{ г}.$$

Висипаємо в колбу 98,698 г  $NaHCO_3$  та виливаємо в неї 32 мл  $H_2SO_4$  і порційно доливаємо 450 г води.

Визначаємо концентрацію сульфату натрію в робочому розчині:

$$X_{Na_2SO_4} = \frac{100 \cdot G_{Na_2SO_4}}{G_{H_2O} + G_{H_2O}^p + G_{H_2O}^k + G_{Na_2SO_4}} = \frac{100 \cdot 83,437}{450 + 21,147 + 1,176 + 83,437} = 15,013\%$$

### 3 Методика проведення дослідження та основні виміри

Перелити розчин солі в термостійку колбу. Герметично закрити колбу пробкою, в якій вмонтовано термометр та трубка для виведення пари. Помістити колбу в нагрівальний пристрій та ввімкнути його (нагрівальний пристрій вмикається лише з дозволу викладача).

Після вмикання та прогріву пристрою для прогріву у термостійкій колбі нагрівається та з часом закипає розчин. Температура розчину вимірюється за допомогою термометра. Після закипання розчину пара з колби проходить через трубку у верхню частину холодильника-конденсатора, в між трубний простір якого поступає холодний теплоносій (вода). В холодильнику-конденсаторі пара конденсується, а конденсат охолоджується і збирається у мірному циліндрі.

Через проміжки часу, вказані викладачем, проводяться наступні виміри:

1. Час заміру витрати холодного теплоносія  $\tau_6$ , с;
2. Час заміру витрати конденсату  $\tau_k$ , с;
3. Температури:
  - конденсату  $t_k$  °С;
  - теплоносія до та після конденсатора  $t_{61}$  і  $t_{62}$  °С.
4. Об'єм конденсату  $V_k$ , м<sup>3</sup>.

5. Об'єм теплоносія  $V_6, \text{м}^3$ .

Результати вимірів заносяться до табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати вимірювань

№	$\tau_k, \text{с}$	$V_k, \text{м}^3$	$t_k, ^\circ\text{C}$	$\tau_6, \text{с}$	$V_6, \text{м}^3$	$t_{61}, ^\circ\text{C}$	$t_{62}, ^\circ\text{C}$
1							
2							
3							
4							
5							

#### 4 Методика обробки експериментальних даних

Таблиця 2.2 – Обробка результатів вимірювань

№	$G_k = V_k \rho_k / \tau_k,$ $\text{кг/с} \cdot 10^6$	$t_6 = 0,5(t_{61} + t_{62}), ^\circ\text{C}$	$G_6 = V_6 \rho_6 / \tau_6,$ $\text{кг/с} \cdot 10^6$
1			
2			
3			
4			
5			

##### 4.1 Розрахунок середніх температур

Середня температура холодного теплоносія:

$$t_6 = 0,5(t_{61} + t_{62}), ^\circ\text{C} \quad (2.11)$$

Температура насичення:

$$t_H = 100 ^\circ\text{C}$$

##### 4.2 Матеріальний баланс

Масова витрата конденсату:

$$G_k = \frac{V_k}{\tau_k} \rho_k, \text{кг/с} \quad (2.12)$$

де  $\rho_k$  – густина води при температурі  $t_k$ ,  $\text{кг/м}^3$ .

Масова витрата холодного теплоносія:

$$G_6 = \frac{V_6}{\tau_6} \rho_6, \text{кг/с} \quad (2.13)$$

де  $\rho_6$  — густина води при температурі  $t_6$ ,  $\text{кг/м}^3$

##### 6.3 Тепловий баланс

Визначення теплоти, що віддається охолоджуючій воді при конденсації:

$$Q_{\text{кон}} = G'_k r, \text{ Вт} \quad (2.14)$$

де  $r = 2260 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{кг}$  – питома теплота конденсації водяної пари при температурі  $t_n$ ;

$t_n = 100^\circ\text{C}$  – температура насичення.

Визначення теплоти, що віддається охолоджувальній воді від конденсату:

$$Q_b = G'_e C_e (t_{b2} - t_{b1}), \text{ Вт} \quad (2.15)$$

де  $C_b$  – питома теплоємність води при температурі,  $t_b \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ .

Теплота, яка віддається при охолодженні конденсату:

$$Q_k = Q_e - Q_{\text{кон}}, \text{ Вт} \quad (2.16)$$

Температура плівки конденсату в зоні конденсації:

$$t_{\text{пл}} = t_k + \frac{Q_k}{C_k G_k}, \quad (2.17)$$

де  $C_k$  – питома теплоємність конденсату в  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$  при температурі  $0,5(t_{\text{пл}} + t_k)$ ;  $C_k = 4190 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$

Температура охолоджуючої води в кінці зони конденсації:

$$t_{\text{вк}} = t_{\text{в1}} + \frac{Q_k}{C_{\text{вк}} G_e}, \quad (2.18)$$

де  $C_{\text{вк}}$  – питома теплоємність охолоджуючої води в  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$  при температурі  $0,5(t_{\text{вк}} + t_{\text{в1}})$ ;  $C_{\text{вк}} = 4180 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$ .

#### 4.4 Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі при конденсації пари:

Критерій Галілея

$$G_{a_{\text{пл}}} = \frac{g(0,25H)^3}{v_{\text{пл}}^2}, \quad (2.19)$$

де  $v_{\text{пл}}$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості конденсату при температурі  $t_{\text{пл}}$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$H = 0,3 \text{ м}$  – висота рубашки.

Критерій конденсації:

$$Pi_{nl} = \frac{r}{C_{nl}\Delta t}, \quad (2.20)$$

де  $C_{nl}$  – питома теплоємність конденсату при температурі  $t_{nl}$ , Дж/(кг·К);

$\Delta t$  – різниця між температурами пари та стінки  $\Delta t = t_n - t_{cm}$ , К;

$t_{cm}$  – температура стінки  $t_{cm} = 2t_{nl} - t_n$ , °С .

Критерій Нуссельта:

$$Nu_{nl} = c(Ga_{nl} \cdot Pr_{nl} \cdot Pi_{nl})^n, \quad (2.21)$$

де  $Pr_{nl}$  – критерій Прандтля для конденсату при температурі  $t_{nl}$ .

В залежності від значення добутку  $Ga_{nl} \cdot Pr_{nl} \cdot Pi_{nl}$  коефіцієнти  $c$  і  $n$  приймають наступні значення:

при  $Ga_{nl} \cdot Pr_{nl} \cdot Pi_{nl} < 10^5$   $c = 1,13$   $n = 0,33$

при  $Ga_{nl} \cdot Pr_{nl} \cdot Pi_{nl} > 10^5$   $c = 1,15$   $n = 0,25$

Коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_{кон} = \frac{Nu_{nl} \lambda_{nl}}{0,25H}, \quad \frac{Вт}{м^2 \cdot К} \quad (2.22)$$

де  $\lambda_{nl}$  – коефіцієнт теплопровідності конденсату при температурі  $t_{nl}$ , Вт/(м·К)

4.5 Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі від стінки трубки до охолоджуючої води

Швидкість охолоджуючої води:

$$W_{\epsilon} = \frac{4G_{\epsilon}}{\pi [D^2 - (d + 2\delta)^2] \rho_{\epsilon}}, \quad м/с \quad (2.23)$$

де  $\rho_{\epsilon}$  – густина води при температурі  $t_{\epsilon}$ , кг/м<sup>3</sup>

$D = 0,018$  м — внутрішній діаметр рубашки;

$d = 0,011$  м — внутрішній діаметр внутрішньої трубки;

$\delta = 0,0015$  м — товщина стінки трубки.

Критерій Рейнольдса:

$$Re_{\epsilon} = \frac{W_{\epsilon} (d + 2\delta)}{\nu_{\epsilon}}, \quad (2.24)$$

де  $\nu_{\epsilon}$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості води при температурі  $t_{\epsilon}$ , м<sup>2</sup>/с.

Критерій Нуссельта:

$$Nu_{\epsilon} = 0,023 Re_{\epsilon}^{0,8} Pr_{\epsilon}^{0,4} \left( \frac{D}{d + 2\delta} \right)^{0,45}, \quad (2.25)$$

де  $Pr_{\epsilon}$  – критерій Прандтля для води при температурі  $t_{\epsilon}$ .

Коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_{\epsilon} = \frac{Nu_{\epsilon} \lambda_{\epsilon}}{d + 2\delta}, \quad Bm/(m^2 \cdot K) \quad (2.26)$$

де  $\lambda_{\epsilon}$  – коефіцієнт теплопровідності води при температурі  $t_{\epsilon}$ ,  $Bm/(m \cdot K)$ .

#### 4.6 Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі від плівки конденсату до стінки трубки

Середня температура плівки конденсату:

$$t_{\kappa_{nl}} = 0,5(t_{nl} + t_{\kappa}), \quad ^{\circ}C \quad (2.27)$$

Приведена товщина плівки конденсату:

$$\delta_{np} = \left( \frac{\mu_{\kappa}^2}{\rho_{\kappa} g} \right)^{1/3}, \quad m \quad (2.28)$$

де  $\mu_{\kappa}$  – коефіцієнт динамічної в'язкості конденсату при температурі  $t_{\kappa_{nl}}$ ,  $Pa \cdot s$ ;

$\rho_{\kappa}$  – густина конденсату при температурі  $t_{\kappa}$ ,  $kg/m^3$ ,

Лінійна масова густина зрошення

$$\Gamma = \frac{G_{\kappa}}{\pi d}, \quad kg/(m \cdot s) \quad (2.29)$$

Критерій Рейнольдса:

$$Re_{\kappa} = \frac{4\Gamma}{\mu_{\kappa}} \quad (2.30)$$

Критерій Нуссельта

$$Nu_{\kappa} = 0,67 Re_{\kappa}^{0,11} Pr_{\kappa}^{0,33} \left( \frac{\delta_{np}}{0,75H} \right)^{0,33}, \quad (2.31)$$

де  $Pr_{\kappa}$  – критерій Прандтля для плівки конденсату при температурі  $t_{\kappa_{nl}}$ ,

Коефіцієнт теплопровідності:

$$\alpha_{\kappa} = \frac{Nu_{\kappa} \lambda_{\kappa}}{\delta_{np}}, \quad Bm/(m^2 \cdot K) \quad (2.32)$$

де  $\lambda_{\kappa}$  – коефіцієнт теплопровідності конденсату при температурі  $t_{\kappa_{nl}}$ ,  $\frac{Вт}{м \cdot К}$ .

### 6.7 Розрахунок поверхні теплопередачі

Коефіцієнти теплопередачі:

в зоні конденсації

$$K_{кон} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{кон}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\epsilon}}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (2.33)$$

в зоні охолодження конденсату

$$K_{ох} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\kappa}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\epsilon}}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (2.34)$$

де  $\lambda = 0,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу трубки.

Середні температурні напори:

в зоні конденсації

$$\Delta t_{cp_{\kappa}} = \frac{(t_n - t_{\epsilon 2}) - (t_{nl} - t_{\epsilon \kappa})}{\ln \frac{t_n - t_{\epsilon 2}}{t_{nl} - t_{\epsilon \kappa}}}, \text{ К}; \quad (2.35)$$

в зоні охолодження конденсату

$$\Delta t_{cp_{ох}} = \frac{(t_{nl} - t_{\epsilon \kappa}) - (t_{\kappa} - t_{\epsilon 1})}{\ln \frac{t_{nl} - t_{\epsilon \kappa}}{t_{\kappa} - t_{\epsilon 1}}}, \text{ К}. \quad (2.37)$$

Розрахункова поверхня теплопередачі:

$$F_p = \frac{Q_{кон}}{K_{кон} \Delta t_{cp_{\kappa}}} + \frac{Q_{\kappa}}{K_{ох} \Delta t_{cp_{ох}}}, \text{ м}^2. \quad (2.37)$$

Дійсна поверхня теплопередачі:

$$F = 0,0306 \text{ м}^2$$

Порівнюємо розрахункову поверхню теплопередачі з дійсною та робимо висновки.



## Контрольні запитання

1. Умови конденсації насиченої пари
2. Умови конденсації перегрітої пари
3. Конденсація це ...
4. Види конденсацій
5. Який процес називають кипінням?
6. Які бувають режими кипіння?
7. Десублімація це...
8. Гідрофобна та гідрофільна поверхня
9. Що таке чиста пара?
10. Види теплообміну
11. З яких явищ складається бульбашкове кипіння?
12. Плівкова конденсація це ...
13. Краплинна конденсація це ...
14. При якій конденсації коефіцієнт теплопровід дачі більший?
15. Від чого залежить інтенсивність теплообміну при кипінні?

## ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ № 2

### **Вихідні дані:**

Об'єм зібраного холодного теплоносія  $V_g = 530 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ;

Час збору холодного теплоносія  $\tau_g = 30 \text{ с}$ ;

Об'єм зібраного конденсату  $V_k = 40 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ;

Час збору конденсату  $\tau_k = 300 \text{ с}$ ;

Температура конденсату  $t_k = 24^\circ\text{C}$ ;

Температура холодного теплоносія на вході в холодильник–конденсатор

$t_{e1} = 17,9^\circ\text{C}$ ;

Температура холодного теплоносія на виході з холодильника–конденсатора

$t_{e2} = 21,6^\circ\text{C}$ .

### *2.1 Середня температура*

Середня температура холодного теплоносія (2.11):

$$t_g = 0,5(t_{e1} + t_{e2}) = 0,5(17,9 + 21,6) = 19,75^\circ\text{C}.$$

### *2.2 Матеріальний баланс*

Масова витрата конденсату (2.12):

$$G_k = \frac{40 \cdot 10^{-6}}{300} \cdot 997,2 = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ кг / с},$$

$$\text{де } \rho_k = \rho_k^{20} - \frac{\rho_k^{20} - \rho_k^{30}}{30 - 20} (t_k - 20) = 998 - \frac{998 - 996}{30 - 20} (24 - 20) = 997,2 \text{ кг / м}^3;$$

де  $\rho_k^{20} = 998 \text{ кг / м}^3$ ,  $\rho_k^{30} = 996 \text{ кг / м}^3$  – густина води відповідно при температурі  $20^\circ\text{C}$  та  $30^\circ\text{C}$ . (Додаток 1)

Масова витрата холодного теплоносія (2.13):

$$G_g = \frac{530 \cdot 10^{-6}}{30} \cdot 998,05 = 1,7632 \cdot 10^{-2} \text{ кг / с},$$

$$\begin{aligned} \text{де } \rho_g &= \rho_g^{10} - \frac{\rho_g^{10} - \rho_g^{20}}{20 - 10} (t_g - 10) = 1000 - \frac{1000 - 998}{20 - 10} (19,75 - 10) = \\ &= 998,05 \text{ кг / м}^3; \end{aligned}$$

де  $\rho_6^{10} = 1000 \text{ кг} / \text{м}^3$ ,  $\rho_6^{20} = 998 \text{ кг} / \text{м}^3$  – густина води відповідно при температурі  $10^\circ\text{C}$  і  $20^\circ\text{C}$ . (Додаток 1)

### 2.3 Тепловий баланс

Теплота, яка виділяється при конденсації (2.14):

$$Q_{\text{кон}} = 1,33 \cdot 10^{-4} \cdot 2260 \cdot 10^3 = 300,58 \text{ Вт}.$$

Теплота, яка витрачається на нагрівання холодного теплоносія (2.15):

$$Q_6 = G_6 c_6 (t_{62} - t_{61}) = 1,7632 \cdot 10^{-2} \cdot 4190 (21,6 - 17,9) = 273,35 \text{ Вт}$$

Теплота, яка виділяється при охолодженні конденсату (2.16):

$$Q_{\text{к}} = 300,58 - 273,35 = 27,23 \text{ Вт}.$$

Температура плівки конденсату в зоні конденсації (2.17):

$$t_{\text{пл}} = 24 + \frac{27,23}{4180 \cdot 1,33 \cdot 10^{-4}} = 72,98^\circ\text{C}$$

Температура холодного теплоносія в кінці зони конденсації (2.18):

$$t_{\text{ск}} = 17,9 + \frac{27,23}{4190 \cdot 1,7632 \cdot 10^{-2}} = 18,27^\circ\text{C}$$

### 2.4 Коефіцієнт тепловіддачі при конденсації

Критерій Галілея (2.19)

$$Ga_{\text{пл}} = \frac{9,81(0,25 \cdot 0,3)^3}{(0,4 \cdot 10^{-6})^2} = 2,5866 \cdot 10^{10},$$

$$\begin{aligned} \text{де } v_{\text{пл}} &= v_{\text{пл}}^{70} - \frac{v_{\text{пл}}^{70} - v_{\text{пл}}^{80}}{80 - 70} (t_{\text{пл}} - 70) = 0,415 \cdot 10^{-6} - \frac{(0,415 - 0,365) \cdot 10^{-6}}{80 - 70} (72,98 - 70) = \\ &= 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}; \end{aligned}$$

де  $v_{\text{пл}}^{70} = 0,415 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$ ,  $v_{\text{пл}}^{80} = 0,365 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$  – кінематична в'язкість води відповідно при температурі  $70^\circ\text{C}$  та  $80^\circ\text{C}$ . (Додаток 1)

Критерій конденсації (2.20):

$$Pi_{\text{пл}} = \frac{2260 \cdot 10^3}{4190 \cdot 54,04} = 9,9811,$$

де  $c_{\text{пл}} = 4190 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$  – питома теплоємність води при температурі  $t_{\text{пл}} = 72,98^\circ\text{C}$ ;

$$\Delta t = t_n - t_{cm} = 100 - 45,96K$$

$$t_{cm} = 2t_{nl} - t_n = 2 \times 72,98 - 100 = 45,96K$$

Критерій Нуссельта (2.21):

$$Nu_{nl} = 1,15(Ga_{nl} Pr_{nl} \Pi_{nl})^{0,25} = 1,15(2,5866 \cdot 10^{10} \cdot 2,449 \cdot 9,9811)^{0,25} = 1025,468,$$

$$\text{де } Pr_{nl} = Pr_{nl}^{70} - \frac{Pr_{nl}^{70} - Pr_{nl}^{80}}{80 - 70}(t_{nl} - 70) = 2,55 - \frac{2,55 - 2,21}{80 - 70}(72,98 - 70) = 2,449$$

де  $Pr_{nl}^{70} = 2,55$ ,  $Pr_{nl}^{80} = 2,21$  — критерій Прандтля для води відповідно при температурі  $70^{\circ}C$  та  $80^{\circ}C$ . (Додаток 1)

Коефіцієнт тепловіддачі (2.22):

$$\alpha_{кон} = \frac{1025,468 \cdot 0,6695}{0,25 \cdot 0,3} = 9154 \text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

$$\begin{aligned} \text{де } \lambda_{nl} &= \lambda_{nl}^{70} + \frac{\lambda_{nl}^{80} - \lambda_{nl}^{70}}{80 - 70}(t_{nl} - 70) = 0,668 + \frac{0,673 - 0,668}{80 - 70}(72,98 - 70) = \\ &= 0,6695 \text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}); \end{aligned}$$

де  $\lambda_{nl}^{70} = 0,668 \text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $\lambda_{nl}^{80} = 0,673 \text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$  — коефіцієнти теплопровідності води відповідно при температурі  $70^{\circ}C$  та  $80^{\circ}C$ . (Додаток 1)

### 2.5 Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до холодного теплоносія

Швидкість холодного теплоносія (2.23):

$$W_{\epsilon} = \frac{4 \cdot 1,7632 \cdot 10^{-2}}{3,14 \left[ 0,018^2 - (0,011 + 2 \cdot 0,0015)^2 \right] 998,05} = 0,1758, \text{ м} / \text{с}.$$

Критерій Рейнольдса (2.24):

$$Re_{\epsilon} = \frac{0,1758 \cdot (0,011 + 2 \cdot 0,0015)}{1,0175 \cdot 10^{-6}} = 2418,87,$$

$$\begin{aligned} \text{де } \nu_{\epsilon} &= \nu_{\epsilon}^{10} - \frac{\nu_{\epsilon}^{10} - \nu_{\epsilon}^{20}}{20 - 10}(t_{\epsilon} - 10) = 1,31 \cdot 10^{-6} - \frac{(1,31 - 1,01) \cdot 10^{-6}}{20 - 10}(19,75 - 10) = \\ &= 1,0175 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}; \end{aligned}$$

де  $\nu_{\epsilon}^{10} = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$ ,  $\nu_{\epsilon}^{20} = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$  — коефіцієнти кінематичної в'язкості води відповідно при температурі  $10^{\circ}C$  і  $20^{\circ}C$ . (Додаток 1)

Критерій Нуссельта (2.25):

$$Nu_{\epsilon} = 0,023 \cdot 2418,87^{0,8} \cdot 7,08^{0,4} \left( \frac{0,018}{0,011 + 2 \cdot 0,0015} \right)^{0,45} = 28,691,$$

де  $Pr_{\epsilon} = Pr_{\epsilon}^{10} - \frac{Pr_{\epsilon}^{10} - Pr_{\epsilon}^{20}}{20 - 10} (t_{\epsilon} - 10) = 9,52 - \frac{9,52 - 7,02}{20 - 10} (19,75 - 10) = 7,08;$

де  $Pr_{\epsilon}^{10} = 9,52$ ,  $Pr_{\epsilon}^{20} = 7,02$  – критерій Прандтля для води відповідно при температурі  $10^{\circ}\text{C}$  та  $20^{\circ}\text{C}$ . (Додаток 1)

Коефіцієнт тепловіддачі (2.26):

$$\alpha_{\epsilon} = \frac{28,691 \cdot 0,5984}{0,011 + 2 \cdot 0,0015} = 1226,34 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

де  $\lambda_{\epsilon} = \lambda_{\epsilon}^{10} + \frac{\lambda_{\epsilon}^{20} - \lambda_{\epsilon}^{10}}{20 - 10} (t_{\epsilon} - 10) = 0,575 + \frac{0,599 - 0,575}{20 - 10} (19,75 - 10) = 0,5984 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К});$

де  $\lambda_{\epsilon}^{10} = 0,575 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $\lambda_{\epsilon}^{20} = 0,599 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$  – коефіцієнти теплопровідності води відповідно при температурі  $10^{\circ}\text{C}$  та  $20^{\circ}\text{C}$ . (Додаток 1)

### 2.6 Коефіцієнт тепловіддачі від плівки конденсату

Середня температура плівки конденсату (2.27):

$$t_{\text{кпл}} = 0,5(72,98 + 24) = 48,49^{\circ}\text{C}$$

Приведена товщина плівки конденсату (2.28):

$$\delta_{\text{пр}} = \left( \frac{0,5653^2 \cdot 10^{-6}}{988,6^2 \cdot 9,81} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,3218 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

де  $\rho_{\text{к}} = \rho_{\text{к}}^{40} - \frac{\rho_{\text{к}}^{40} - \rho_{\text{к}}^{50}}{50 - 40} (t_{\text{кпл}} - 40) = 992 - \frac{992 - 988}{50 - 40} (48,49 - 40) = 988,6 \text{ кг} / \text{м}^3;$

де  $\rho_{\text{к}}^{40} = 992 \text{ кг} / \text{м}^3$ ,  $\rho_{\text{к}}^{50} = 988 \text{ кг} / \text{м}^3$  – густина води відповідно при температурі  $40^{\circ}\text{C}$  і  $50^{\circ}\text{C}$ ;

$$\begin{aligned} \mu_{\text{к}} &= \mu_{\text{к}}^{40} - \frac{\mu_{\text{к}}^{40} - \mu_{\text{к}}^{50}}{50 - 40} (t_{\text{кпл}} - 40) = 0,657 \cdot 10^{-3} - \frac{(0,657 - 0,549) \cdot 10^{-3}}{50 - 40} \times \\ &\times (48,49 - 40) = 0,5653 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}; \end{aligned}$$

де  $\mu_{\text{к}}^{40} = 0,657 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,  $\mu_{\text{к}}^{50} = 0,549 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$  – коефіцієнти динамічної в'язкості води відповідно при температурі  $40^{\circ}\text{C}$  і  $50^{\circ}\text{C}$ . (Додаток 1)

Масова густина зрошення (2.29):

$$\Gamma = \frac{1,33 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 0,011} = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / (\text{м} \cdot \text{с})$$

Критерій Рейнольдса (2.30):

$$Re_{\kappa} = \frac{4 \times 3,85 \cdot 10^{-3}}{0,5653 \cdot 10^{-3}} = 27,242$$

Критерій Нуссельта (2.31):

$$Nu_{\kappa} = 0,67 \cdot 27,242^{0,11} \cdot 3,656^{0,33} \left( \frac{0,3218 \cdot 10^{-4}}{0,75 \cdot 0,3} \right)^{0,33} = 0,0778,$$

де  $Pr_{\kappa} = Pr_{\kappa}^{40} - \frac{Pr_{\kappa}^{40} - Pr_{\kappa}^{50}}{50 - 40} (t_{\kappa_{nl}} - 40) = 4,31 - \frac{4,31 - 3,54}{50 - 40} (48,49 - 40) = 3,656$ ;

де  $Pr_{\kappa}^{40} = 4,31$ ,  $Pr_{\kappa}^{50} = 3,54$  – критерій Прандтля для води відповідно при температурі 40<sup>0</sup>С та 50<sup>0</sup>С.

Коефіцієнт тепловіддачі (2.32):

$$\alpha_{\kappa} = \frac{0,0778 \cdot 0,643}{0,3218 \cdot 10^{-4}} = 1554,55 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

де  $\lambda_{\kappa} = \lambda_{\kappa}^{40} + \frac{\lambda_{\kappa}^{50} - \lambda_{\kappa}^{40}}{50 - 40} (t_{\kappa_{nl}} - 40) = 0,634 + \frac{0,645 - 0,634}{50 - 40} (48,49 - 40) = 0,643 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ ;

де  $\lambda_{\kappa}^{40} = 0,634 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$  – коефіцієнт теплопровідності води відповідно при температурі 40<sup>0</sup>С і 50<sup>0</sup>С.

## 2.7 Розрахунок поверхні теплопередачі

Коефіцієнти теплопередачі:

в зоні конденсації (2.33)

$$K_{\text{кон}} = \frac{1}{\frac{1}{9154} + \frac{0,0015}{0,8} + \frac{1}{1226,34}} = 357,184 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

в зоні охолодження конденсату (2.34)

$$K_{\text{ох}} = \frac{1}{\frac{1}{1554,55} + \frac{0,0015}{0,8} + \frac{1}{1226,34}} = 299,956 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Середні температурні напори:

в зоні конденсації (2.35)

$$\Delta t_{cp_k} = \frac{(100 - 21,6) - (72,98 - 18,27)}{\ln \frac{100 - 21,6}{72,98 - 18,27}} = 65,85 K;$$

в зоні охолодження конденсату (2.36)

$$\Delta t_{cp_{ox}} = \frac{(72,98 - 18,27) - (24 - 17,9)}{\ln \frac{72,98 - 18,27}{24 - 17,9}} = 22,16 K.$$

Розрахункова поверхня теплопередачі (2.37):

$$F_p = \frac{300,58}{357,184 \times 65,85} + \frac{27,23}{299,965 \times 22,16} = 0,0173 m^2.$$

Фактична поверхня теплопередачі:

$$F = 0,0306 m^2.$$

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИПАРЮВАННЯ

Мета роботи: Дослідити процес концентрування розчину на прикладі концентрування розчину солі  $Na_2SO_4$ . Встановити залежності температури кипіння від концентрації розчину та визначити температурну депресію.

#### 1 Основні теоретичні відомості

Процес випарювання відіграє велику роль у багатьох галузях промисловості. Процес випарювання у біотехнологічній та мікробіологічній промисловості застосовують для різних цілей. Проте суть його завжди лишається у видаленні з розчину нелеткої речовини леткого розчинника при температурі кипіння. Остання умова встановлює відмінність між процесами випаровування і випарювання.

Рідка фаза – чи то чистий розчинник, чи то розчин – утворює другу фазу (пару) незалежно від температури рідкої фази. Над рідкою фазою утворюється парова фаза. Процес пароутворення до настання моменту кипіння називають *випаровуванням*. Механізм процесу випаровування з точки зору молекулярно-кінетичної теорії можна уявити так. Молекули рідини на поверхні поділу двох фаз перебувають у русі, інтенсивність якого залежить від температури. Частина молекул, що має більшу швидкість, вилітає з рідини і стає вільною. Чим вища температура рідини, тим більше молекул вилітає в паровий простір. Пружність пари при цьому зростає.

Процес випаровування, таким чином, поверхневий і розвивається на межі двох фаз. Інтенсивність його залежить від умов на поверхні поділу двох фаз. Тут, якщо випаровування відбувається у відкритій посудині, відіграє роль швидкість руху повітря над поверхнею поділу фаз. По суті – це процес дифузійний. З випаровуванням ми зустрінємось далі при вивченні процесу сушіння. Якщо підводити тепло до рідкої фази, то в якийсь момент температура рідини перестане підвищуватись. На рис. 1 зображено діаграму  $q - t$ . Тут  $q$  – кількість підведеного тепла,  $t_k$  – температура кипіння рідини. Ця температура в момент, що відповідає точці  $A$ , стає (у випадку чистого розчинника) сталою, а лінія – горизонтальною.



Момент кипіння настає тоді, коли тиск насиченої пари рідини стає рівним зовнішньому тиску.

Для кожного значення тиску ця температура при кипінні чистого розчинника лишається сталою. У випадку кипіння розчину, в міру зростання його концентрації, температура кипіння підвищуватиметься (лінія  $A - D$  на рис. 3.1). Процес утворення пари під час кипіння називають **випарюванням**.

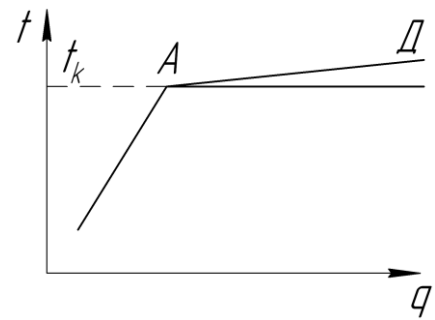


Рис. 3.1. Діаграма  $q - t$ .

Механізм процесу утворення пари в процесі кипіння, тобто випарювання, досить складний. Його можна уявити так. На відміну від випаровування, під час випарювання нова фаза виникає на поверхні нагріву. Для виникнення цієї фази треба, щоб на поверхні нагріву були центри, навколо яких утворюватимуться елементи нової фази. Цими центрами є бульбашки повітря, порошинки та ін. Загальновідомо, що без центрів кипіння в чистій дегазованій воді в посудинах з гладенькими стінками температуру кипіння при нормальному тиску можна довести до 200 °С. Бульбашка газу, яка на початку виникає на поверхні нагріву, може бути різної форми, залежно від того, змочується поверхня рідиною чи ні. Форму утворюваних бульбашок показано на рис. 3.2. Досягнувши певного розміру, бульбашка відривається від поверхні нагріву і піднімається до рідкої фази. Якщо на поверхні поділу фаз ми маємо температуру фазового перетворення, в масі рідини температура буде трошки вищою. Внаслідок цього бульбашка, що піднімається в рідині, зростатиме за рахунок випаровування на її поверхні. Експериментально встановлено, що це зростання справді спостерігається і що процес цей досить інтенсивний. Отже, процес випарювання відбувається в усьому об'ємі рідини, що істотно відрізняє його від процесу випаровування.

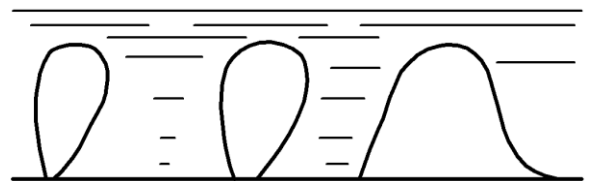


Рис. 3.2. Форми бульбашок

Описаний вище механізм утворення бульбашок називають **ядерним кипінням**. Утворення і рух бульбашок при такому кипінні створюють добрі умови для

передавання тепла від стінки до рідини. Тому коефіцієнт теплопередачі великий. В міру збільшення теплового навантаження кількість бульбашок, що виникають одночасно на поверхні нагріву, зростає. Відбувається перехід від ядерного кипіння до плівкового, коли поверхня нагріву вкривається суцільною плівкою пари. При цьому значення коефіцієнта тепловіддачі різко падає. Щоб повернутися до ядерного кипіння, треба значно знизити теплове навантаження. На підставі сказаного можна сформулювати деякі положення.

*Випарювання* – процес утворення парової фази, який відбувається в усій масі рідини і, головним чином, на межі між паровою бульбашкою і рідиною. Випарювання настає при температурі кипіння, при якій тиск насиченої пари рідини дорівнює зовнішньому тиску. Кипляча рідина завжди буде трохи перегрітою порівняно з температурою кипіння.

**Температура кипіння розчинів.** Як відомо, розчини нелетких речовин за однакового тиску киплять при температурі, вищій за температуру чистого розчинника. Для визначення температури кипіння розчину за різних тисків найнадійніший спосіб – експериментальне дослідження, в результаті якого знаходять залежність  $t = f(p, C)$ .

Різницю між температурами кипіння розчину і розчинника називають *концентраційною депресією*, або *температурною депресією*  $\Delta t_k$ . Як відомо, при одній і тій же температурі  $T$  тиск пари над чистим розчинником  $p_a$  більше, ніж тиск пари над розчином  $p_b$  (рис. 3.3), і відповідно при тому самому тиску температура кипіння розчинника нижче температури кипіння розчину. Різниця між температурами кипіння розчину і розчинника називається температурною депресією  $T_b - T_a = \Delta_D$ .

Для визначення температурної депресії неконцентрованих розчинів недисоціюючих речовин може бути використане основне рівняння ебуліоскопії:

$$\Delta_D = \frac{RT_B^2}{r} c, \quad (3.1)$$

де  $R$  – універсальна газова стала;  $T_B$  – температура кипіння розчинника (води);  $r$  – мольна теплота випаровування розчинника;  $c$  – концентрація розчиненої речовини

в розчиннику. Визначаючи депресію для дисоціюючих розчинених речовин, у праву частину рівняння (3.1) вводять співмножник  $i$ , що виражає відношення загального числа часток, що виходять у результаті дисоціації, до вихідного числа часток речовини, що розчиняється.

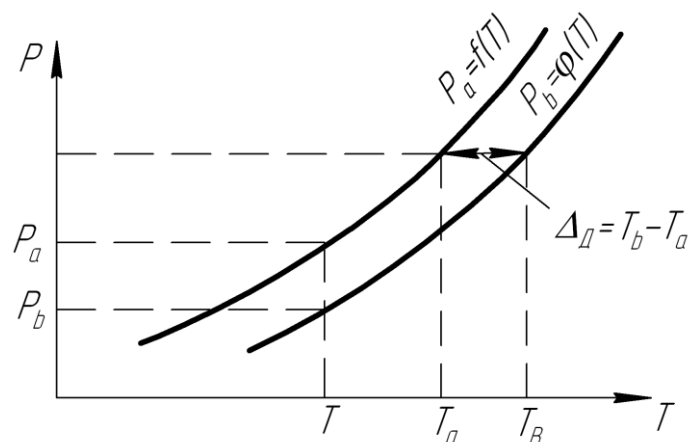


Рис. 3.3. Графічне визначення температурної депресії

Зазвичай температурну депресію не обчислюють, а знаходять по відповідним таблицях, складеним на підставі дослідних даних.

Температура кипіння розчинів, з якими мають справу в біотехнологічній промисловості, невисокі, перегрів вторинної пари незначний. Він втрачається, коли пара виходить з розчину у парові простори випарних апаратів і стає сухою насиченою. Тому в усіх розрахунках можна без помітної похибки вважати, що пара розчинів має температуру, яка відповідає температурі насиченої пари при заданому тиску.

Пара, що утвориться над киплячим розчином, називається в техніці випарювання вторинною парою. Практично в результаті взаємодії насиченої вторинної пари з брызками киплячого розчину його температура виявляється вище, ніж температура кипіння розчинника при заданому тиску. Однак при аналізі процесів випарювання допускають, що температура вторинної пари дорівнює температурі насиченої пари розчинника при заданому тиску.

У випарному апараті завжди є стовп рідини, який тисне на її нижчі шари. Тому до тиску пари над рідиною треба додати тиск цього гідростатичного стовпа рідини, за рахунок чого температура кипіння трохи підвищиться. Середній гідростатичний тиск дорівнює

$$\Delta p_z = \rho g \frac{h}{2}, \quad \text{н/м}^2,$$

де  $\rho$  – густина рідини,  $\text{кг/м}^3$ ;

$g$  – прискорення сили тяжіння,  $\text{м/с}^2$ ;

$h$  – висота стовпа рідини,  $\text{м}$ .

Підвищення температури за рахунок збільшення гідростатичного тиску називають *гідростатичною депресією* або *гідростатичним ефектом*

$$\Delta t_2 = t_{\kappa(p+\Delta p)} - t_{\kappa.p},$$

де  $t_{\kappa(p+\Delta p)}$  – температура кипіння при тиску  $(p + \Delta p)$ ;

$t_{\kappa.p}$  – температура кипіння розчину при тиску  $p$ .

Розрахунок за цією формулою дає максимум значень гідростатичного ефекту, оскільки насправді  $\rho$  змінюватиметься у бік зменшення за рахунок парових вкраплень. Вплине також і циркуляція розчину в трубах.

Теплоємність розчинів є функцією температури і концентрації розчиненої речовини. Для більшості розчинів теплоємність не має адитивних властивостей і не може бути обчислена по теплоємностям розчинених речовин і розчинників. При цьому відхилення від властивостей адитивності тим більше, чим більше концентрація розчиненої речовини.

Просте випарювання здійснюється на установках невеликої продуктивності, коли економія тепла не має великого значення. Крім того, просте випарювання на установках періодичної дії виправдовує себе у випадку випарювання розчинів, що відрізняються високою депресією.

Просте випарювання проводиться або безперервним методом, або періодичним. Проведення періодичного процесу можливо двома прийомами: з одноразовим завантаженням вихідного розчину або з порційним завантаженням.

Випарювання ведуть як під атмосферним, так і під підвищеним або пониженим тиском. У першому випадку утворену вторинну пару виводять в атмосферу. При випарюванні під пониженим тиском вакуум в апараті створюють за рахунок конденсації вторинної пари в конденсаторі. Гази, що не

конденсуються (звичайно повітря) видаляють із конденсатора вакуум-насосом, завдяки чому забезпечується підтримка вакууму в системі.

Вакуум-випарка дозволяє понизити температуру кипіння розчину, а також збільшити різницю температур між гріючим агентом і киплячим розчином, що дає можливість зменшити поверхню теплообміну.

У промисловості широко застосовують як однокорпусні, так і багатокорпусні випарні установки. Багатокорпусні випарні установки складаються з декількох (2-6) з'єднаних один з одним апаратів (корпусів). Прямоточні установки працюють під тиском, що понижується від першого корпусу до останнього. У таких установках вторинна пара, що утворюється в кожному попередньому корпусі, використовують для обігріву наступного корпусу. Свіжою парою обігрівають тільки перший корпус.

У багатокорпусних установках здійснюють багаторазове використання тієї ж самої кількості теплоти (теплоти, що віддається гріючою парою у першому корпусі), що дозволяє значно зменшити кількість споживаної свіжої пари, тобто підвищити техніко-економічні показники установки.

Для обігріву випарних апаратів найчастіше застосовують водяну пару, але можуть бути використані топкові гази та високотемпературні теплоносії (дифенильна суміш, перегріта вода, масло), а також електричний обігрів.

Матеріальний баланс простого випарювання може бути виражений двома рівняннями:

$$G_n = G_k + W \quad (3.3)$$

та

$$G_n x_n = G_k x_k, \quad (3.4)$$

де  $G_n$  – початкова кількість розчину;  $G_k$  – кількість упареного розчину;  $W$  – кількість води, що випарюється;  $x_n$  і  $x_k$  – відповідно початкова і кінцева концентрація розчину по масі, %. Зіставляючи рівності (3) і (4), знайдемо:

$$W = G_n \left(1 - \frac{x_n}{x_k}\right) \quad (3.5)$$

та

$$x_k = G_H \frac{x_H}{G_H - W} \quad (3.6)$$

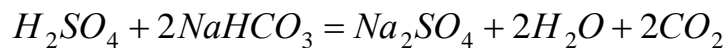
Теплоємність водяних розчинів при концентрації  $x$  нижче 20% може бути розрахована по формулі:

$$c' = \left(1 - \frac{x}{100}\right) \cdot 4,19 \cdot 10^3. \quad (3.7)$$

## 2 Методика проведення досліджень та основні виміри

### 2.1 Приготування робочого розчину

При приготуванні робочого розчину використовуємо взаємодію сірчаної кислоти з питною содою:



Для проведення реакції беремо  $V_{H_2SO_4}^{98\%} = 48 \text{ мл}$  розчину 98% -ої сірчаної

кислоти, в якому міститься:

– 100% -ої сірчаної кислоти

$$G_{H_2SO_4}^{100\%} = 0,98 \cdot V_{H_2SO_4}^{98\%} \cdot \rho_{H_2SO_4}^{98\%} = 0,98 \cdot 48 \cdot 1,837 = 86,412 \text{ г};$$

– води

$$G_{H_2O}^k = 0,02 \cdot V_{H_2SO_4}^{98\%} \cdot \rho_{H_2SO_4}^{98\%} = 0,02 \cdot 48 \cdot 1,837 = 1,764 \text{ г},$$

де  $\rho_{H_2SO_4}^{98\%} = 1,837 \text{ г / см}^3$  – густина 98% -ої  $H_2SO_4$ .

Визначимо масу питної соди, яка потрібна для проведення реакції

$$G_{NaHCO_3} = \frac{G_{H_2SO_4}^{100\%} \cdot 2 \cdot M_{NaHCO_3}}{M_{H_2SO_4}} = \frac{86,412 \cdot 2 \cdot 84,01}{98,07} = 148,047 \text{ г},$$

де  $M_{H_2SO_4} = 98,07 \text{ г / моль}$  молекулярна маса сірчаної кислоти;

$$M_{NaHCO_3} = 84,01 \text{ г / моль}$$
 молекулярна маса питної соди.

Визначимо масу сульфату натрію, який утвориться в результаті реакції:

$$G_{Na_2SO_4} = \frac{G_{H_2SO_4}^{100\%} \cdot M_{Na_2SO_4}}{M_{H_2SO_4}} = \frac{86,412 \cdot 142,04}{98,07} = 125,155 \text{ г}$$

де  $M_{Na_2SO_4} = 142,04 \text{ г / моль}$  молекулярна маса сульфату натрію.

Визначимо масу води, яка утворюється в результаті реакції:

$$G_{H_2O}^p = \frac{G_{H_2SO_4}^{100\%} \cdot 2 \cdot M_{H_2O}}{M_{H_2SO_4}} = \frac{86,412 \cdot 2 \cdot 18}{98,07} = 31,72 \text{ г},$$

де  $M_{H_2O} = 18 \text{ г} / \text{моль}$  молекулярна маса води.

Висипаємо в колбу 148,047 г питної соди та виливаємо в неї 48 мл розчину 98% -ої сірчаної кислоти і порційно доливаємо 500 мл води.

Визначимо концентрацію сульфату натрію в розчині:

$$X_{Na_2SO_4} = \frac{100 \cdot G_{Na_2SO_4}}{G_{H_2O} + G_{H_2O}^p + G_{H_2O}^k + G_{Na_2SO_4}} = \frac{100 \cdot 125,155}{500 + 31,72 + 1,764 + 125,155} = 19 \%$$

## 2.2 Проведення досліджень

Залити в термостійку колбу 450 мл розчину. Герметично закрити колбу пробкою, в якій вмонтовано термометр та трубку для відведення пари. Помістити колбу на нагрівальний пристрій та ввімкнути його (**нагрівальний пристрій вмикається лише з дозволу викладача**).

Після вмикання та прогріву пристрою для нагріву у термостійкій колбі закипає розчин. Температура кипіння розчину вимірюється за допомогою термометра. Пари розчинника з колби через трубку надходить у внутрішню трубку конденсатора, в міжтрубний простір якого поступає холодний теплоносій. Пара конденсується та стікає по внутрішній трубці конденсатора у ємність для збору конденсату.

При проведенні досліджень проводяться наступні заміри:

- початкова температура розчину  $t_n$ , °C;
- час проведення досліду  $\tau$ , с;
- температуру киплячого розчину  $t_{кин}$ , °C;
- кількість конденсату  $V_e$ , м<sup>3</sup>
- температуру конденсату  $t_{конд}$ , °C.

Результати замірів заносяться до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення, отримані при дослідженнях

№ п/п	Час дослідіду $\tau$ , с	Об'єм конденсату $V_{\text{в}}$ , $\text{м}^3 \cdot 10^6$	Температура киплячого розчину $t_{\text{кип}}$ , $^{\circ}\text{C}$	Температура конденсату $t_{\text{конд}}$ , $^{\circ}\text{C}$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Внутрішній діаметр колби  $D=0,1$  м.

### 3 Методика обробки експериментальних даних

#### 3.1 Визначення температурної депресії

Розрахунок процесу кипіння

Маса вихідного розчину:

$$G_p = V_p \cdot \rho_p, \quad (3.8)$$

де  $V_p=0,45 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  – об'єм вихідного розчину;

$\rho_p$  – густина 19%-го розчину  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  при температурі  $t_n$ ,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

Маса солі в розчині:

$$m_c = 0,19 \cdot G_p, \quad \text{кг} \quad (3.9)$$

Концентрація розчину солі в досліді:

$$x = \frac{m_c}{G_p - \sum V_{\text{в}} \rho_{\text{к}}} \cdot 100, \quad \% (\text{мас.}), \quad (3.10)$$

де  $\rho_{\text{к}}$  – густина конденсату при температурі  $t_{\text{конд}}$ ,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

Теоретична температурна депресія:

$$\Delta_{\text{Дтеор}} = \frac{RT_B^2}{r_m} x, \quad ^{\circ}\text{C} \quad (3.11)$$

де  $R$  – універсальна газова стала,  $\frac{\text{Дж}}{(\text{кмоль} \cdot \text{К})}$ ;



$T_B$  – температура кипіння води, °К;

$r_m$  – мольна теплота пароутворення води,  $\frac{Дж}{кмоль}$ .

Температурна депресія, отримана дослідним шляхом  $\Delta_{Ддосл}$  °С:

$$\Delta_{Ддосл} = t_{кип} - t_B \quad (3.12)$$

Результати розрахунку занести до таблиці 3.2:

Таблиця 3.2 – Результати виконаних розрахунків

Номер досліді	Маса конденсату, $G_k$ , кг	Концентрація розчину $x$ , %	Теоретична температурна депресія $\Delta_{Дтеор}$ , °С	Дослідна температурна депресія, $\Delta_{Ддосл}$ °С
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

### 3.2 Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі при кипінні розчину

Визначаємо геометричний розмір бульбашки,  $m$ :

$$l_* = \sqrt{\frac{\sigma'}{g(\rho' - \rho'')}} \quad (3.13)$$

де  $\sigma'$  – коефіцієнт поверхневого натягу розчину,  $\frac{Н}{м}$  (при відповідній концентрації та температурі кипіння);

$\rho'$  – густина розчину,  $\frac{кг}{м^3}$  (при відповідній концентрації та температурі кипіння).

$\rho''$  – густина водяної пари,  $\frac{кг}{м^3}$  (при температурі кипіння розчину).

Визначаємо критерій поверхневого натягу  $k_\sigma$ :

$$k_{\sigma} = \frac{r}{gl_*}, k \quad (3.14)$$

де  $r$  – питома теплота пароутворення води при температурі кипіння розчину, Дж/кг.

Визначаємо температурний критерій:

$$k_t = \frac{(rp'')^2 l_*}{T'' c_p \sigma' \rho'}, \quad (3.15)$$

де  $p''$  – тиск насиченої водяної пари при температурі кипіння розчину, Па;

$c_p$  – питома теплоємність розчину концентрацією  $x$  при температурі кипіння, Дж/(кг · К).

$$T'' = 273 + t_{\text{кип}} \text{ } ^\circ\text{K}. \quad (3.16)$$

Визначаємо критерій Пекле для процесу пароутворення:

$$Pe_* = \frac{ql_*}{r\rho''a}, \quad (3.17)$$

де  $q$  – питомий тепловий потік, Вт/м<sup>2</sup>:

$$q = \frac{Q}{F}, \quad (3.18)$$

$F = 0,0157 \text{ м}^2$  – поверхня тепловіддачі;

$Q$  – тепловий потік

$$Q = \frac{G_k r}{\tau}, \quad (3.19)$$

$a$  – коефіцієнт температуропровідності розчину, м<sup>2</sup>/с

$$a = \frac{\lambda'}{c_p \rho'} \quad (3.20)$$

$\lambda'$  – коефіцієнт теплопровідності розчину концентрацією  $x$  при температурі кипіння, Вт/(м · К).

Розраховуємо комплекс:

$$N = Pe_* k_t^{0,63} k_\sigma^{0,5}. \quad (3.21)$$

Розраховуємо критерій Нуссельта:

$$Nu = cN^n \quad (3.22)$$

при  $N \geq 10^7$   $c = 3,2 \cdot 10^{-9}; \quad n = 0,75.$

при  $10^5 \leq N \leq 10^7$   $c = 0,1; \quad n = 0,25.$

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі при кипінні розчині,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ :

$$\alpha = \frac{Nu\lambda'}{l_*}. \quad (3.23)$$

Графічно побудувати залежності:  $t_{кин} = f(x)$ ,

Графічно побудувати та порівняти залежності  $\Delta_{Дтеор} = f(x)$  та  $\Delta_{Ддосл} = f(x)$ .

Написати висновки по отриманим результатам.

### Контрольні питання.

1. При якій умові розчин починає кипіти?
2. Що таке температурна депресія?
3. Види температурних депресій
4. Вторинна пара це ...
5. Як визначити гідростатичну депресію?
6. Скласти рівняння матеріального балансу процесу випарювання.
7. Корисна різниці температур. Записати формули для їх визначення..

## ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ № 3

### Вихідні дані:

Початкова температура розчину  $t_n=25\text{ }^\circ\text{C}$ ;

Об'єм вихідного розчину  $V=450\cdot 10^{-6}\text{ м}^3$ ;

Концентрація вихідного розчину  $X_{Na_2SO_4}=19,\%$ ;

Час проведення досліду  $\tau=300\text{ с}$ ;

Температура киплячого розчину  $t_{\text{кип}}=102,4\text{ }^\circ\text{C}$ ;

Об'єм конденсату  $V_{\text{в}}=30\cdot 10^{-6}\text{ м}^3$ ;

Температура конденсату  $t_{\text{конд}}=24,6\text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3.1 Визначення температурної депресії

Маса вихідного розчину (3.8):

$$G_p = 450 \cdot 10^{-6} \cdot 1178 = 0,5301\text{ кг},$$

де  $\rho_p = 1168 + \frac{1168 - 1148}{18 - 16} = 1178\text{ кг} / \text{м}^3$ ;

де  $\rho_{25^\circ\text{C}}^{16\%} = 1148\text{ кг} / \text{м}^3$ ,  $\rho_{25^\circ\text{C}}^{18\%} = 1168\text{ кг} / \text{м}^3$  – густина 16%-го і 18%-го розчину солі при температурі  $25^\circ\text{C}$ . (Додаток 3)

Маса солі в розчині (3.9):

$$m_c = 0,19 \cdot 0,5301 = 0,1\text{ кг}$$

Концентрація розчину в досліді (3.10):

$$X = \frac{0,1}{0,5301 - 30 \cdot 10^{-6} \cdot 997,08} \cdot 100 = 20\%,$$

де  $\rho_k = \rho_{\text{в}}^{20} - \frac{\rho_{\text{в}}^{20} - \rho_{\text{в}}^{30}}{30 - 20} (t_{\text{конд}} - 20) = 998 - \frac{998 - 996}{30 - 20} (24,6 - 20) = 997,08\text{ кг} / \text{м}^3$ ;

де  $\rho_{\text{в}}^{20} = 998\text{ кг} / \text{м}^3$ ,  $\rho_{\text{в}}^{30} = 996\text{ кг} / \text{м}^3$  – густина води відповідно при температурі  $20^\circ\text{C}$  і  $30^\circ\text{C}$ . (Додаток 1)

Теоретична температурна депресія (3.11):

$$\Delta_{\text{теор}} = \frac{8314 \cdot 373^2}{40680 \cdot 10^3} \cdot 0,2 = 5,69,$$

де  $r_m = 2260 \cdot 18 = 40680 \cdot 10^3\text{ Дж} / \text{кмоль}$ .

Дослідна температурна депресія (3.12):

$$\Delta_{\text{досл}} = 102,4 - 100 = 2,4^{\circ}\text{C}$$

### 3.2 Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі

Геометричний розмір бульбашки (3.13):

$$l_* = \sqrt{\frac{61,86 \cdot 10^{-3}}{9,81(1143,6 - 0,6482)}} = 2,349 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\begin{aligned} \text{де } \rho' &= \rho'_{100} - \frac{\rho'_{100} - \rho'_{105}}{105 - 100} (t_{\text{кин}} - 100) = 1146 - \frac{1146 - 1141}{105 - 100} (102,4 - 100) = \\ &= 1143,6 \text{ кг} / \text{м}^3; \end{aligned}$$

де  $\rho'_{100} = 1146 \text{ кг} / \text{м}^3$ ,  $\rho'_{105} = 1141 \text{ кг} / \text{м}^3$  – густина 20%-го розчину солі відповідно при температурі  $100^{\circ}\text{C}$  і  $105^{\circ}\text{C}$ . (Додаток 3)

$$\begin{aligned} \rho'' &= \rho''_{100} + \frac{\rho''_{105} - \rho''_{100}}{105 - 100} (t_{\text{кин}} - 100) = 0,5970 + \frac{0,7036 - 0,5970}{105 - 100} (102,4 - 100) = \\ &= 0,6482 \text{ кг} / \text{м}^3; \end{aligned}$$

де  $\rho''_{100} = 0,5970 \text{ кг} / \text{м}^3$ ,  $\rho''_{105} = 0,7036 \text{ кг} / \text{м}^3$  густина водяної пари відповідно при температурі  $100^{\circ}\text{C}$  і  $105^{\circ}\text{C}$ . (Додаток 5)

$$\sigma' = \sigma'_{18} \frac{\sigma_{\epsilon}^{102,4}}{\sigma_{\epsilon}^{18}} = 77,72 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{58,42 \cdot 10^{-3}}{73,4 \cdot 10^{-3}} = 61,86 \cdot 10^{-3} \text{ Н} / \text{м};$$

де  $\sigma_{\epsilon}^{18}$  – коефіцієнт поверхневого натягу води при температурі  $18^{\circ}\text{C}$ .

$$\begin{aligned} \sigma_{\epsilon}^{18} &= \sigma_{\epsilon}^6 + \frac{\sigma_{\epsilon}^{10} - \sigma_{\epsilon}^6}{20 - 10} (20 - 18) = 72,7 \cdot 10^{-3} + \frac{(76,2 - 72,7) \cdot 10^{-3}}{20 - 10} \times \\ &\times (20 - 18) = 73,4 \cdot 10^{-3} \text{ Н} / \text{м}; \end{aligned}$$

де  $\sigma_{\epsilon}^{10} = 76,2 \cdot 10^{-3} \text{ Н} / \text{м}$ ,  $\sigma_{\epsilon}^6 = 72,7 \cdot 10^{-3} \text{ Н} / \text{м}$  – коефіцієнт поверхневого натягу води при температурі  $10^{\circ}\text{C}$  і  $20^{\circ}\text{C}$ ; (Додаток 1)

де  $\sigma_{\epsilon}^{102,4}$  – коефіцієнт поверхневого натягу води при температурі  $102,4^{\circ}\text{C}$

$$\sigma_{\sigma}^{102,4} = \sigma_{\sigma}^{100} - \frac{\sigma_{\sigma}^{100} - \sigma_{\sigma}^{110}}{110 - 100} (102,4 - 100) = 58,910^{-3} - \frac{(58,9 - 56,9) \cdot 10^{-3}}{110 - 100} (102,4 - 100) = 58,42 \cdot 10^{-3} \text{ Н / м};$$

де  $\sigma_{\sigma}^{100} = 58,9 \cdot 10^{-3} \text{ Н / м}$ ,  $\sigma_{\sigma}^{110} = 56,9 \cdot 10^{-3} \text{ Н / м}$  – коефіцієнт поверхневого натягу води при температурі  $100^{\circ}\text{C}$  і  $110^{\circ}\text{C}$ ; (Додаток 1)

де  $\sigma'_{18}$  – коефіцієнт поверхневого натягу 19%-го розчину при температурі  $18^{\circ}\text{C}$

$$\sigma'_{18} = \sigma_{18}^{10\%} + \frac{\sigma_{18}^{10\%} - \sigma_{18}^{5\%}}{10 - 5} (19 - 10) = 75,2 \cdot 10^{-3} + \frac{(75,2 - 73,8) \cdot 10^{-3}}{10 - 5} (19 - 10) = 77,72 \cdot 10^{-3} \text{ Н / м};$$

де  $\sigma_{18}^{10\%} = 75,2 \cdot 10^{-3} \text{ Н / м}$ ,  $\sigma_{18}^{5\%} = 73,8 \cdot 10^{-3} \text{ Н / м}$  – коефіцієнти поверхневого натягу розчину солі концентрацією 10% і 5% при температурі  $18^{\circ}\text{C}$ ; (Додаток 4)

де  $\rho''_{100} = 0,5970 \text{ кг / м}^3$ ,  $\rho''_{105} = 0,7036 \text{ кг / м}^3$  – густина насиченої водяної пари відповідно при температурі  $100^{\circ}\text{C}$  і  $105^{\circ}\text{C}$ . (Додаток 5)

Критерій поверхневого натягу (3.14):

$$k_{\sigma} = \frac{2254,24 \cdot 10^3}{9,81 \cdot 2,349 \cdot 10^{-3}} = 97,8246 \cdot 10^6,$$

$$\text{де } r = r_{100} - \frac{r_{100} - r_{105}}{105 - 100} (t_{\text{кин}} - 100) = 2260 \cdot 10^3 - \frac{(2260 - 2248) \cdot 10^3}{105 - 100} \times (102,4 - 100) = 2254,24 \cdot 10^3 \text{ Дж / кг}.$$

де  $r_{100} = 2260 \cdot 10^3 \text{ Дж / кг}$ ,  $r_{105} = 2248 \cdot 10^3 \text{ Дж / кг}$  – питома теплота пароутворення води при температурі  $100^{\circ}\text{C}$  і  $105^{\circ}\text{C}$ . (Додаток 5)

Температурний критерій (3.15):

$$k_t = \frac{\left(2254,24 \cdot 10^3 \cdot 1,107 \cdot 10^5\right)^2 \cdot 2,349 \cdot 10^{-3}}{375,4 \cdot 3604,26 \cdot 61,86 \cdot 10^{-3} \cdot 1143,6} = 1,52821 \cdot 10^{12},$$

де  $T'' = 273 + t_{\text{кин}} = 273 + 102,4 = 375,4 \text{ K}$ ;

$$p'' = p''_{100} + \frac{p''_{105} - p''_{100}}{105 - 100} (t_{\text{кин}} - 100) = 1,01337 \cdot 10^5 + \frac{(1,20859 - 1,01337) \cdot 10^5}{105 - 100} \times \\ \times (102,4 - 100) = 1,107 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

де  $p''_{100} = 1,01337 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $p''_{105} = 1,20859 \cdot 10^5 \text{ Па}$  – тиск насиченої водяної пари при температурі  $100^\circ\text{C}$  і  $105^\circ\text{C}$ ; (Додаток 5)

$$c_p = c_{110}^{19\%} - \frac{c_{110}^{19\%} - c_{90}^{19\%}}{110 - 90} (110 - t_{\text{кин}}) = 3613 - \frac{3613 - 3590}{110 - 90} (110 - 102,4) = \\ = 3604,26 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K});$$

$$\text{де } c_{110}^{19\%} = c_{110}^{18\%} - \frac{c_{110}^{18\%} - c_{110}^{20\%}}{20 - 18} (19 - 18) = 3644 - \frac{3644 - 3582}{20 - 18} (19 - 18) = \\ = 3613 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K});$$

$$c_{90}^{19\%} = c_{90}^{18\%} - \frac{c_{90}^{18\%} - c_{90}^{20\%}}{20 - 18} (19 - 18) = 3634 - \frac{3634 - 3546}{20 - 18} (19 - 18) = \\ = 3590 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K});$$

де  $c_{90}^{18\%} = 3634 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$ ,  $c_{110}^{18\%} = 3644 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$  – питома теплоємність 18%-го розчину солі відповідно при температурі  $90^\circ\text{C}$  і  $110^\circ\text{C}$ ; (Додаток 6)

де  $c_{90}^{20\%} = 3546 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$ ,  $c_{110}^{20\%} = 3582 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$  – питома теплоємність 20%-го розчину солі при температурі  $90^\circ\text{C}$  і  $110^\circ\text{C}$ .

Тепловий потік (3.19):

$$Q = \frac{30 \cdot 10^{-6} \cdot 997,08 \cdot 2254,24 \cdot 10^3}{300} = 224,766 \text{ Вт}.$$

Питомий тепловий потік (3.18):

$$q = \frac{224,766}{0,0157} = 14316,3 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

Коефіцієнт температуропровідності розчину (3.20):

$$a = \frac{\lambda'}{c_p \rho'} = \frac{0,633}{3604,26 \cdot 1143,6} = 0,1536 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с},$$

$$\text{де } \lambda' = \lambda_{95}^{19\%} + \frac{\lambda_{95}^{19\%} - \lambda_{90}^{19\%}}{95 - 90} (t_{\text{кит}} - 95) = 0,63 + \frac{0,63 - 0,628}{95 - 90} (102,4 - 95) = \\ = 0,633 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К});$$

$$\text{де } \lambda_{90}^{19\%} = \lambda_{90}^{15\%} - \frac{\lambda_{90}^{15\%} - \lambda_{90}^{20\%}}{20 - 15} (19 - 15) = 0,64 - \frac{0,64 - 0,625}{5} \cdot 4 = \\ = 0,628 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К});$$

$$\lambda_{95}^{19\%} = \lambda_{95}^{15\%} - \frac{\lambda_{95}^{15\%} - \lambda_{95}^{20\%}}{20 - 15} (19 - 15) = 0,642 - \frac{0,642 - 0,627}{5} \cdot 4 = \\ = 0,630 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К});$$

де  $\lambda_{90}^{15\%} = 0,64 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $\lambda_{95}^{15\%} = 0,642 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$  – коефіцієнт теплопровідності 15%-го розчину солі відповідно при температурі  $90^{\circ}\text{C}$  і  $95^{\circ}\text{C}$ ; (Додаток 7)

$\lambda_{90}^{20\%} = 0,625 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $\lambda_{95}^{20\%} = 0,627 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$  – коефіцієнт теплопровідності 20%-го розчину солі відповідно при температурі  $90^{\circ}\text{C}$  і  $95^{\circ}\text{C}$ . (Додаток 7)

Критерій Пекле (3.17):

$$Pe_* = \frac{14316,3 \cdot 2,349 \cdot 10^{-3}}{2254,24 \cdot 10^3 \cdot 0,6482 \cdot 0,1536 \cdot 10^{-6}} = 149,835$$

Комплекс (3.21):

$$N = 149,835 \left(1,52821 \cdot 10^{12}\right)^{0,63} \left(97,8246 \cdot 10^6\right)^{0,5} = 70,28661 \times 10^{12}$$

Критерій Нуссельта (3.22):

$$Nu = 3,2 \cdot 10^{-9} \cdot \left(70,28661 \cdot 10^{12}\right)^{0,75} = 77,6791$$

Коефіцієнт тепловіддачі (3.23):

$$\alpha = \frac{77,6791 \cdot 0,633}{2,349 \cdot 10^{-3}} = 20932,7 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$



## Список літератури

### Основна

1. Проектирование процессов и аппаратов пищевых производств. Под ред. В. Н. Стабникова. Киев, «Вища школа». 1982. – 356с.
2. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов. Л.: Химия, 1976. – 552с.
3. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. – 750с.
4. Машины и аппараты химической промышленности / Под ред. И.И. Чернобыльского. – М. – К.: Машгиз, 1962. – 521 с.
5. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 1. – М.: Химия. 1995. – 400 с. ISBN 5–7245–1006–5.
6. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст]: Пособие по проектированию/ под ред. Ю.И. Дытнерского. – М.: Химия, 1982. – 772 с.
7. Сидоров Ю.І. Процеси і апарати мікробіологічної промисловості. Технічні розрахунки. Приклади і задачі. Основи проектування виробництв [Текст]. Ч.І. Ферментація: Навч. посібник / Ю.І.Сидоров, Р.Й. Влязло, В.П. Новиков. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 240 с.
8. Сидоров Ю.І. Процеси і апарати мікробіологічної промисловості. Технічні розрахунки. Приклади і задачі. Основи проектування виробництв[Текст] / Ч.ІІ. Оброблення культуральних рідин: Навч. Посібник / Ю.І. Сидоров, Р.Й. Влязло, В.П. Новиков – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 296 с.
9. Сидоров Ю.І. Процеси і апарати мікробіологічної промисловості. Технічні розрахунки. Приклади і задачі. Основи проектування виробництв[Текст] / Ч.ІІІ. Основи проектування мікробіологічних виробництв Навч. посібник / Ю.І. Сидоров, Р.Й. Влязло, В.П. Новиков. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 252 с.

## Додаткова

1. Федосеев К.Г. Процессы и аппараты биотехнологии в химико-фармацевтической промышленности[Текст]/ К.Г. Федосеев. – М.: Медицина, 1969. – 199 с.
2. Калунянц К.А. Оборудование микробиологических производств[Текст]/ К.А. Калунянц, Л.И. Голгер, В.Е. Балашов. – М.: Агропромиздат, 1987. – 398 с.
3. Иоффе И.Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии[Текст]/ И.Л. Иоффе.- Л.: Химия, 1991. - 352 с.
4. Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности [Текст] / А.С. Гинзбург. – М.: Агропромиздат, 1985. – 336 с.
5. Соколов В.И. Центрифугирование [Текст]/В.И. Соколов- М.: Химия, 1976. - 408 с.
6. Васильцов Э.А. Аппараты для перемешивания жидких сред [Текст]/ Э.А.Васильцов, В. Г. Ушаков. –Л.: Машиностроение, 1979. – 277 с.
7. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками [Текст]: пер. с польск./Ф. Стренг.– Л.: Химия, 1975. –384с.
8. Брагинский Л.Н. Перемешивание жидких сред: Физические основы и инженерные методы расчета[Текст]/Л.Н. Брагинский, В.И. Бегачев, В.М. Барабаш. –Л.: Химия, 1984. –336с.
9. Гельперин Н.И. Основы техники псевдооживления[Текст]/ Н.И. Гельперин, В.Г. Апштейн, В.П. Кваша. –М.: Химия, 1977. – 664с.

## ДОДАТКИ

## Додаток 1

### Фізичні властивості води (на лінії насичення)

t, °C	$p \cdot 10^{-5}$ , Па	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	h, кДж/кг	$C_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4$ , К <sup>-1</sup>	$\sigma \cdot 10^4$ , Н/м	Pr
0	1	1000	0	4,23	55,1	13,1	1790	1,79	-0,63	756	13,7
10	1	1000	41,9	4,19	57,5	13,7	1310	1,31	+0,7	762	9,52
20	1	998	83,8	4,19	59,9	14,3	1000	1,01	1,82	727	7,02
30	1	996	126	4,18	61,8	14,9	804	0,81	3,21	712	5,42
40	1	992	168	4,18	63,4	15,3	657	0,66	3,87	697	4,31
50	1	988	210	4,18	64,8	15,7	549	0,556	4,49	677	3,54
60	1	983	251	4,18	65,9	16,1	470	0,478	5,11	662	2,93
70	1	978	293	4,19	68,8	16,3	406	0,415	5,70	643	2,55
80	1	972	335	4,19	67,5	16,6	355	0,365	6,32	626	2,21
90	1	965	377	4,19	68,0	16,8	315	0,326	6,95	607	1,95
100	1,03	958	419	4,23	68,3	16,9	282	0,295	7,5	589	1,75
110	1,46	951	461	4,23	68,5	16,9	255	0,268	8,0	569	1,53
120	2,02	943	503	4,23	68,6	17,2	231	0,244	8,6	548	1,43
130	2,75	935	545	4,27	68,6	17,2	212	0,226	9,2	529	1,32
140	3,68	926	587	4,27	68,5	17,2	196	0,212	9,7	507	1,23
150	4,85	917	629	4,32	68,4	17,2	185	0,202	10,3	487	1,17
160	6,30	907	671	4,36	68,3	17,2	174	0,191	10,8	466	1,10
170	8,08	897	713	4,40	67,9	17,2	163	0,181	11,5	444	1,05
180	10,23	887	765	4,44	67,5	17,2	153	0,173	12,2	424	1,01

В СІ: 1кгс/см<sup>3</sup>=9,81·10<sup>4</sup> Па

## Додаток 2

Теплофізичні властивості  $c = 1,43$  % розчину соляної кислоти

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$C_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{с)}$	$\mu \cdot 10^3, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, \text{К}^{-1}$
10	1005,3	0,5693	4141,5	1,347	1,339	0,800
20	1003,3	0,5831	4141,8	1,033	1,035	2,080
30	1001,3	0,5928	4132,7	0,827	0,836	3,669
35	999,3	0,5964	4132,9	0,757	0,761	4,046
40	997,3	0,6000	4133,1	0,687	0,686	4,423
50	993,3	0,6054	4133,4	0,576	0,579	5,132

Теплофізичні властивості  $c = 2,02$  % розчину соляної кислоти

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$C_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{с)}$	$\mu \cdot 10^3, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, \text{К}^{-1}$
10	1007,5	0,5669	4121,5	1,363	1,351	0,841
20	1005,5	0,5766	4121,9	1,046	1,046	2,188
30	1003,5	0,5824	4113,1	0,849	0,848	3,858
35	1001,5	0,5841	4113,4	0,775	0,773	4,255
40	999,5	0,5859	4113,7	0,700	0,698	4,652
50	995,5	0,5878	4114,1	0,587	0,589	5,397

Теплофізичні властивості  $c = 3,14$  % розчину соляної кислоти

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$C_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{с)}$	$\mu \cdot 10^3, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, \text{К}^{-1}$
10	1011,6	0,5624	4083,6	1,392	1,374	0,920
20	1009,6	0,5641	4084,2	1,072	1,066	2,391
30	1007,6	0,5127	4076,1	0,875	0,866	4,218
35	1005,6	0,5610	4076,5	0,799	0,793	4,652
40	1003,6	0,5593	4077,0	0,724	0,718	5,085
50	999,6	0,5544	4077,6	0,609	0,608	5,900

Теплофізичні властивості  $c = 4,19\%$  розчину соляної кислоти

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$C_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{с)}$	$\mu\cdot 10^3, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu\cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta\cdot 10^4, \text{К}^{-1}$
10	1015,5	0,5582	4049,0	1,419	1,395	0,993
20	1013,5	0,5525	4048,8	1,096	1,085	2,582
30	1011,5	0,5443	4041,3	0,898	0,888	4,555
35	1009,5	0,5393	4041,9	0,822	0,813	5,023
40	1007,5	0,5343	4042,5	0,746	0,738	5,491
50	1003,5	0,5231	4043,4	0,629	0,625	6,371

Додаток 3

Густина розчинів Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, кг/м<sup>3</sup>

с, %	Температура, °С												
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	1020	1019	1018	1017	1016	1015	1013	1012	1009	1008	1005	1003	1000
4	1038	1037	1036	1035	1034	1032	1031	1029	1027	1026	1023	1021	1018
6	—	1058	1056	1054	1053	1051	1049	1047	1045	1043	1041	1038	1036
8	—	—	1075	1072	1072	1070	1068	1066	1064	1062	1059	1057	1054
10	—	—	—	1092	1091	1089	1087	1085	1082	1080	1078	1075	1072
12	—	—	—	—	1111	1108	1106	1104	1101	1099	1097	1095	1092
14	—	—	—	—	1131	1128	1125	1122	1120	1118	1116	1113	1110
16	—	—	—	—	—	1148	1145	1143	1141	1139	1136	1133	1130
18	—	—	—	—	—	1168	1166	1163	1161	1158	1156	1153	1150
20	—	—	—	—	—	—	1186	1183	1181	1178	1176	1174	1171
22	—	—	—	—	—	—	—	1207	1204	1202	1200	1197	1191
24	—	—	—	—	—	—	—	1229	1226	1223	1220	1218	1212
26	—	—	—	—	—	—	—	—	1251	1245	1237	1240	1237
28	—	—	—	—	—	—	—	—	1270	1267	1264	1261	1258
30	—	—	—	—	—	—	—	—	1292	1289	1287	1284	1281

с, %	Температура °С												
	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125
2	998	994	992	989	985	982	979	975	971	967	963	959	955
4	1016	1012	1010	1006	1003	999	996	995	989	985	981	977	973
6	1034	1030	1027	1024	1021	1017	1014	1011	1006	1002	998	993	989
8	1052	1048	1046	1042	1040	1035	1033	1029	1025	1021	1017	1013	1008
10	1070	1066	1064	1060	1057	1054	1049	1047	1041	1037	1033	1028	1024
12	1091	1086	1084	1079	1076	1073	1070	1066	1062	1058	1054	1050	1045
14	1108	1104	1102	1098	1094	1091	1086	1082	1078	1073	1069	1064	1059
16	1130	1127	1124	1121	1117	1114	1109	1105	1101	1097	1093	1088	1083
18	1150	1147	1144	1140	1137	1133	1129	1125	1121	1117	1112	1108	1103
20	1171	1168	1165	1161	1157	1153	1150	1146	1141	1137	1132	1128	1123
22	1192	1189	1186	1182	1178	1174	1170	1166	1162	1157	1153	1148	1143
24	1214	1210	1207	1203	1199	1195	1191	1187	1183	1178	1174	1169	1164
26	1235	1232	1229	1225	1221	1217	1213	1209	1204	1200	1195	1190	1185
28	1258	1254	1251	1247	1243	1239	1235	1230	1226	1221	1217	1212	1207
30	1280	1276	1273	1269	1265	1261	1257	1253	1248	1243	1239	1234	1228

%	Температура, °C												
	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190
2	951	946	942	937	932	928	922	917	911	905	897	888	877
4	968	964	959	955	950	945	940	934	928	922	914	905	893
6	985	980	975	971	966	960	955	950	943	937	929	919	907
8	1004	999	995	990	985	980	974	969	963	956	948	938	926
10	1019	1014	1009	1004	999	994	988	982	976	969	961	951	939
12	1041	1036	1031	1026	1021	1016	1010	1004	998	991	983	973	960
14	1055	1050	1044	1039	1034	1028	1022	1016	1010	1002	994	983	971
16	1079	1074	1069	1064	1058	1053	1047	1041	1035	1027	1019	1009	996
18	1098	1093	1088	1083	1078	1072	1066	1060	1054	1046	1037	1027	1014
20	1118	1113	1108	1103	1097	1092	1086	1079	1073	1065	1056	1046	1032
22	1138	1133	1128	1123	1117	1111	1105	1099	1092	1085	1076	1065	1051
24	1159	1154	1148	1143	1137	1132	1126	1119	1112	1104	1095	1084	1071
26	1180	1175	1169	1164	1158	1152	1146	1140	1132	1125	1115	1104	1090
28	1201	1196	1191	1185	1179	1173	1167	1160	1153	1145	1136	1124	1110
30	1223	1218	1212	1206	1201	1194	1188	1181	1174	1166	1156	1145	1130



#### Додаток 4

Поверхневий натяг, концентрація водних розчинів, киплячих під атмосферним тиском, властивості насиченої водяної пари в залежності від температури

Розчинена речовина	Температура, °С	Значення $\sigma \cdot 10^{-3}$ Н/м, при різних концентраціях (в %)			
		5	10	20	50
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	18	73,8	75,2	-	-
NaNO <sub>3</sub>	30	72,1	72,8	74,4	79,8
KCl	18	73,6	74,8	77,3	-
KNO <sub>3</sub>	18	73,0	73,6	75,0	-
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10	75,8	77,0	79,2	106,4
NH <sub>4</sub> OH	18	66,5	63,5	59,3	-
NH <sub>4</sub> Cl	18	73,3	74,5	-	-
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	100	59,2	60,1	61,6	67,5
MgCl <sub>2</sub>	18	73,8	-	-	-

Додаток 5

Властивості насиченої водяної пари в залежності від температури

Температура, °С	Тиск (абсолютний), кгс/см <sup>2</sup>	Питомий обсяг, м <sup>3</sup> /кг	Щільність, кг/м <sup>3</sup>	Питома ентальпія рідини $i'$ , кДж/кг	Питома ентальпія пара $i''$ , кДж/кг	Питома теплота пароутворення $r$ , кДж/кг
0	0,0062	206,5	0,00484	0	2493,1	2493,1
5	0,0089	147,1	0,00680	20,95	2502,7	2481,7
10	0,0125	106,4	0,00940	41,90	2512,3	2470,4
15	0,0174	77,9	0,01283	62,85	2522,4	2459,5
20	0,0238	7,8	0,01729	83,80	2532,0	2448,2
25	0,0323	43,40	0,02304	104,75	2541,7	2436,9
30	0,0433	32,93	0,03036	125,70	2551,3	2425,6
35	0,0573	25,25	0,03960	146,65	2561,0	2414,3
40	0,0752	19,55	0,05114	167,60	2570,6	2403,0
45	0,0977	15,28	0,06543	188,55	2579,8	2391,3
50	0,1258	12,054	0,0830	209,50	2589,5	2380,0
55	0,1605	9,589	0,1043	230,45	2598,7	2368,2
60	0,2031	7,687	0,1301	251,40	2608,3	2356,9
65	0,2550	6,209	0,1611	272,35	2617,5	2345,2
70	0,3177	5,052	0,1979	293,30	2626,3	2333,0
75	0,3930	4,139	0,2416	314,30	2636	2321
80	0,483	3,414	0,2929	335,2	2644	2310
85	0,590	2,832	0,3531	356,2	2653	2297
90	0,715	2,365	0,4229	377,1	2662	2285
95	0,862	1,985	0,5039	398,1	2671	2273
100	1,033	1,675	0,5970	419,0	2679	2260
105	1,232	1,421	0,7036	440,4	2687	2248
110	1,461	1,212	0,8254	461,3	2696	2234
115	1,724	1,038	0,9635	482,7	2704	2221
120	2,025	0,893	1,1199	504,1	2711	2207
125	2,367	0,7715	1,296	525,4	2718	2194

В СІ: 1кгс/см<sup>3</sup>=9,81·10<sup>4</sup> Па

Додаток 6

Питома теплоємність  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , Дж/(кг·К)

с, %	Температура, °С								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
2	4052	4069	4082	4090	4098	4098	4107	4111	4115
4	3960	3981	3998	4006	4015	4019	4027	4036	4040
6	3877	3897	3914	3923	3935	3944	3952	3960	3964
8	3805	3822	3839	3851	3860	3872	3881	3889	3893
10	3738	3755	3768	3780	3789	3801	3810	3818	3822
12	3860	3701	3713	3722	3730	3738	3747	3751	3755
14	3621	3642	3655	3663	3671	3680	3688	3692	3696
16	3571	3592	3609	3613	3621	3630	3634	3638	3642
18	3521	3542	3554	3563	3571	3579	3583	3588	3634
20	3479	3500	3508	3516	3525	3533	3537	3542	3546
с, %	110	120	130	140	150	160	170	180	190
2	4153	4171	4194	4218	4248	4279	4316	4352	4400
4	4081	4100	4126	4151	4183	4215	4253	4291	4341
6	4008	4029	4055	4081	4114	4147	4186	4226	4276
8	3937	3958	3984	4011	4044	4077	4116	4155	4204
10	3864	3885	3910	3936	3968	4000	4038	4076	4125
12	3794	3813	3837	3861	3891	3921	3957	3993	4039
14	3736	3754	3778	3801	3831	3861	3896	3932	3977
16	3680	3697	3720	3742	3771	3800	3834	3868	3912
18	3644	3663	3687	3712	3742	3773	3809	3845	3891
20	3582	3599	3621	3643	3670	3698	3731	3765	3808

## Додаток 7

Теплопровідність розчинів  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , Вт/(м·К)

с, %	Температура, °С									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
5	0,541	0,553	0,564	0,575	0,586	0,595	0,603	0,612	0,619	0,627
10	0,528	0,539	0,551	0,561	0,571	0,580	0,589	0,598	0,607	0,614
15	0,520	0,531	0,542	0,553	0,562	0,571	0,580	0,588	0,596	0,603
20	0,510	0,521	0,532	0,542	0,548	0,561	0,569	0,576	0,583	0,590
25	0,500	0,511	0,521	0,531	0,536	0,547	0,559	0,564	0,573	0,577
с, %	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
5	0,635	0,640	0,646	0,651	0,655	0,659	0,622	0,665	0,667	0,669
10	0,622	0,627	0,635	0,638	0,643	0,646	0,649	0,652	0,654	0,656
15	0,610	0,615	0,621	0,625	0,629	0,633	0,636	0,638	0,640	0,642
20	0,597	0,602	0,608	0,612	0,616	0,619	0,622	0,624	0,625	0,627
25	0,585	0,589	0,595	0,598	0,602	0,605	0,608	0,610	0,610	0,613