

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"



**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
**до проведення НДРС**

**ПО КУРСУ "ОБЛАДНАННЯ БІОХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ "**

Тема: Плівкові процеси. Дослідження роботи роторно-плівкового апарата  
для студентів спеціальності 7.090220 – "Обладнання хімічних виробництв і  
підприємств будівельних матеріалів",  
спеціалізація: комп'ютерне проектування обладнання біохімічних  
виробництв

КИЇВ – 2008

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до проведення НДРС

ПО КУРСУ "ОБЛАДНАННЯ БІОХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ "

Тема: Плівкові процеси. Дослідження роботи роторно-плівкового апарата

для студентів спеціальності 7.090220 – "Обладнання хімічних виробництв  
і підприємств будівельних матеріалів",  
спеціалізація: комп'ютерне проектування обладнання біохімічних  
виробництв

КИЇВ – 2008

УДК 66.023

Методичні вказівки до проведення НДРС по курсу "Обладнання біохімічних виробництв". Тема: Плівкові процеси. Дослідження роботи роторно-плівкового апарата: для студентів спеціальності 7.090220 – "Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів", спеціалізація: комп'ютерне проектування обладнання біохімічних виробництв / Укл. В.Л.Ракицький. – К.: НТУУ "КПІ", 2008. – 19 с.

Відповідальний

редактор

Я.М.Корнієнко, д-р техн. наук, професор НТУУ "КПІ"

Рецензенти:

О.Г.Зубрій, канд. техн. наук, доц. кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв НТУУ "КПІ"

І.В.Коваленко, канд. техн. наук, доц. кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування НТУУ "КПІ"

Затверджено на засіданні кафедри

машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

протокол № 4 від 15 жовтня 2008 р.

© В.Л.Ракицький, 2008

## 1. ВСТУП ТА ОСНОВНІ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Нині визначають два типи плівкової тепло- і масообмінної апаратури: 1) плівкові апарати, у яких стікання плівки рідини та її взаємодія з паром або газом відбувається без якогось зовнішнього механічного впливу; 2) роторно-плівкові (відцентрові) апарати.

Перемішування стікаючої рідинної плівки суттєво інтенсифікує процес теплообміну між плівкою та стінкою апарата, а також масообміну між рідиною та газом (паром), що досягається в роторних плівкових апаратах.

Плівкові апарати застосовуються при вакуумній ректифікації для відгонки з рідини легколетючих компонентів, концентрування термолабільних та кристалізуючих розчинників, а також для проведення хімічних перетворень у системах газ – рідина. Вони відзначаються низьким опором по паровій (газовій) фазі, відсутністю гідростатичної депресії, високим значенням коефіцієнтів теплообміну.

Конструкції роторно-плівкових апаратів, область їх використання, методики розрахунку докладно наведені в літературі [1 – 12] та ін.

Одним з недоліків роторних випарників є зниження щільності зрошення робочої поверхні по мірі стікання плівки концентруємої рідини та відповідне погіршення процесу теплообміну. Цей недолік частково усунений у випарнику зі ступінчастою поверхнею корпусу, розробленому в УкрНДІхіммаші [3, 9].

Випарник із ступінчастим корпусом призначається для процесів, які потребують високого ступеня концентрування. Корпус апарата складається із двох циліндричних секцій, діаметр яких зменшується зверху донизу. Кількість лопотів ротора збільшується в міру зменшення діаметра корпусу.

Внаслідок цього в ступінчастому випарнику легко досягається ступінь концентрування 1 : 50 при питомому пароз'йомі  $1,11 \cdot 10^{-1}$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

На показники роботи роторних апаратів з жорстко закріпленими лопатками впливає щільність зрошення, питоме теплове навантаження, швидкість обертання ротора, тиск в апараті, тип та конструкція лопотів, зазор між лопаткою і гріючою поверхнею, змочуваність поверхні, фізичні властивості рідини тощо.

Внаслідок складності математичного описання процесів, багато які задачі до нинішнього часу аналітично не вирішені і тому основним методом визначення закономірностей роботи роторно-плівкових апаратів поки залишається експериментальний.

Мета роботи: 1) ознайомлення з конструкцією роторно-плівкового випарника з ступінчастим корпусом та жорстко закріпленими лопатками; 2) знайомство з особливостями його роботи та методикою розрахунку при його роботі в режимі нагрівання робочої рідини; 3) отримання навичок проведення досліджень та обробки дослідних даних; 4) закріплення теоретичних знань по темі, вивчення основної термінології.

Поставлена мета досягається розв'язком ряду задач, які можуть розглядатися як у комплексі, так і окремо:

- 1) Складання теплового балансу випарника;
- 2) Знаходження залежностей коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_2$  від числа обертів ротора  $n$ , тобто  $\alpha_2 = f(n)$  при  $\Gamma_v = \text{const}$ ;
- 3) Знаходження залежності коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_2$  від щільності зрошення  $\Gamma_v$ , тобто  $\alpha_2 = f(\Gamma_v)$  при  $n = \text{const}$ ;
- 4) Знаходження залежності коефіцієнта теплопередачі  $K$  від числа обертів ротора  $n$ , тобто  $K = f(n)$  при  $\Gamma_v = \text{const}$ ;
- 5) Знаходження залежності коефіцієнта теплопередачі  $K$  від щільності зрошення  $\Gamma_v$ , тобто  $K = f(\Gamma_v)$  при  $n = \text{const}$ .

## 2. ЛІТЕРНІ ПОЗНАЧЕННЯ, ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

Основні літерні позначення, терміни та визначення, які використовуються у вказівках, наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні літерні позначення, терміни та визначення

Літерні позначення	Одиниця виміру	Термін	Визначення
1	2	3	4
–	–	Роторний тонкоплівковий випарник-дистилятор із нерухомим кріпленням лопаток	Роторний апарат, у якому тепло-масообмін відбувається в тонкому шарі рідини, утвореному на поверхні теплообміну за допомогою ротора (з нерухомо закріпленими лопатками), що обертається
$\Delta, \Delta_{гр}$	м	Зазор установлення ротора	Відстань між кінцем лопатки ротора та поверхнею теплообміну (індекс „гр” – граничний)
$G$	кг/с	Витрати речовини (продуктивність)	Кількість речовини, що проходить крізь даний переріз в одиницю часу
$V$	м <sup>3</sup> /кг		
$H_p$	м	Висота оболонки	Висота стінки апарата, що оточена оболонкою
$z$	шт.	Кількість лопотів	–

$Re_{пл}$	—	Критерій Рейнольдса (плівковий)	Характеризує гідродинаміку потоку та являє собою співвідношення сил інерції та сил в'язкого тертя
$Re_{вц}$	—	Критерій Рейнольдса (відцентровий)	Міра відношення у потоці відцентрових сил та сил молекулярного тертя
$Fr_{вц}$	—	Критерій Фруда (відцентровий)	Критерій гравітаційної подібності. Міра відношення сил інерції та тяжіння в однородному потоці
$Nu$	—	Критерій Нуссельта	Безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі. Характеризує зв'язок між інтенсивністю тепловіддачі та температурним полем в граничній шарі потоку
$Pr$	—	Критерій Прандтля	Критерій фізичних властивостей середовища в процесі конвекційно-дифузійного перенесення теплоти. Характеризує подібність полів швидкостей та температур при русі середовища
$d_p$	м	Діаметр ротора	—

$\delta$	м	Середня товщина плівки	—
$n$	$\text{с}^{-1}$	Число обертів ротора	—
$\Gamma_v$	$\text{м}^2/\text{с}$	Об'ємна щільність зрошення	Об'ємна продуктивність рідини ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) віднесена до одиниці змоченого периметру зрошуваної стінки (м)
$D_{\text{вн}}$	м	Внутрішній діаметр зрошуваної поверхні	—
$Gr$	—	Критерій Грасгофа (Grashof)	Міра відношення сили молекулярного тертя до піднімальної сили, що обумовлена різницею густини рідини в окремих точках неізотермічного потоку

### 3. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія, що поступає в оболонку апарата, до поверхні, може бути розрахований за формулою [8]:

$$Nu = \alpha_1 H_p / \lambda_{\text{т}} = C(Gr \cdot Pr)^a. \quad (1)$$

у формулі (1)  $C = 0,76$  та  $a = 0,25$  при  $10^3 < (Gr \cdot Pr) \leq 10^9$ ;  $C = 0,15$  та  $a = 0,33$  при  $(Gr \cdot Pr) > 10^9$ .



Якщо гріючим теплоносієм є вода, можна добуток ( $Gr \cdot Pr$ ) розрахувати по спрощеній залежності [8]

$$Gr \cdot Pr = H_p^3 (t_{ст} - \Theta_{cp}) B. \quad (2)$$

Коефіцієнт  $B$  у залежності від  $\Theta_{cp}$  має наступні значення:

$\Theta_{cp}, \text{ }^\circ\text{C}$	30	40	60	80	100	150	200
$B \cdot 10^{-9}$	27	39	68	102	147	290	493

У формулах (1) та (2):  $H_p$  – висота оболонки, м;  $\lambda_t$  – коефіцієнт теплопровідності гріючого теплоносія, Вт/(м·К),  $t_{ст}$  – температура стінки,  $^\circ\text{C}$ ;  $\Theta_{cp}$  – середня температура гріючого теплоносія (води) в оболонці,  $^\circ\text{C}$ .

При орієнтовних розрахунках можна прийняти  $\Theta_{cp} = (\Theta_1 + \Theta_2)/2$  та  $t_{ст} = (t_p + \Theta_{cp})/2$ , де  $\Theta_1$  та  $\Theta_2$  – відповідно температура води на вході та виході в оболонці,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_p$  – середня температура у випарнику,  $^\circ\text{C}$ .

Теплофізичні властивості води в залежності від температури у діапазоні  $0 \leq t \leq 120 \text{ }^\circ\text{C}$  можна обчислити за формулами [13]:

$$\begin{aligned} \rho &= 10^3 - 6,2 \cdot 10^{-2} t - 3,55 \cdot 10^{-3} t^2, \text{ кг/м}^3; \\ c_p &= 4223,6 + 1,075 \ln(t/100) t, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}; \\ \mu &= 5,9849 \cdot 10^{-1} (43,252 + t)^{-1,5423}, \text{ Па}\cdot\text{с}; \\ \lambda &= 5,545 \cdot 10^{-1} + 2,46 \cdot 10^{-3} t - 1,184 \cdot 10^{-3} t^2, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі від стінки випарника до рідини у режимі нагрівання можна скористатись формулами [2, 4]:

$$Nu = C \cdot Re_{пл}^m Re_{вц}^{0,6} Pr^n z^k \left( \frac{\Delta}{\Delta_{гр}} \right)^p, \quad (4)$$

де коефіцієнти  $C, m, n, k, p$  знаходять по таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнтів у рівнянні (4)

Область використання	Значення коефіцієнтів
$\Gamma_v \leq 46 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}; \bar{\delta} > \Delta$ (турбулентна область; лопатки занурені в рідину)	$C = 0,01; m = 0,21;$ $n = 0,78; k = 0,12; p = -0,23$
$\Gamma_v > 46 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}; \bar{\delta} > \Delta$ (лопатки занурені в рідину)	$C = 0,2; m = 0,04; n = 0,33;$ $k = 0,05; p = -0,12$
При будь-якому значенні $\Gamma_v; \bar{\delta} \leq \Delta$ (турбулентна область; лопатки не занурені в рідину)	$C = 0,01; m = 0,32;$ $n = 0,67; k = 0,16; p = -0,21$

Розрахунок середньої товщини плівки виконують у залежності від режиму її течі за формулою (5):

$$\bar{\delta} = B_1 \left( \frac{3\nu^2}{4g} \right)^{\frac{1}{3}} Re_{пл}^a Fr_{вц}^b z^f \left( \frac{\Delta}{\Delta_{гр}} \right)^{-0,1}, \quad (5)$$

де коефіцієнти  $B_1, a, b, f$  знаходять в залежності від значень  $Re_{пл}$  та  $Fr_{вц}$  по таблиці 3.2.

Якщо внаслідок розрахунків з'ясується, що  $\bar{\delta} \leq \Delta$ , то на цьому розрахунок середньої товщини плівки закінчується.

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнтів у рівнянні (5)

Область використання	Значення коефіцієнтів
$Fr_{\text{вц}} > 2,1; Re_{\text{пл}} \geq 2400z^{-0,18} \left( \frac{\Delta}{\Delta_{\text{гр}}} \right)^{-0,14} Fr_{\text{вц}}^{-0,73}$ (турбулентний режим руху при інтенсивнім впливі ротора)	$B_1 = 0,12; a = 0,63; b = 0,23;$ $f = 0,12$
$Fr_{\text{вц}} < 2,1; Re_{\text{пл}} \geq 1400z^{-0,18} \left( \frac{\Delta}{\Delta_{\text{гр}}} \right)^{-0,14}$ (турбулентний режим руху при слабому впливі ротора)	$B_1 = 0,14; a = 0,63; b = -0,07;$ $f = 0,08$
$Re_{\text{пл}} < 2400z^{-0,18} \left( \frac{\Delta}{\Delta_{\text{гр}}} \right)^{-0,14} Fr_{\text{вц}}^{-0,73}$ або $Re_{\text{пл}} < 1400z^{-0,18} \left( \frac{\Delta}{\Delta_{\text{гр}}} \right)^{-0,14}$ (перехідний режим руху)	$B_1 = 0,67; a = 0,41; b = -0,07;$ $f = 0,08$

Якщо  $\bar{\delta} > \Delta$ , то остаточний розрахунок виконується за формулою (6):

$$\bar{\delta} = 0,08 Re_{\text{пл}}^{0,33} Re_{\text{вц}}^{-0,45} Fr_{\text{вц}}^{0,31} \left( \frac{\Delta}{\Delta_{\text{гр}}} \right)^{0,22} z^{0,08} \frac{d_p}{2}. \quad (6)$$

Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_2$  від стінки апарата до рідини, що нагрівається, знаходять з виразу

$$Nu = \alpha_2 d_p / \lambda_p. \quad (7)$$

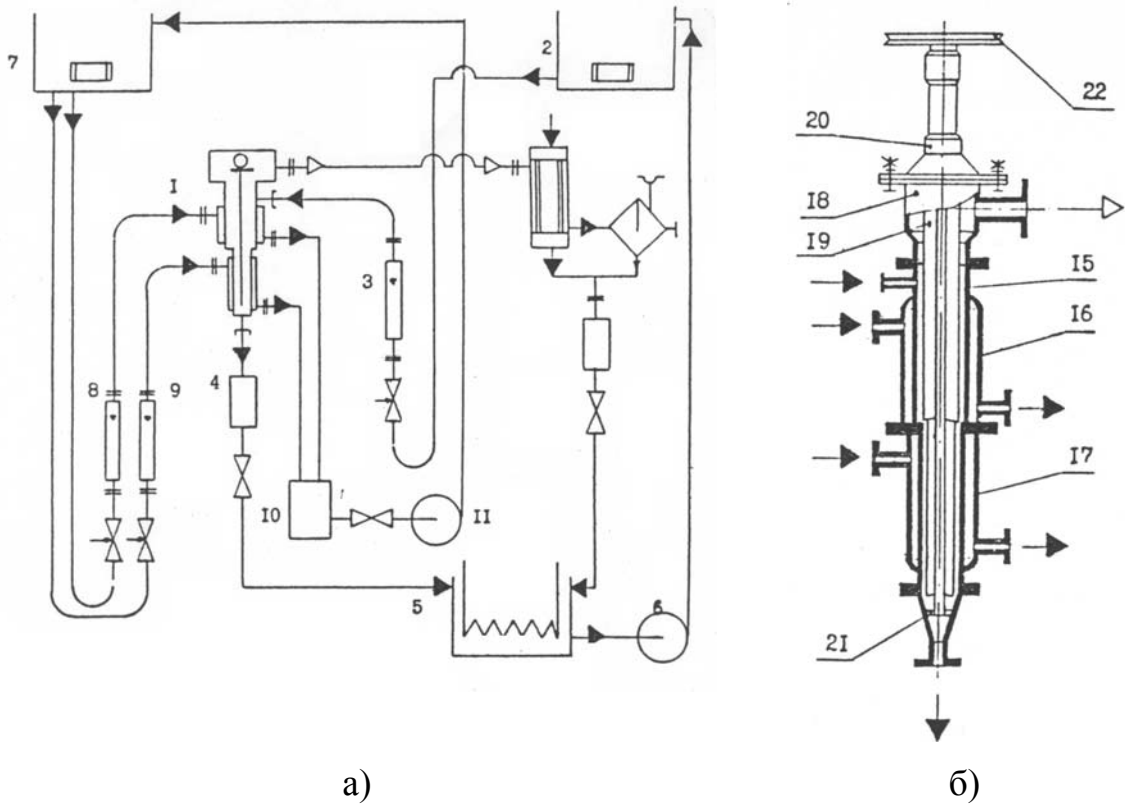
У формулах (4) – (7):  $z$  – кількість лопотів ротора;  $\Delta$  – зазор, м;  $\Delta_{гр}$  – граничний зазор ( $\Delta_{гр} = 2 \cdot 10^{-3}$  м);  $d_p$  – діаметр ротора, м;  $\lambda_p$  – коефіцієнт теплопровідності рідини, що нагрівається, Вт/(м·К).

#### 4. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Основним вузлом установки (рисунок 4.1, а) є тонкоплівковий роторний випарник 1 із ступінчастою поверхнею теплообміну. Рідина, що нагрівається (продукт) із напірного баку 2 крізь систему вентилів та ротаметр 3 подається до випарника. Нагрітий продукт (концентрат) крізь мірну посудину 4 надходить до проміжного збірника 5 та, при необхідності, за допомогою насоса 6 повертається у напірний бак 2.

Гріючий теплоносій (вода) з напірного бака 7 крізь ротаметр 8 подається в оболонку першого ступеня, а крізь ротаметр 9 – в оболонку другого ступеня випарника, а потім збирається в мірнику 10 та, при необхідності, за допомогою насоса 11 перекачується до напірного баку 7. напірні баки 2 та 7 обладнані регуляторами температури та рівня.

Тонкоплівковий роторний випарник із ступінчастою поверхнею теплообміну схематично зображений на рисунку 4.1, б. Він складається з корпусу 15, оболонки першого ступеня (верхньої) 16, оболонки другого ступеня (нижньої) 17, сепаратора 18, ротора 19, верхнього підшипника та ущільнення вала ротора 20, нижнього підшипника 21. Обертання ротору передається від електродвигуна за допомогою шківів 22.



а) б)

1 – випарник роторний; 2, 7 – бак напірний; 3, 8, 9 – ротаметр; 4 – мірник;  
 5 – збірник проміжний; 6, 11 – насоси; 15 – корпус; 16, 17 – оболонки;  
 18 – сепаратор; 19 – ротор; 20 – ущільнення вала ротора; 21 – підшипник;  
 22 – шків

Рисунок 4.1 – Схема експериментальної установки (а) та роторно-плівкового випарника (б)

#### 4.1. Технічна характеристика випарника

Загальна поверхня теплообміну, $m^2$	0,1
Внутрішній діаметр теплообмінної поверхні, мм:	
– першого ступеня	80

– другого ступеня	53
Висота теплообмінної поверхні, мм:	
– першого ступеня	223
– другого ступеня	227
Зазор установлення ротора, мм	0,5
Загальна висота апарата, мм	1230
Довжина ротора, мм	707
Товщина стінки, мм:	
– оболонки	3
– корпуса	2
Внутрішній діаметр вхідного штуцера, мм	5
Кількість лопотів:	
– першого ступеня	3
– другого ступеня	6
Зовнішній діаметр ротора, мм:	
– першого ступеня	79,5
– другого ступеня	52,5

## 5. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

- 5.1. Перевірити заземлення корпусів електродвигунів.
- 5.2. Перевірити справність огорожень частин, що обертаються.
- 5.3. Перевірити справність запірної арматури.
- 5.4. Перед включенням нагрівників робочої рідини та гріючого теплоносія перевірити наявність останніх у напірних баках.
- 5.5. З дозволу викладача увімкнути установку, додержуючись суворої послідовності запуску окремих агрегатів.
- 5.6. Не доторкатись до рухомих частин установки.

- 5.7. Не провадити ремонт установки на ходу.
- 5.8. При будь-якому порушенні режиму роботи установки звертатись до лаборанта.
- 5.9. Після закінчення роботи відключити установку та прибрати робоче місце.

## 6. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОСНОВНІ ВИМІРИ

- 6.1. Встановити, змінюючи напругу на електродвигуні, задане число обертів ротора ( $n$ ).
- 6.2. За допомогою регульовочного вентиля встановити по ротаметру 3 необхідні витрати робочої рідини ( $V_p$ ).
- 6.3. За допомогою регульовочних вентилів по ротаметрам 8 та 9 встановити задані витрати теплоносіїв ( $V_{T1}$  та  $V_{T2}$ ).
- 6.4. Заміряти температури: робочої рідини на вході  $t_p'$ , на виході  $t_p''$  та на границі ступенів  $t_{p,1-2}$ ; гріючого теплоносія: на вході в оболонку другого ступеня  $t_{T2}'$  та на виході  $t_{T2}''$ .

Всі зняті дані записати до таблиці результатів експериментальних досліджень (таблиця 6.1).

**Примітка:** в залежності від задачі, що розглядається (див. стор. 4), змінюється одна величина, інші підтримуються без зміни.

Таблиця 6.1 – Результати експериментальних досліджень

Номер досліджу	Число обертів ротора	Витрати робочої рідини		Витрати гріючого теплоносія				Температура							
	$n$	$V_p$		$V_{T1}$		$V_{T2}$		$t_p'$	$t_p''$	$t_{T1}'$	$t_{T1}''$	$t_{T2}'$	$t_{T2}''$	$t_{p,1-2}$	
	$s^{-1}$	поділок	$m^3/c$	поділок	$m^3/c$	поділок	$m^3/c$	$^{\circ}C$							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	

## 7. МЕТОДИКА ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

7.1. Розрахунок об'ємної щільності зрошення проводять за виразом,  $m^2/c$

$$\Gamma_v = V_p / (\pi D_{BH}).$$

7.2. Теплофізичні властивості теплоносіїв вибирають за [14] або розраховують за формулами (3) при відповідних температурах.

7.3. Розрахунок критеріїв подібності проводять за виразами

$$Re_{пл} = 4 \Gamma_v / \nu; Re_{вц} = n d_p^2 / \nu; Fr_{вц} = n^2 d_p / g; Pr = \nu C_p \rho / \lambda.$$

7.4. Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_2$  проводять за такою послідовністю:

- розраховують середню товщину плівки за формулою (5), попередньо визначивши значення коефіцієнтів рівняння за



таблицею 3.2, в залежності від області використання. При необхідності значення  $\bar{\delta}$  уточнюють за формулою (6).

– розраховують значення критерію  $Nu$  за формулою (4), попередньо визначивши значення коефіцієнтів рівняння за таблицею 3.1, в залежності від області використання.

– розраховують значення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_2$  з рівняння (7).

7.5. Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_1$  проводять за такою послідовністю:

– розраховують значення добутку  $Gr \cdot Pr$  за формулою (2).

– розраховують значення критерію  $Nu$  за формулою (1), попередньо визначивши значення коефіцієнтів рівняння в залежності від режиму роботи.

– з рівняння (1) обчислюють значення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_1$ .

7.6. Розрахунок коефіцієнта теплопередачі  $K$ .

По раніш розрахованим значенням коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  розрахувати значення коефіцієнта теплопередачі  $K$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$K = 1/(1/\alpha_1 + r_{31} + \delta_{ст}/\lambda_{ст} + r_{32} + 1/\alpha_2),$$

де  $\delta_{ст}$  – товщина стінки (див. техн. характеристику), м;  $\lambda_{ст}$  – теплопровідність матеріалу стінки (для нержавіючої сталі), Вт/(м·К) [14];  $r_{31}$  та  $r_{32}$  – термічний опір забруднень, м<sup>2</sup>·К/Вт [14].

7.7. Після обробки експериментальних даних побудувати графіки відповідних залежностей.

7.8. Тепловий баланс складається для кожного ступеня випарника окремо. Результати розрахунків заносять до таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Тепловий баланс \_\_\_\_\_ ступеня випарника

Прихід теплоти $Q_{\text{прих}}$ , Вт	Витрати теплоти $Q_{\text{витр}}$ , Вт
З продуктом $Q_{\text{вх}} = V_p C_{pp} t_p' \rho_p$	З продуктом $Q_{\text{вих}} = V_p C_{pp} t_p'' \rho_p$
З гріючим теплоносієм $Q_{\text{г.вх}} = V_T C_{pT} t_T'$	З гріючим теплоносієм $Q_{\text{г.вих}} = V_T C_{pT} t_T''$
	Втрати теплоти у навколишнє середовище $Q_{\text{втр}}$
Разом	Разом

Із рівняння теплового балансу визначають втрати теплоти у навколишнє середовище  $Q_{\text{втр}}$  (вони не повинні перевищувати 5...8 % від корисно витраченого тепла).

Проаналізувати отримані графічні залежності та зробити висновки.

## 8. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 8.1. Наведіть область використання роторно-плівкових апаратів.
- 8.2. Наведіть класифікацію роторно-плівкових апаратів.
- 8.3. Охарактеризуйте відомі типи роторних пристроїв.
- 8.4. Які основні фактори впливають на роботу роторних апаратів?
- 8.5. Поясніть режими роботи РПА з жорстко закріпленими лопатками.
- 8.6. Поясніть гідродинаміку руху плівки у роторних випарниках із жорстко закріпленими лопатками.
- 8.7. Дайте визначення поняттю "щільність зрошення". Як вона впливає на процеси тепловіддачі?
- 8.8. Поясніть фізичний зміст основних параметрів та критеріїв подібності, які використовуються при розрахунках РПА.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.М. Теплообмен в жидкостных плёнках. – К.: Техніка, 1972. – 196 с.
2. Зубрий О.Г. Исследование некоторых вопросов гидродинамики и теплоотдачи в роторных пленочных аппаратах с жестким креплением лопастей: Автореф. дис. канд. техн. наук. – К.: КПІ, 1973. – 26 с.
3. Марченко А.Н., Соляник О.Н., Нерубацкая В.Д. Тонкопленочный роторный испаритель со ступенчатой поверхностью теплообмена. – "Химическое и нефтяное машиностроение", № 8, 1973, с. 17-18.
4. Тананайко Ю.М., Воронцов Е.Г. Методы расчёта и исследования плёночных процессов. – К.: Техника, 1975. – 312 с.
5. Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. – Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
6. Коган В.Б., Харисов М.А. Оборудование для разделения смесей под вакуумом. – Л.: Химия, 1976. – 376 с.
7. Олевский В.М., Ручинский В.Р. Роторно-плёночные тепло- и массообменные аппараты. – М.: Химия, 1977. – 208 с.
8. Машины и аппараты химических производств: Примеры и задачи /Под ред. В.Н.Соколова. – Л.: Машиностроение, 1982. – 384 с.
9. А.с. 192748 (СССР) – Оpubл. в Б.И., 1967, №6.
10. Плёночная тепло- и массообменная аппаратура. /Под ред. В.М.Олевского //В.М. Олевский, В.Р. Ручинский, А.М. Калашников, В.И.Чернышёв. – М.: Химия, 1988. – 240 с.
11. Василицец И.М., Сабуров А.Г. Роторные пленочные аппараты в пищевой промышленности. – М.: Агропромиздат, 1989. – 136 с.

12. Тютюнников А.Б., Товажнянский Л.Л., Готлинская А.П. Основы расчёта и конструирования массообменных колонн. – К.: Вища школа, 1989. – 223 с.
13. Зайцев И.Д., Зозуля А.Ф., Асеев Г.Г. Машинный расчет физико-химических параметров неорганических веществ. – М.: Химия, 1983. – 256 с.
14. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков – Л.: Химия, 1987. – 576 с.

Навчальне видання

**ПЛІВКОВІ ПРОЦЕСИ. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ РОТОРНО-  
ПЛІВКОВОГО АПАРАТА**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ НДРС З КУРСУ  
«ОБЛАДНАННЯ БІОХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ »

для студентів спеціальності 7.090220 – "Обладнання хімічних виробництв і  
підприємств будівельних матеріалів",  
спеціалізація: комп'ютерне проектування обладнання біохімічних  
виробництв

Укладач:

В.Л.Ракицький, канд. техн. наук