

Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"
Хіміко-технологічний факультет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт по курсу
"ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ"
Частина 2. Теплообмінні та масообмінні процеси
для здобувачів вищої освіти за спеціальністю
161 – Хімічні технології та інженерія

Затверджено на засіданні кафедри ТНРЕ
Протокол №11 від 24.05.2021 р.

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Процеси та апарати хімічних виробництв". Частина 2. Теплообмінні та масообмінні процеси. для здобувачів вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія / Уклад.: І.В. Дмитренко., Л.В. Тимошевська, Г.М. Гордійчук, Держ. ун-т "Одеська політехніка". – Одеса, 2021. – 38 с.

Укладачі: Дмитренко І.В., к.т.н.
Тимошевська Л.В., к.т.н.
Гордійчук Г.М., к.х.н., доцент

І.В. Дмитренко, Л.В. Тимошевська, Г.М. Гордійчук. **Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Процеси та апарати хімічних виробництв". Частина 2.** В методичних вказівках наведені короткі теоретичні відомості за темами робіт, схеми експериментальних установок та методики проведення експериментів, а також надано рекомендації з оброблення отриманих експериментальних даних. Методичні вказівки призначено для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія.

ЗМІСТ

РОБОТА № 8. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОВІДДАЧІ ДО СТІНКИ ЗМІЙОВИКА	3
8.1 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ.....	4
8.2 СХЕМА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	4
8.3 ОБРОБЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	5
8.4. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ.....	7
РОБОТА № 9. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В ТЕПЛООБМІННИКУ З РЕБРАМИ	8
9.1 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ	8
9.2 СХЕМА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ	10
9.3 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	11
9.4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ	13
РОБОТА № 10. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ У ВИПАДКУ БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО КОНТАКТУ ТЕПЛОНОСІЇВ	13
10.1 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ.....	13
10.2 СХЕМА УСТАНОВКИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	14
10.3 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ.....	16
10.4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ	17
РОБОТА № 11. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ МАСОПЕРЕДАЧІ В ПЛІВКОВОМУ АБСОРБЕРІ.....	17
11.1 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ.....	18
11.2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ТА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДІВ	20
11.3 ОБРОБЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	22
11.4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ	23
РОБОТА № 13. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В РЕАКТОРІ ЄМКІСТНОГО ТИПУ	23
13.1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ	23
13.2 СХЕМА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДІВ.....	25
13.3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКІВ.....	26
13.4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ	26
РОБОТА №19. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РЕКТИФІКАЦІЇ БІНАРНОЇ СУМІШІ.....	27
19.1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ	27
19.2 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ.	27
19.3 ОБРОБЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ	30
19.4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ	32
РОБОТА №20. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДЕСОРБЦІЇ.....	33
20.1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ	33
20.2 ОПИС ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ТА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДІВ.....	36
20.3 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДІВ	38
20.4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ.....	38

РОБОТА № 8. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОВІДДАЧІ ДО СТІНКИ ЗМІЙОВИКА

Змійовикові теплообмінні апарати широко використовуються в хімічній промисловості із-за простоти конструкції і доволі інтенсивного процесу теплоперенесення. Для проектування таких теплообмінників необхідне знати коефіцієнти теплопередачі та тепловіддачі.

8.1 Теоретичне обґрунтування роботи

Основне рівняння теплопередачі записується в вигляді

$$Q = K \cdot S \cdot \Delta T_{\text{cp}}, \quad (8.1)$$

де Q – кількість тепла, яка передається від одного теплоносія до іншого, Вт;

S – поверхня теплопередачі, м²;

ΔT_{cp} – середня рушійна сила теплопередачі, К;

K – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м² · К).

Коефіцієнти теплопередачі залежать від коефіцієнтів тепловіддачі

$$K = \frac{1}{\left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_2} \right]}, \quad (8.2)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від гарячого теплоносія до стінки змійовика, Вт/(м² · К);

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки змійовика до холодного теплоносія, Вт/(м² · К);

$\lambda_{\text{ст}}$ – коефіцієнт теплопровідності стінки змійовика, Вт/(м · К);

δ – товщина стінки змійовика, м.

Для знаходження одного з невідомих коефіцієнтів тепловіддачі, наприклад, α_1 , рівняння (8.2) вирішується відносно цієї величини:

$$\alpha_1 = \frac{1}{\left[\frac{1}{K} - \frac{1}{\alpha_2} - \frac{\delta}{\lambda_{\text{ст}}} \right]}. \quad (8.3)$$

Коефіцієнт теплопередачі K можливо визначити за рівнянням (8.1)

$$K = \frac{Q}{S \cdot \Delta T_{\text{cp}}}. \quad (8.4)$$

Коефіцієнт α_2 знаходять залежно від гідродинамічних режимів, використовуючи відповідні критеріальні рівняння теплопередачі.

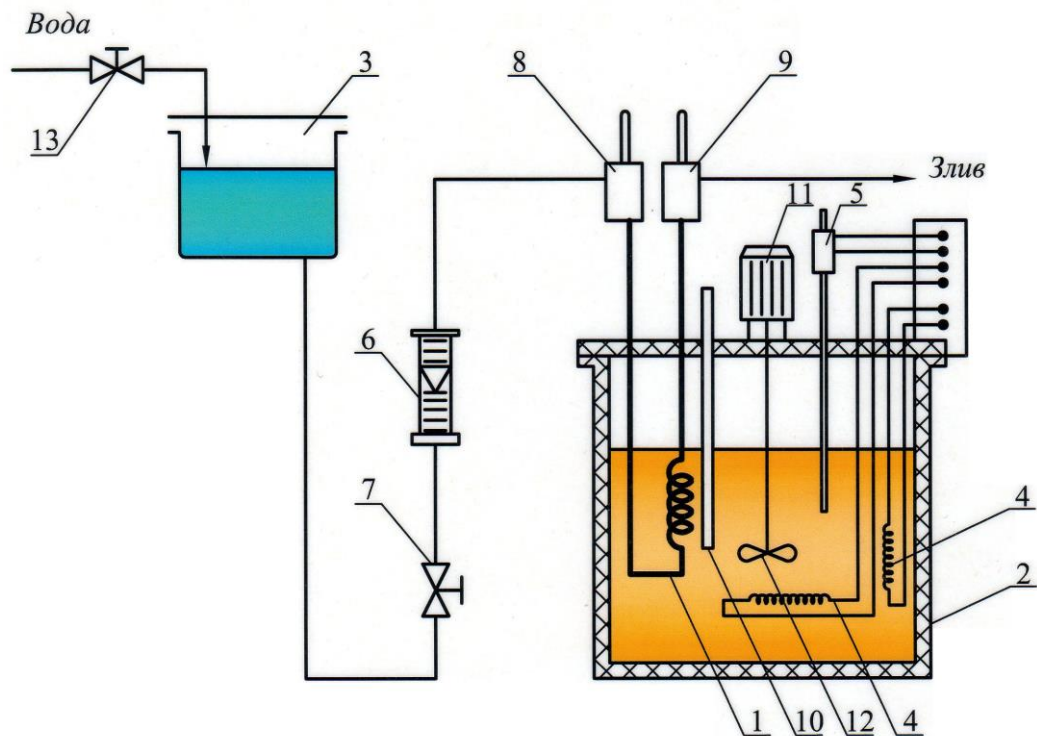
Мета роботи: дослідне визначення коефіцієнта тепловіддачі від гарячого теплоносія до стінки змійовика в залежності від режимів руху холодного теплоносія.

8.2 Схема експериментальної установки та методика проведення досліджень

Схема установки, яка зображена на рис. 8.1, включає: змійовиковий теплообмінник 1, термостат для гарячого теплоносія (масла) 2, напірну ємкість для води 3, електричний нагрівач 4, контактний термометр 5, ротаметр для вимірювання витрат води 6, вентиль для регулювання витрат води 7, термометри для вимірювання температур води 8 і 9, термометр для вимірювання температури гарячого теплоносія (олії) 10; електродвигун 11 з мішалкою 12, вентиль 13 для заповнення ємкості 3 водою.

Тепло передається від гарячого теплоносія (масла) крізь циліндричну стінку змійовика до холодного теплоносія (води), який переміщується по змійовику.

Отже, стає можливим, змінюючи витрати води, вивчати вплив гідродинамічних режимів на величину коефіцієнтів тепловіддачі α_1 .



1 – змійовиковий теплообмінник; 2 – термостат; 3 – ємкість; 4 – нагрівачі; 5 – контактний термометр; 6 – ротаметр; 7 – вентиль; 8, 9, 10 – термометри; 11 – електродвигун; 12 – мішалка; 13 – вентиль.

Рис. 8.1 – Схема установки для дослідження теплообміну в змійовикових теплообмінниках

За вказівками керівника занять встановлюють необхідну температуру масла у термостаті за допомогою контактного термометра 5 і задані витрати води за допомогою регулюючого вентиля 7. Після досягнення режиму стаціонарного теплообміну (за незмінних для цієї витрати води показів термометрів 8 і 9) записують покази усіх термометрів і покази ротаметру 6. Досліди проводять для 2-х температур (T_M) гарячого теплоносія послідовно змінюючи при кожній заданій температурі витрати води тричі (n), записуючи при цьому результати експерименту – температуру на вході T_1 та виході T_2 зі змійовикового теплообмінника до таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 – Результати експерименту

№ п/п	n	T_M	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	G, кг/с

8.3 Оброблення результатів експериментів

8.3.1 Для знаходження величини теплового потоку Q використовують рівняння

$$Q = G \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1), \quad (8.5)$$

де G – масова витрата холодного теплоносія (води), кг/с;

C_p – питома теплоємність води, Дж/(кг · К);

T_1, T_2 – температура води відповідно на вході в змійовик і на виході з нього, К.

8.3.2 Знаходять середню рушійну силу процесу теплопередачі, враховуючи наступну схему перебігу тепла у теплообміннику:

$$\begin{array}{ccc} T_M & & T_M \\ \hline & & \\ & & \\ \hline T_2 & & T_1 \\ \hline \Delta T_M & & \Delta T_6 \end{array}$$

З урахуванням температур нагріву масла T_M і температур води на вході T_1 і на виході T_2 розраховують максимальний ΔT_6 та мінімальний ΔT_M температурний напір:

$$\Delta T_6 = T_M - T_1, \quad (8.6)$$

$$\Delta T_M = T_M - T_2, \quad (8.7)$$

де ΔT_6 – більша різниця температур, °С;

ΔT_M – менша різниця температур, °С.

Середня рушійна сила процесу теплопередачі розраховується як:

$$T_{cp} = \frac{\Delta T_6 - \Delta T_M}{\ln \frac{\Delta T_6}{\Delta T_M}}. \quad (8.8)$$

Якщо $\frac{\Delta T_6}{\Delta T_M} \leq 2$, то середня рушійна сила процесу теплообміну визначається за рівнянням

$$T_{cp} = \frac{\Delta T_6 + \Delta T_M}{2}. \quad (8.9)$$

8.3.3. Визначають загальний коефіцієнт теплопередачі K з рівняння (8.4), попередньо підраховуючи поверхню теплообмінника S .

8.3.4. Коефіцієнт тепловіддачі α_2 в рівнянні (8.3) для змійовика розраховується через коефіцієнт тепловіддачі для прямої труби $\alpha_{2пр}$ таких же розмірів з урахуванням діаметру труби змійовика і радіуса витку змійовика R по рівнянню:

$$\alpha_2 = \alpha_{2пр} \cdot \left(1 + 1,77 \cdot \frac{d}{R}\right). \quad (8.10)$$

У свою чергу, коефіцієнт тепловіддачі для прямої труби $\alpha_{2пр}$ залежить від режимів руху води, і для його розрахунку можуть бути рекомендовані наступні рівняння:

– для турбулентного режиму руху води ($Re > 10000$)

$$Nu = 0,21 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{cr}}\right)^{0,25}, \quad (8.11)$$

– для ламінарного режиму ($Re < 2320$)

$$Nu = 0,17 \cdot Re^{0,33} \cdot Gr^{0,1} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{cr}}\right)^{0,25}, \quad (8.12)$$

– для перехідного режиму ($2320 < Re < 10000$)

$$\alpha_{2пр} = \alpha_{турб} \cdot A, \quad (8.13)$$

де $\alpha_{турб}$ – величина коефіцієнту тепловіддачі, який визначається з рівняння (8.11) для турбулентного режиму, Вт/(м · К);

A – величина, що визначається за формулою

$$A = 1 - (6 \cdot 10^5 \cdot Re^{-1,8}) . \quad (8.14)$$

Використовуючи одне із запропонованих рівнянь (8.11, 8.12) та визначивши величину теплового критерію Нусельту Nu, розраховують α_{2np} :

$$\alpha_{2np} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} , \quad (8.15)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності води, Вт/(м·К);
 d – внутрішній діаметр трубки змійовика, м.

Після чого з рівняння (8.10) знаходять коефіцієнт тепловіддачі α_2 та порівнюють її з літературними даними для аналогічних режимів руху.

У запропонованих рівняннях (8.11, 8.12) використовуються наступні критерії подібності (числа) Рейнольдса (Re), Прандтля (Pr) та Грасгофа (Gr), які визначаються:

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu} , \quad (8.16)$$

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{\lambda} , \quad (8.17)$$

$$Gr = \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta T , \quad (8.18)$$

де w – середня лінійна швидкість руху води у змійовику, м/с;

d – внутрішній діаметр змійовика, м;

ρ – густина води за середньої температури, кг/м³;

ν і μ – відповідно кінематичний та динамічний коефіцієнти в'язкості води, м²/с та Па·с;

c_p – ізобарна теплоємність води, Дж/(кг·К);

g – прискорення вільного падіння, м²/с;

β – коефіцієнт об'ємного розширення води, 1/К;

ΔT – різниця температур між стінкою змійовика і водою, К.

У разі розрахунку критерію $Pr_{ст}$ теплофізичні параметри води обираються за температурою стінки змійовику. Так як температура стінки змійовика незначно відрізняється від температури води, то часто приймають:

$$\frac{Pr}{Pr_{ст}} = 1 . \quad (8.19)$$

8.3.5. З рівняння (8.3) визначають значення коефіцієнтів тепловіддачі від гарячого теплоносія до стінки змійовика α_1 та порівнюють їх з літературними даними. Результати проведених розрахунків заносять до таблиці 8.2.

Таблиця 8.2 – Результати розрахунків

№ п/п	Q, Вт	w, м/с	ΔT_{cp} , °C	K, Вт/м ² ·К	ρ	μ	ν	λ	β	Re	Pr	$Pr_{ст}$	Gr	Nu
1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

8.4. Контрольні питання

8.4.1. Опишіть загальне рівняння теплопередачі

8.4.2. Охарактеризуйте коефіцієнти теплопередачі та тепловіддачі.

8.4.3. Середня рушійна сила процесу теплопередачі.

8.4.4. Основні конструкції теплообмінних апаратів.

8.4.5. Критерії теплової подібності, їх фізичне значення.

РОБОТА № 9. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В ТЕПЛООБМІННИКУ З РЕБРАМИ

Теплообмінні апарати з ребрами широко використовуються в хімічній, нафтопереробній, холодильній та інших галузях промисловості. Ці апарати мають стінку, через яку тепло від гарячого теплоносія передається холодному. Ребра застосовують на тому боці стінки, що передає тепло, де коефіцієнт тепловіддачі значно менший, ніж на іншому, наприклад там, де переміщуються гази або дуже в'язкі рідини. Такі апарати використовують для нагрівання повітря (калорифери), для конденсації парів (конденсатори), для охолодження рідин (радіатори).

В даній роботі досліджується теплообмінний апарат з ребрами, де U-подібні трубки змонтовані у два яруси і пронизують ребра. Масло переміщується в трубках, а повітря – між ребрами.

9.1 Теоретичне обґрунтування роботи

Основне рівняння теплопередачі має вигляд

$$Q = K \cdot S \cdot \Delta T_{\text{ср}}, \quad (9.1)$$

де Q – тепло, що передається від гарячого до холодного теплоносія, Вт;

S – поверхня теплопередачі, м^2 ;

$\Delta T_{\text{ср}}$ – середня рушійна сила теплопередачі, К;

K – коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Для теплообмінників з ребрами за величину S приймається площа внутрішньої поверхні трубок, по яких тече нагріте в термостаті масло. Середня рушійна сила визначається:

$$\Delta T_{\text{ср}} = \varepsilon_{\Delta T} \cdot \Delta T_{\text{пр}}, \quad (9.2)$$

де $\varepsilon_{\Delta T}$ – поправочний коефіцієнт;

$\Delta T_{\text{пр}}$ – середня рушійна сила процесу теплопередачі за умов протитечії, К.

Поправочний коефіцієнт $\varepsilon_{\Delta T}$ визначається аналітичним шляхом або за графіків, що наводяться у літературі по теплообміну і залежить від схеми руху теплоносіїв та являється функцією двох параметрів R та P :

$$\varepsilon_{\Delta T} = f(R, P) \quad (9.3)$$

Параметри R та P визначаються:

$$R = \frac{(T_{\text{м1}} - T_{\text{м2}})}{(T_{\text{п2}} - T_{\text{п1}})} \quad (9.4)$$

$$P = \frac{(T_{\text{п2}} - T_{\text{п1}})}{(T_{\text{м1}} - T_{\text{м2}})} \quad (9.5)$$

Середня рушійна сила протитоку

$$\begin{array}{c} T_{\text{м2}} \quad T_{\text{м1}} \\ \leftarrow \text{-----} \\ \text{-----} \rightarrow \\ T_{\text{п1}} \quad T_{\text{п2}} \\ \text{-----} \\ \Delta T_{\text{б}} \quad \Delta T_{\text{м}} \end{array} \quad \Delta T_{\text{пр}} = \frac{(\Delta T_{\text{б}} - \Delta T_{\text{м}})}{\ln \frac{\Delta T_{\text{б}}}{\Delta T_{\text{м}}}}, \quad (9.6)$$

де $T_{\text{м1}}$, $T_{\text{м2}}$ – температура масла на вході та виході з теплообмінника, $^{\circ}\text{C}$;

$T_{\text{п1}}$, $T_{\text{п2}}$ – температура повітря на вході та виході з теплообмінника, $^{\circ}\text{C}$;

Із рівнянь (9.1) та (9.2) можна визначити коефіцієнт теплопередачі

$$K = \frac{Q}{S \cdot \varepsilon_{\Delta T} \cdot \Delta T_{\text{пр}}}, \quad (9.7)$$

Так як величину $\varepsilon_{\Delta T}$ визначити важко, то рівняння (9.7) модифікують. Для чого $\Delta T_{\text{ср}}$ визначають за середньологарифмічній різниці температур, як для протитоку (рівняння (9.6)), тобто прийнято $\Delta T_{\text{пр}} = \Delta T_{\text{ср}}$, а зроблене припущення враховується значенням $KE = K \cdot \varepsilon_{\Delta T}$. Отже,

$$KE = K \cdot \varepsilon_{\Delta T} = \frac{Q}{S \cdot \Delta T_{\text{пр}}} \quad (9.8)$$

і в подальших розрахунках визначають лише KE .

Тепловий потік

$$Q = G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} \cdot (T_2 - T_1), \quad (9.9)$$

де $G_{\text{п}}$ – масова витрата повітря, кг/с;

$C_{\text{п}}$ – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·К);

T_1, T_2 – температура повітря відповідно на вході і на виході в теплообмінник, К.

Коефіцієнт теплопередачі залежить від багатьох факторів. В критеріальній формі

$$KE = f(Re_{\text{п}}, Pr_{\text{п}}, Gr_{\text{п}}, Re_{\text{м}}, Pr_{\text{м}}, Gr_{\text{м}}) \quad (9.10)$$

де $Re_{\text{п}}, Pr_{\text{п}}, Gr_{\text{п}}$ – числа Рейнольдса, Прандтля та Грасгофа для повітря, що омиває труби та ребра зовні;

$Re_{\text{м}}, Pr_{\text{м}}, Gr_{\text{м}}$ – критерії Рейнольдса, Прандтля та Грасгофа для масла.

В умовах експерименту числа $Pr_{\text{п}}$ та $Pr_{\text{м}}$ мало змінюються, тому їх виключають із рівняння (9.10). Вплив критеріїв $Gr_{\text{п}}$ та $Gr_{\text{м}}$ також незначний. Тому рівняння (9.10) спрощується

$$KE = f(Re_{\text{п}}, Re_{\text{м}}) \quad (9.11)$$

або

$$KE = A \cdot Re_{\text{п}}^m \cdot Re_{\text{м}}^n \quad (9.12)$$

Величини A, m, n у критеріальному рівнянні (9.12) визначаються графічною обробкою двох серій експериментальних даних.

За результатами першої серії ($Re_{\text{м}} = \text{const}$) знаходять m , як тангенс кута нахилу прямої

$$\lg(KE) = \lg A' + m \lg Re_{\text{п}}, \quad (9.13)$$

де $A' = A \cdot Re_{\text{м}}^n$.

За результатами другої серії ($Re_{\text{п}} = \text{const}$) знаходять n , як тангенс кута нахилу прямої

$$\lg(KE) = \lg A'' + n \lg Re_{\text{м}}, \quad (9.14)$$

де $A'' = A \cdot Re_{\text{п}}^m$.

За відрізками $\lg(A \cdot Re_{\text{п}}^m)$, $\lg(A \cdot Re_{\text{м}}^n)$ на вісі $\lg(KE)$ або з рівняння $A = \frac{KE}{Re_{\text{п}}^m \cdot Re_{\text{м}}^n}$

знаходять значення A .

Мета роботи: дослідне визначення коефіцієнту теплопередачі в теплообміннику з ребрами; отримання критеріального рівняння, яке описує процес теплообміну в теплообміннику з ребрами; встановлення коефіцієнту збільшення поверхні теплопередачі трубок із ребрами в порівнянні із трубками без ребер.

9.2 Схема експериментальної установки та методика проведення експерименту

Схема і напрямок руху теплоносіїв представлена на рис. 9.1, а схема установки на рис. 9.2. Основним елементом її є теплообмінник з ребрами (радіатор) 1, трубками якого рухається масло, нагріте в термостаті 7. Повітря подається в установку вентилятором 4. Витрати повітря регулюються засувкою 3 і встановлюються за допомогою газового лічильника 2. Тиск повітря вимірюється манометром 5, а його температура – термометрами 10 на вході та виході з теплообміннику. Температура масла встановлюється по контактному термометру 11 і вимірюється термометрами 6 на вході та виході з теплообміннику.

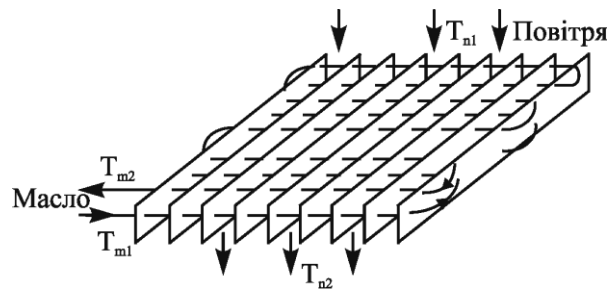
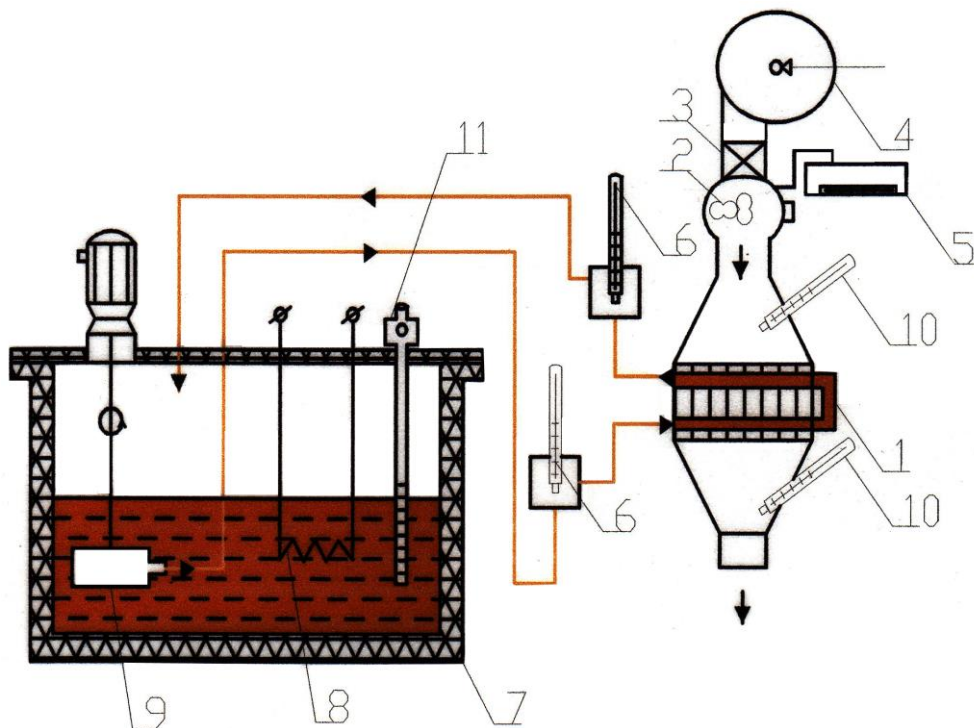


Рис. 9.1 – Схема і напрямок руху теплоносіїв в теплообміннику з ребрами



1 – теплообмінник з ребрами; 2 – газовий лічильник; 3 – засувка; 4 – вентилятор; 5 – манометр; 6, 11 – термометри; 7 – термостат; 8 – електронагрівач; 9 – насос; 10 – термометр; 11 – контактний термометр

Рис. 9.2 – Схема експериментальної установки

Порядок виконання експерименту.

Вмикнути вентилятор 4. За допомогою засувки 3 встановити діапазон витрат повітря (від мінімуму до максимуму) та розбити його на 3...4 інтервали (за манометром 5). Вимикнути вентилятор.

На контактному термометрі 11 встановити меншу з вказаних керівником занять температуру. Включити електронагрівач 8 термостата та насос 9. Температуру масла слід контролювати за термометром 6.

Після того, як установка прогріється, включити вентилятор 4 і встановити необхідну витрату повітря. Витримати стаціонарний режим роботи установки 5...10 хв. і записати покази приладів. Перейти на інші витрати повітря. Перейти на іншу температуру масла та продовжити досліди.

Результати вимірювань заносять до табл. 9.1.

Таблиця 9.1 – Результати вимірювань

№ п/п	Покази газового лічильника, м ³		τ, с	V _{пов.} м ³ /с	Температура, °С			
	V _п	V _к			Повітря		Масло	
					T _{п1}	T _{п2}	T _{м1}	T _{м2}
1	2	3	4	5	6	7	8	9

9.3 Обробка результатів експериментів

9.3.1. Витрати повітря визначаються за показами лічильника, м³/с:

$$V_{\text{пов.}} = \frac{V_{\text{к}} - V_{\text{п}}}{\tau}, \quad (9.15)$$

де τ – час, який визначається секундоміром, с.

9.3.2. Тиск повітря у апараті (Па) слід визначати за рівнянням:

$$P_{\text{пов.}} = P_{\text{бар.}} + \rho_5 \cdot g \cdot h_5, \quad (9.16)$$

де P_{бар.} – барометричний тиск, Па;

ρ₅ – густина рідини в дифманометрі 5, кг/м³.

h₅ – показ дифманометра 5, м;

9.3.3. Густина повітря за робочих умов у лабораторії:

$$\rho_{\text{пов.}} = 1,293 \cdot \frac{T_0 \cdot P_{\text{пов.}}}{T \cdot P_0}, \quad (9.17)$$

де T – середня температура повітря в апараті, °С.

9.3.4. Масові витрати повітря в апараті, м³/с:

$$G_{\text{пов.}} = V_{\text{пов.}} \cdot \rho. \quad (9.18)$$

9.3.5. Швидкість повітря в апараті, м/с:

$$W_{\text{пов.}} = \frac{V_{\text{пов.}}}{F_{\text{віл}}}, \quad (9.19)$$

де F_{віл.} – вільний перетин апарату (м²), що знаходиться у такий спосіб:

$$F_{\text{віл.}} = F_0 - (F_{\text{т}} + F_{\text{р}}) \quad (9.20)$$

де F₀ – площа апарату, м²;

F_т – площа, яку займають трубки, м²;

F_р – площа, яку займають ребра, м².

Площа апарату:

$$F_0 = A \cdot B; \quad (9.21)$$

Площа, яку займають трубки:

$$F_{\text{т}} = \frac{N_{\text{т}}}{2} \cdot (A - \delta \cdot N_{\text{р}}) \cdot d_3; \quad (9.22)$$

Площа, яку займають ребра:

$$F_p = B \cdot \delta \cdot N_p. \quad (9.23)$$

Розміри апарату: $A \times B \times h = 350 \times 370 \times 50$ мм.

Розміри пластин: $h \times B \times \delta = 50 \times 370 \times 0,2$ мм, $N_p = 76$.

Розміри трубок: $d_3 = 14$ мм, $d_b = 12$ мм, $N_T = 28$.

9.3.6. Поверхня теплопередачі визначається наступним рівнянням, м²:

$$S = \pi \cdot d_b \cdot N_T \cdot A. \quad (9.24)$$

9.3.7 Кількість тепла, яка перейшла від масла до повітря в процесі теплообміну, Вт:

$$Q = G_{\text{пов.}} \cdot C_{\text{пов.}} \cdot (T_{\text{п2}} - T_{\text{п1}}), \quad (9.25)$$

де $C_{\text{пов.}}$ – теплоємність повітря (за середньої температури), Дж/(кг·К).

9.3.8. Витрати масла

$$G_M = \frac{Q}{C_M \cdot (T_{M1} - T_{M2})}, \quad (9.26)$$

де C_M – теплоємність масла, Дж/(кг·К).

9.3.9. Число Рейнольдса для повітря $Re_{\text{пов}}$

$$Re_{\text{пов.}} = \frac{W_{\text{пов.}} \cdot d_3 \cdot \rho_{\text{пов.}}}{\mu_{\text{пов.}}}, \quad (9.27)$$

де $\mu_{\text{п}}$ – в'язкість повітря за середньої температури повітря, Па·с.

9.3.10. Число Рейнольдса для масла Re_M

$$Re_M = \frac{4 \cdot G_{\text{п}}}{\pi \cdot d_3 \cdot \mu_M}, \quad (9.28)$$

де μ_M – в'язкість масла за середньої температури масла, Па·с.

Результати розрахунків заносять до таблиці 9.2.

Таблиця 9.2 – Результати розрахунків

№ п/п	$V_{\text{пов.}}$ м ³ /с	$P_{\text{пов.}}$ Па	$\rho_{\text{пов.}}$ кг/м ³	$G_{\text{пов.}}$ кг/с	$W_{\text{пов.}}$ м/с	Q , Вт	G_M	$Re_{\text{пов}}$	Re_M
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

9.3.11 Будують графіки за рівняннями (9.13) та (9.14) та по ним знаходять значення m , n , A , та записують рівняння (9.12).

9.3.12 Визначають площу зовнішньої поверхні трубок та ребер ($F_{\text{зп}}$). В теплообміні приймають участь:

– всі трубки, зовнішня поверхня яких становить $N_T \cdot \pi \cdot d_3 \cdot A$, але частина її затіняється ребрами

$$F_T = N_T \cdot \pi \cdot d_3 \cdot (A - \delta \cdot N_p); \quad (9.29)$$

– по дві бокові поверхні кожного ребра за мінусом поверхні отворів під трубки (з двох боків):

$$F_{\text{реб}} = N_p \left[(2 \cdot h \cdot B) - 2 \left(\frac{\pi \cdot d_3^2}{4} \right) N_p \right] \quad (9.30)$$

– торці ребер

$$F_{\text{тор}} = 2N_p \cdot \delta \cdot (h + B) \quad (9.31)$$

Тоді площа зовнішньої поверхні трубок та ребер складатиме

$$F_{\text{зп}} = F_{\text{тр}} + F_{\text{реб}} + F_{\text{тор}} \quad (9.32)$$

9.3.14 Порівнюють поверхні $F_{\text{зп}}$ та S і знаходять коефіцієнт K_{ε}

$$K_{\varepsilon} = \frac{F_{\text{зп}}}{S} \quad (9.33)$$

Записують висновки по виконаній роботі.

9.4 Контрольні питання

9.4.1 Опишіть основне рівняння теплопередачі.

9.4.2 Термічні опори, врахування їх при розрахунках процесів теплопередачі.

9.4.3 Теплообмінні апарати з ребрами, особливості конструкцій, застосування.

9.4.4 Критеріальні рівняння, вивід їх, значення та використання.

9.4.5 Охарактеризуйте коефіцієнти теплопередачі та тепловіддачі.

РОБОТА № 10. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ У ВИПАДКУ БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО КОНТАКТУ ТЕПЛОНОСІЇВ

В багатьох галузях промисловості широко використовуються контактні теплообмінні апарати – контактні теплообмінники (КТ). В цих апаратах процес підводу та відводу тепла при нагріванні або охолодженні газів, рідин, твердих тіл виконується при безпосередньому контакті теплоносіїв.

В системі газ-рідина теплообмін супроводжується масообміном (випаровування рідини в газову фазу, конденсація парів, конвективний та дифузійний переніс). Тобто в КТ є потік тепла Q_T (тепло, яке передається в процесах теплообміну – конвекція, теплопровідність та тепловипромінювання) та Q_M (тепло, яке передається в процесах масообміну). В залежності від умов, які створюються в КТ, величини та напрямки потоків Q_T та Q_M можуть змінюватися. Для інтенсифікації процесів в КТ використовують різні насадки.

10.1 Теоретичне обґрунтування роботи

Для КТ основне рівняння теплопередачі записують так:

$$Q = K_V \cdot V_A \cdot \Delta T_{\text{ср}} \quad (10.1)$$

де Q – кількість тепла, яка перейшла від одного теплоносія до іншого, Вт;

V_A – робочий об'єм КТ, м³;

$\Delta T_{\text{ср}}$ – середня рушійна сила процесу теплопередачі, К;

K_V – коефіцієнт теплопередачі, який віднесено до робочого об'єму КТ, Вт/(м³·К).

Об'ємний коефіцієнт теплопередачі K_V для процесу, який протікає в даному випадку (охолодження гарячої води холодним повітрям) встановлюється із критеріального рівняння:

$$\frac{K_V \cdot d_e^2}{\lambda_r} = C \cdot \text{Re}_r^m \cdot \text{Re}_p^n \cdot \text{Pr}_r^l \quad (10.2)$$

де d_e – еквівалентний діаметр насадки, м;

λ_r – коефіцієнт теплопровідності газу, Вт/(м·К);

Re_r – критерій Рейнольдса для газу;

Re_p – критерій Рейнольдса для рідини;

Pr_r – критерій Прандтля для газу;

C – стала;

m, n, l – показники ступенів.

Для газів величина числа Прандтля із змінням температури змінюється незначно і близька до одиниці, тому рівняння (10.2) спрощується

$$\frac{K_V \cdot d_e^2}{\lambda_\Gamma} = C \cdot Re_\Gamma^m \cdot Re_p^n \quad (10.3)$$

Критерій Рейнольдса для газу визначається

$$Re_\Gamma = \frac{w_\Gamma \cdot d_e \cdot \rho_\Gamma}{\varepsilon \cdot \mu_\Gamma}, \quad (10.4)$$

де w_Γ – фіктивна швидкість газу, віднесена до всього перетину апарату, м/с;

ρ_Γ – густина газу в робочих умовах, кг/м³;

μ_Γ – в'язкість газу, Па·с;

ε – порозність (вільний об'єм) насадки.

Критерій Рейнольдса для рідини визначається

$$Re_p = \frac{4\varepsilon \cdot L_p \cdot \rho_p}{\mu_p \cdot a} \quad (10.5)$$

де ρ_p – густина рідини, кг/м³;

μ_p – в'язкість рідини, Па·с;

a – питома поверхня насадки, м²/м³;

L_p – щільність зрошення, м³/(м²·с).

Щільність зрошення

$$L_p = \frac{V_p}{0,785 \cdot D_k^2}, \quad (10.6)$$

де V_p – об'ємні витрати рідини, м³/с;

D_k – внутрішній діаметр КТ, м².

Мета роботи: дослідження процесу теплопередачі у випадку безпосереднього контакту рідини і газу під час нерухомого та псевдозрідженого шару насадки

10.2 Схема установки та методика проведення експериментів

Експериментальна установка (рис. 10.1) має КТ у вигляді насадкової колони 1, в якій знаходиться шар насадки (пластмасова пропелерна насадка). В колоні протітечією переміщуються рідина (гаряча вода) та газ (холодне повітря).

Витрати води встановлюються вентилем 13 та вимірюються ротаметром 11. Витрати повітря встановлюються засувкою 3 і вимірюються газовим лічильником 2. Температура теплоносіїв виміряється термометрами 9. Тиск повітря перед лічильником та в колоні вимірюється манометрами 5 та 10.

Вода підігрівається в ємкості 14 і насосом 12 подається на зрошення колони через розпилювач 7. Повітря подається в колону знизу вентилятором 4. Установка дозволяє вивчати теплообмін як в умовах, коли насадка нерухома, так і в умовах, коли вона псевдозріджена.

Для проведення досліджень необхідно:

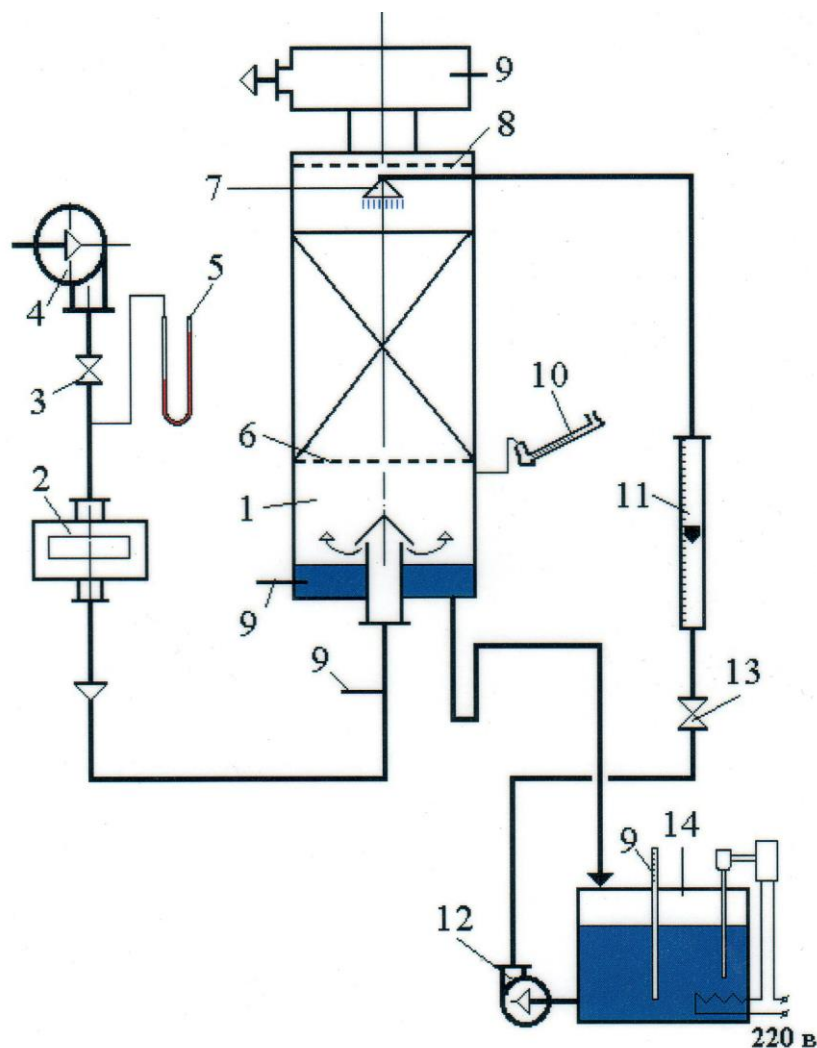
10.2.1. Встановити на регуляторі температури ємкості 14 задану керівником заняту температуру води (не вище 50 °С) і вмикнути нагрівачі.

10.2.2. Після того, як вода в ємкості 14 підігріється до температури на 5...10 °С нижче заданої, вмикнути насос 12 і вентилем 13 встановити довільну витрату води по ротаметру 11. При таких умовах установка 15...20 хвилин прогрівається.

10.2.3. Коли температура води в ємкості 14 досягне заданої величини, вмикнути вентилятор, встановити необхідні витрати води та повітря і витримувати такий режим 5...10 хвилин.

10.2.4. Записати температури води і повітря (на вході та виході КТ), витрати води і повітря, покази манометрів, висоту шару насадки.

Дослідів повинно бути не менше 9: на кожну з трьох витрат води (G_{p1} , G_{p2} , G_{p3}) по три витрати повітря (V_{r1} , V_{r2} , V_{r3}). Результати дослідів заносять до табл. 10.1.



1 – колона; 2 – газовий лічильник; 3 – засувка; 4 – вентилятор; 5, 10 – манометри; 6 – опорна решітка; 7 – розпилювач; 8 – обмежувальна решітка; 9 – термометр; 10 – манометр; 11 – ротаметр; 12 – насос; 13 – вентиль; 14 – ємкість для води

Рис. 10.1 – Схема установки для дослідження теплообміну при безпосередньому контакті теплоносіїв

Таблиця 10.1 – Результати дослідів

№п /п	Витрати води		Витрати повітря		Температура, °С				Висота насадки Н, м	
	Покази ротаметру, n	G_p , кг/с	Покази лічильника		Час τ , с	Води		Повітря		
			V_n , м ³	V_k , м ³		Вхід	Вихід	Вхід		Вихід

10.3 Обробка результатів експериментів

10.3.1. Встановлюють значення теплофізичних параметрів води (р) та повітря (г) (c_p , ρ_p та μ_p ; c_g , ρ_g та μ_g) за їх середніх температурах у КТ.

10.3.2. Тепло, яке перепадає від води до повітря, визначається

$$Q = G_g \cdot c_g \cdot (T_{g2}^{вх} - T_{g1}^{вх}) = G_p \cdot c_p \cdot (T_{p1}^{вх} - T_{p2}^{вх}), \quad (10.7)$$

де G_p , G_g – витрати рідини та газу, кг/с;

c_p , c_g – теплоємність води та повітря, Дж/(кг·К);

$T_{p1}^{вх}$, $T_{p2}^{вх}$ – температура рідинної фази (води) на вході та виході КТ, °С;

$T_{g1}^{вх}$, $T_{g2}^{вх}$ – температура газової фази (повітря) на вході та виході КТ, °С.

Результати проміжних розрахунків заносять до табл.10.2.

Таблиця 10.2 – Результати проміжних розрахунків

№, п/п	$t_{пов.}^{сер}$	c_g	ρ_g	μ_g	$t_{в.}^{сер}$	c_p	ρ_p	μ_p	Q, Вт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

10.3.3. Рушійна силу процесу теплопередачі у колоні, де протічає рідинна (гаряча вода) та газ (холодне повітря) знаходиться таким чином:

$$\begin{array}{c} T_p^{вх} \quad T_p^{вх} \\ \text{-----} > \\ < \text{-----} \\ \frac{T_g^{вх}}{\Delta T_б} \quad \frac{T_g^{вх}}{\Delta T_м} \end{array}$$

$$T_{cp} = \frac{\Delta T_б - \Delta T_м}{\ln \frac{\Delta T_б}{\Delta T_м}}, \quad (10.8)$$

Якщо $\frac{\Delta T_б}{\Delta T_м} \leq 2$, то середня рушійна сила процесу теплообміну визначається за рівнянням

$$T_{cp} = \frac{\Delta T_б + \Delta T_м}{2}. \quad (10.9)$$

10.3.4. Із рівняння (10.1) знаходять коефіцієнт теплопередачі

$$K_v = \frac{Q}{V_A \cdot \Delta T_{cp}} \quad (10.10)$$

де V_A визначається як об'єм насадки таким способом

$$V_A = 0,785 \cdot D_A^2 \cdot H \quad (10.11)$$

де H – висота насадки, яка визначається експериментально, м.

10.3.5. Знаходять швидкість газової фази w_g у КТ за відомим значенням об'ємних витрат повітря у апараті, а також щільність зрошення L_p за рівнянням (10.6).

10.3.6. За рівнянням (10.4), (10.5) для всіх режимів роботи апарату розраховують числа Рейнольдса для рідинної та газової фази Re_g , Re_p .

Результати розрахунків заносять до табл. 10.3.

Таблиця 10.3 – Результати розрахунків

№, п/п	$\Delta T_{cp},$ К	$V_A,$ м ³	$K_v,$ Вт/(м ³ ·К)	$w_r,$ м/с	$L_p,$ м ³ /(м ² ·с)	Re_r	Re_p
1	2	3	4	5	6	7	8

10.3.7. Визначають константи в критеріальному рівнянні (10.2), логарифмування якого дає

$$\lg \frac{K_v \cdot d_e^2}{\lambda_r} = \lg A + m \cdot \lg Re_r + n \cdot \lg Re_p \quad (10.12)$$

За значенням $Re_p = \text{const}$ рівняння (10.3) має вигляд $A' = A \cdot Re_p^n$:

$$\lg \frac{K_v \cdot d_e^2}{\lambda_r} = \lg A' + m \cdot \lg Re_r, \quad (10.13)$$

а за $Re_r = \text{const}$ отримуємо $A'' = A \cdot Re_r^m$:

$$\lg \frac{K_v \cdot d_e^2}{\lambda_r} = \lg A'' + n \cdot \lg Re_p. \quad (10.14)$$

Для встановлення величини C , m та n у критеріальному рівнянні слід побудувати графіки за отриманими рівняннями (10.13) та (10.14), тому для кожного дослідження розраховують величини $\lg \frac{K_v \cdot d_e^2}{\lambda_r}$, $\lg Re_r$, $\lg Re_p$. Результати заносять до табл. 10.4.

Таблиця 10.4 – Дані для побудови графіків за рівняннями (10.13) та (10.14)

№ п/п	$\lg \frac{K_v \cdot d_e^2}{\lambda_r}$	$\lg Re_r$	$\lg Re_p$
1	2	3	4

10.3.8. Після знаходження графічним способом параметрів A , m та n записують критеріальне рівняння (10.3).

10.4 Контрольні питання

- 10.4.1. Назвіть у який спосіб передається теплова енергія в КТ.
- 10.4.2. Опишіть та поясните модифіковане основне рівняння теплопередачі
- 10.4.3. Охарактеризуйте об'ємний коефіцієнт теплопередачі.
- 10.4.4. Назвіть критерії подібності, що використовуються під час теплопередачі.
- 10.4.5. Яким чином визначаються коефіцієнти та показники ступенів в критеріальних рівняннях.

РОБОТА № 11. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ МАСОПЕРЕДАЧІ В ПЛІВКОВОМУ АБСОРБЕРІ

Плівкові абсорбери знаходять застосування у промисловості для поглинання добре розчинних газів та мають невеликий гідравлічний опір.

Процес абсорбції – це вибіркове поглинання об'ємом рідини (розчинення у рідині) певних компонентів із газової або парової суміші. Причиною переходу компонента з однієї фази в іншу(за рівності температур і тисків у контактуючих фазах є різниця хімічних потенціалів, визначених по газовій або рідкій фазі. Компонент переходить із фази з більшим значенням хімічного потенціалу у фазу з меншим його значенням. У технічних розрахунках користуються не хімічними потенціал, а величинами, що легше визначаються – концентраціями.

11.1 Теоретичне обґрунтування роботи

Система впродовж процесу абсорбції має рідку (вода) і газову (повітря) фази та компонент, який переходить із газової в рідку фазу (аміак). Концентрацію аміаку в газовій фазі часто наводять у вигляді парціального тиску аміаку (P , Па), а концентрацію аміаку в рідкій фазі – об'ємної концентрації (C , кг/м³). Отже, основні рівняння масопередачі у процесі абсорбції мають такий вигляд:

$$Q = K_p \cdot S \cdot \Delta P, \quad (11.1)$$

$$G = K_c \cdot S \cdot \Delta C, \quad (11.2)$$

де G – кількість аміаку, що переходить із фази в фазу, кг/с;

S – поверхня масо передавання чі, м²;

K_p – коефіцієнт масопередачі, кг/(м²·с·Па);

K_c – коефіцієнт масопередачі, м/с;

ΔP – рушійна сила процесу абсорбції, Па;

ΔC – рушійна сила процесу абсорбції, кг/м³.

У розрахунках абсорберів часто рушійну силу виражають у одиницях тиску. Із рис.11.1 видно, що рушійна сила, наприклад для точки 1, є

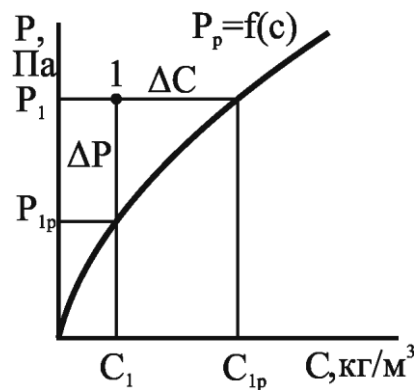


Рис. 11.1 – Рушійна сила процесу абсорбції

$$\Delta P = P_1 - P_p, \quad (11.3)$$

або

$$\Delta C = C_p - C_1, \quad (11.4)$$

де P_p та C_p характеризують парціальний тиск аміаку в газі та його концентрацію в рідині в стані рівноваги.

Коефіцієнти масопередачі (загальні коефіцієнти масопередачі) в рівняннях (11.1) та (11.2) виражаються через коефіцієнти масовіддачі (окремі коефіцієнти масопередачі):

$$K_p = \frac{1}{\left[\frac{1}{\beta_p} + \frac{1}{\varphi \cdot \beta_c} \right]}, \quad (11.5)$$

$$K_c = \frac{1}{\left[\frac{1}{\beta_p} + \frac{\varphi}{\beta_c} \right]}, \quad (11.6)$$

де β_p – коефіцієнт масовіддачі для газової плівки, кг/(м²·с·Па);

β_c – коефіцієнт масовіддачі для рідкої плівки, м/с;

φ – константа фазової рівноваги, (Па·м³)/кг.

Аміак добре розчинний газ, тому основний опір масопередачі спостерігається в газовій плівці. При цьому $\beta_c \gg (\beta_p/\varphi)$, а $1/\beta_p \gg 1(\varphi/\beta_c)$ і рівняння (11.5) спрощується:

$$K_p = \beta_p, \quad (11.7)$$

тобто для легко розчинних газів слід використовувати рівняння (11.1), приймаючи, що коефіцієнт масопередачі дорівнює коефіцієнту масовіддачі в газовій фазі.

Для всього апарату середня рушійна сила визначається за рівнянням

$$\Delta P_{cp} = \frac{(P_1 - P_{p2}) - (P_2 - P_{p1})}{\ln \frac{P_1 - P_{p2}}{P_2 - P_{p1}}} \quad (11.8)$$

де P_1, P_2 – парціальний тиск аміаку в газі, який поступає до абсорбера, та який виходить з абсорбера, Па;

P_{p1}, P_{p2} – пружність пари аміаку над розчином, який поступає до абсорбера та який виходить з абсорбера, Па.

Під час поглинання аміаку водою величини P_1 та P_2 значно більші ніж величини P_{p1} та P_{p2} . Тому приймається, що приблизно $P_{p1} = 0$ та $P_{p2} = 0$ і рівняння (11.8) спрощується і набуває вигляду

$$\Delta P_{cp} = \frac{(P_1 - P_2)}{\ln \frac{P_1}{P_2}} \quad (11.9)$$

Парціальний тиск компоненту в газовій суміші залежить від його концентрації в газовій фазі

$$P_1 = \frac{22,4 \cdot a_1 \cdot P}{M}, \quad (11.10)$$

$$P_2 = \frac{22,4 \cdot a_2 \cdot P}{M}, \quad (11.11)$$

де P – загальний тиск у абсорбері, Па;

M – молекулярна маса аміаку, кг/кмоль;

a_1, a_2 – концентрація аміаку в газовій фазі на вході та на виході з апарату, кг/м³.

Таким чином середня рушійна сила з урахуванням рівнянь (11.10) та (11.11):

$$\Delta P_{cp} = \frac{22,4 \cdot P \cdot (a_1 - a_2)}{\ln \frac{a_1}{a_2} \cdot M} \quad (11.12)$$

Кількість аміаку, що поглинається у процесі абсорбції

$$G = V_r \cdot (a_1 - a_2) \quad (11.13)$$

де V_r – об'єм газової фази, що проходить під час абсорбції через апарат, м³/с.

З урахуванням рівняння (11.12), (11.13) молекулярної маси аміаку ($M = 17$), а $\ln \frac{a_1}{a_2} = 2,3 \cdot \lg \frac{a_1}{a_2}$, то коефіцієнт масопередачі із рівняння (11.1) встановлюється

$$K_p = \beta_p = \frac{G}{S \cdot \Delta P_{cp}} = 1,75 \cdot \frac{V_r}{P \cdot S} \cdot \lg \frac{a_1}{a_2} \quad (11.14)$$

Таким чином, для визначення K_p необхідно експериментально встановити величини V_r , P , S , a_1 , a_2 .

Мета роботи: визначення коефіцієнтів масопередачі під час абсорбції аміаку водою у плівковому апараті з падаючою плівкою води.

11.2 Експериментальна установка та проведення дослідів

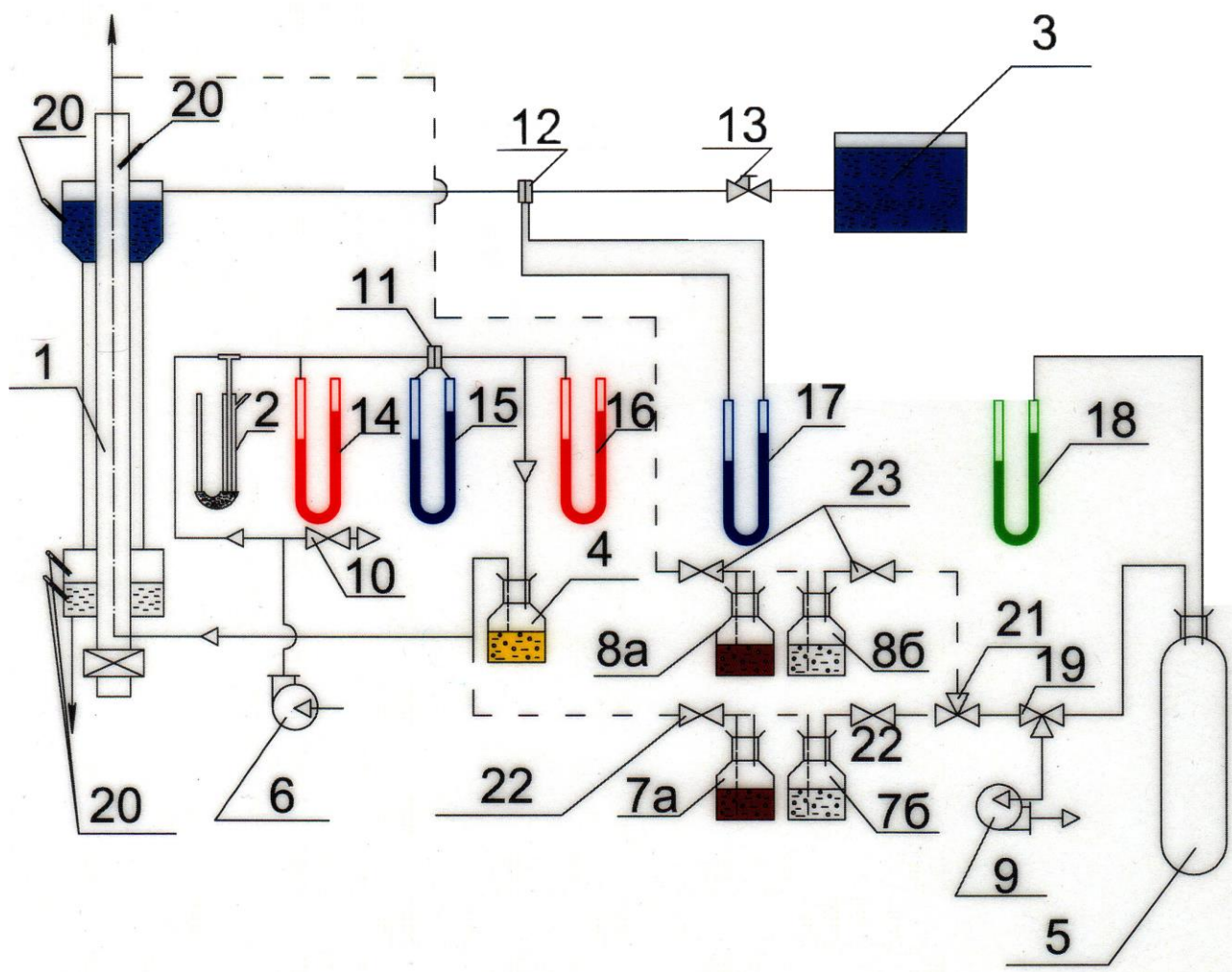
Схема експериментальної установки представлена на рис. 11.2. Основним елементом її є плівковий абсорбер 1 в вигляді скляної труби, яка зверху зрошується водою. Вода утворює плівку на внутрішній поверхні труби і збігає вниз. Повітря газодувкою 6 подається в посудину 4 з аміачною водою, де воно насичується аміаком. Аміачно-повітряна суміш попадає в низ абсорбера. Витрати суміші встановлюються вентилям 10 або підйомом чи опусканням лівого коліна баростата 2. Витрати повітря підтримуються такими, щоб в правому коліні баростата весь час виходив надлишок повітря. Це забезпечує постійні витрати повітря в абсорбері. Вимірюють витрати повітря за допомогою діафрагми 11 і дифманометра 15, а його тиск перед діафрагмою – манометром 14. Температура рідини та газу вимірюється термометрами 20.

Порядок виконання роботи.

В дві посудини Дрекселя (7а, 7б) вливають із бюретки по 25 мл 0.1N розчину H_2SO_4 , а в посудини (8а, 8б) – по 10 мл 0.1N розчину H_2SO_4 . В кожную посудину додають по 2...3 краплини індикатору (метилоранж) та доливають дистильовану воду так, щоб барботаажні трубки були занурені в рідину на 2...3 см.

Відкривають вентиль води 13 та встановлюють задану керівником заняття витрату води по дифманометру 17.

Вмикають газодувку, встановлюють задану керівником заняття витрату повітря з допомогою вентиля 10 та дифманометра 15.



1 – абсорбер; 2 – баростат; 3 – ємкість води; 4 – посудина з аміачною водою; 5 – балон; 6 – газодувка; 7,8 – посудини Дрекслея; 9 – вакуумний насос; 10, 13, 22, 23 – вентиля; 11, 12 – діафрагми; 14, 16 – манометри; 15, 17 – дифманометри; 18 – вакуумметр; 19 – триходовий кран; 20 – термометри; 21 – перемикач

Рис. 11.2 – Схема установки для дослідження процесу абсорбції амоніаку водою

Триходовим краном 19 підключаються до вакуумної системи і з допомогою вакуум-насоса 9 в балоні 5 створюють розрядження 400...500 мм ртутного стовпчика (за вакуумметром 18), за яким слідкують у процесі проводження досліду. Записують показ вакуумметра.

Триходовим краном 19 підключаються до вимірювальної системи. Після досягнення стаціонарного режиму роботи установки починають відбір проб газу на вході та виході абсорберу.

Вентиліями 21 та 22 підключають посудини 7а, 7б до балону 5. Після того, як в посудині 7а рідина змінить колір на жовтий, вентиля 21 та 22 закривають та записують покази вакуумметра 18 (розрядження).

Вентиліями 21 та 23 підключають посудини 8а, 8б до балона 5. Після того, як в посудині 8а рідина змінить колір на жовтий, вентиля 21 та 23 закривають та записують покази вакуумметра 18. Якщо вакуум в балоні недостатній, необхідно його збільшити.

Після закриття вентилів 21 та 23, рідину із посудин 7а, 7б зливають в одну конічну колбу, а рідину із посудин 8а, 8б – в іншу. Розчини в колбах титрують 0.1N розчином NaOH до бурого кольору.

Результати експериментів заносять до табл. 11.1.

Таблиця 11.1 – Експериментальні дані

№ п/п	Перепад на диф. 15, мм	Розрядження, мм рт. ст.		Перепад на диф. 17, мм	Тиск ман. 14, мм	Тиск ман. 16, мм	Температура газу, °С		Температура води, °С		Кількість NaOH на титрування, мл	
		вхід	вихід				вхід	вихід	вхід	вихід	вхід V _{ш1}	вихід V _{ш2}

11.3 Оброблення результатів експериментів

11.3.1 Встановлюють об'єм газу, який пройшов через посудини 7 та 8 під час абсорбції

$$V_{\Gamma}^{\text{ВХ(ВИХ)}} = V_{\text{бал.}} \cdot (P_{\text{п}} - P_{\text{к}}) \cdot \frac{T_0}{T \cdot P_0} \quad (11.15)$$

де $V_{\Gamma}^{\text{ВХ(ВИХ)}}$ – об'єм газу, який пройшов через посудини 7 або 8, м³;

$V_{\text{бал.}}$ – об'єм балона, 0,036 м³;

$P_{\text{п}}$ – початкове розрядження, Па;

$P_{\text{к}}$ – кінцеве розрядження, Па;

P_0 – нормальний тиск, $1.013 \cdot 10^5$ Па;

T_0 – нормальна температура, 273 К;

T – середня температура газу в процесі проведення абсорбції, К;

11.3.2 За результатами титрування встановлюють концентрації аміаку в газі

$$a_1 = 17 \cdot \frac{(50 - V_{\text{ш1}})}{V_{\Gamma}^{\text{ВХ}}}, \quad (11.16)$$

$$a_2 = 17 \cdot \frac{(20 - V_{\text{ш2}})}{V_{\Gamma}^{\text{ВИХ}}}, \quad (11.17)$$

де 50, 20 – кількість кислоти в посудинах 7 та 8, мл;

$V_{\text{ш1}}$, $V_{\text{ш2}}$ – кількість розчину NaOH, яка пішла на титрування, мл.

11.3.3 Визначають поверхню масопередачі

$$S = \pi \cdot d \cdot l, \quad (11.18)$$

де d – внутрішній діаметр абсорбера, який дорівнює $16,2 \cdot 10^{-3}$ м;

l – висота апарата, яка дорівнює 0,6760 м.

11.3.4 Переводять об'єм газу, який пройшов через діафрагму, до нормальних умов

$$V_{\Gamma}^{\text{н.у.}} = V_{\text{п.}} \cdot \frac{P \cdot T_0}{T \cdot P_0}, \quad (11.19)$$

де P – тиск повітря перед діафрагмою, Па:

$P = P_{\text{бар.}} + P_{\text{д.}}$, где $P_{\text{д.}}$ – тиск, який визначається за манометром 14, Па;

$V_{\text{п.}}$ – об'єм повітря, який встановлюється за тарувальним графіком $V_{\text{п.}} = f(\sqrt{\Delta P_{\text{д.}}})$, а

$\Delta P_{\text{д.}}$ – перепад на дифманометрі 15.

11.3.5 Визначають коефіцієнт масопередачі за рівнянням (11.14), де загальний тиск:

$$P = P_{\text{бар.}} + P_{\text{к}}, \quad (11.20)$$

де $P = P_{\text{бар.}} + P_{\text{к}}$ – тиск за манометром 16, Па.

Розрахункові дані зводять до таблиці 11.2.

Таблиця 11.2 – Розрахункові дані

№ п/п	Витрати води, м ³ /с	Об'єм газу на вході $V_{\Gamma}^{\text{вх}}$, м ³	Об'єм газу на виході $V_{\Gamma}^{\text{вих}}$, м ³	Витрати повітря $V_{\Gamma}^{\text{н.у.}}$, м ³ /с	Концентрація аміаку		Загальний тиск Р, Па	Коефіцієнт масопередачі
					a_1	a_2		

11.4 Контрольні питання

- 11.4.1. Опишіть та пояснить основне рівняння масопередачі, його форми.
- 11.4.2. Охарактеризуйте рушійну силу процесу абсорбції.
- 11.4.3. Охарактеризуйте коефіцієнти масопередачі та масовіддачі, їх зв'язок.
- 11.4.4. Назвіть відомі вам типи абсорбційних апаратів.
- 11.4.5. Назвіть критерії подібності, що використовуються під час теплопередачі.

РОБОТА № 13. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В РЕАКТОРІ ЄМКІСНОГО ТИПУ

Реактори ємкісного типу з пристроями для перемішування широко застосовуються в хімічній, нафтопереробній, харчовій та суміжних галузях промисловості.

Використання пристроїв для перемішування лопатевого, пропелерного, турбінного та інших типів поряд з необхідним ступенем гомогенізації фаз дозволяє досягати хорошої теплопередачі через стінку реактора.

В цій роботі рідина, яка знаходиться в реакторі, нагрівається гарячим маслом через оболонку реактора.

13.1 Теоретичні основи процесу

Основне рівняння теплопередачі для нестационарного процесу теплообміну записується у вигляді

$$Q = K \cdot S \cdot \Delta T_{\text{ср}}^{\text{нестаци}} \cdot \tau, \quad (13.1)$$

де Q – кількість тепла, яка передається через поверхню теплопередачі, Вт;

K – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К);

S – площа поверхні теплопередачі, м²;

$\Delta T_{\text{ср}}^{\text{нестаци}}$ – середня рушійна сила нестационарного процесу нагрівання у реакторі, К;

τ – час, за який нагрівається рідина, с.

Кількість тепла Q визначається

$$Q = G_p \cdot C_p \cdot (T_p^{\text{кін}} - T_p^{\text{поч}}), \quad (13.2)$$

де G_p – кількість рідини, яка знаходиться в реакторі, кг;

C_p – теплоємність рідини (суміш гліцерину та води), Дж/(кг·К);

$T_p^{\text{поч}}$, $T_p^{\text{кін}}$ – температура рідини в реакторі на початку та в кінці процесу нагрівання, °С.

Середня різниця температур для нестационарного процесу визначається

$$\Delta T_{\text{ср}}^{\text{нестаци}} = \frac{T_p^{\text{кін}} - T_p^{\text{поч}}}{\ln \frac{T_1 - T_p^{\text{поч}}}{T_2 - T_p^{\text{кін}}}} \cdot \frac{A - 1}{\ln A} \quad (13.3)$$

де T_1, T_2 – температура масла на вході та на виході в оболонку реактора (температура T_1 залишається постійною, а T_2 змінюється з часом τ), °C;

A – постійна величина для процесу нестационарного теплообміну

$$A = \frac{T_1 - T_p^{\text{кін}}}{T_2 - T_p^{\text{поч.}}} \quad (13.4)$$

Коефіцієнт теплопередачі через поверхню сорочки для нестационарних умов із рівняння (13.1) з урахуванням рівняння (13.2)

$$K = \frac{G_p \cdot C_p \cdot (T_p^{\text{кін}} - T_p^{\text{поч.}})}{S \cdot \Delta T_{\text{ср}}^{\text{нестаци.}} \cdot \tau} \quad (13.5)$$

Витрати масла в кожному досліді (за нестационарних умов):

$$G_M^{\text{нестаци.}} = \frac{Q}{C_M \cdot (T_1 - T_2)}, \quad (13.6)$$

де C_M – теплоємність масла, Дж/(кг·К).

Якщо в реакторі досягнуті стаціонарні умови, то температура в реакторі буде залишатися постійною ($T_p = T_p^{\text{кін}} = T_p^{\text{поч.}}$), постійною буде температура T_2 і все тепло, яке підводиться маслом, піде на компенсацію теплових втрат.

Для стаціонарних умов коефіцієнт теплопередачі встановлюється через теплові втрати Q_v

$$K_{\text{стаци.}} = \frac{Q_v}{S \cdot \Delta T_{\text{ср}}^{\text{стаци.}}} \quad (13.7)$$

де

$$Q_v = G_M \cdot C_M \cdot (T_1 - T_2) \quad (13.8)$$

де G_M – витрати масла (за стаціонарних умов), кг/с;

$\Delta T_{\text{ср}}^{\text{стаци.}}$ – середня різниця температур, К.

Середня різниця температур за стаціонарних умов

$$\Delta T_{\text{ср}}^{\text{стаци.}} = \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{T_1 - T_p}{T_2 - T_p}}, \quad (13.9)$$

де T_p – температура в реакторі, °C.

Величину теплових втрат можна визначити за рівнянням

$$Q_v = \alpha \cdot F \cdot (T_{\text{ст}} - T_{\text{пов}}), \quad (13.10)$$

де F – площа неізольованої поверхні, м²;

$T_{\text{ст}}$ – температура неізольованої стінки, °C;

$T_{\text{пов}}$ – температура навколишнього повітря, °C;

α – сумарний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією та випромінюванням в навколишнє середовище, Вт/(м²·К).

Коефіцієнт α визначається за співвідношенням

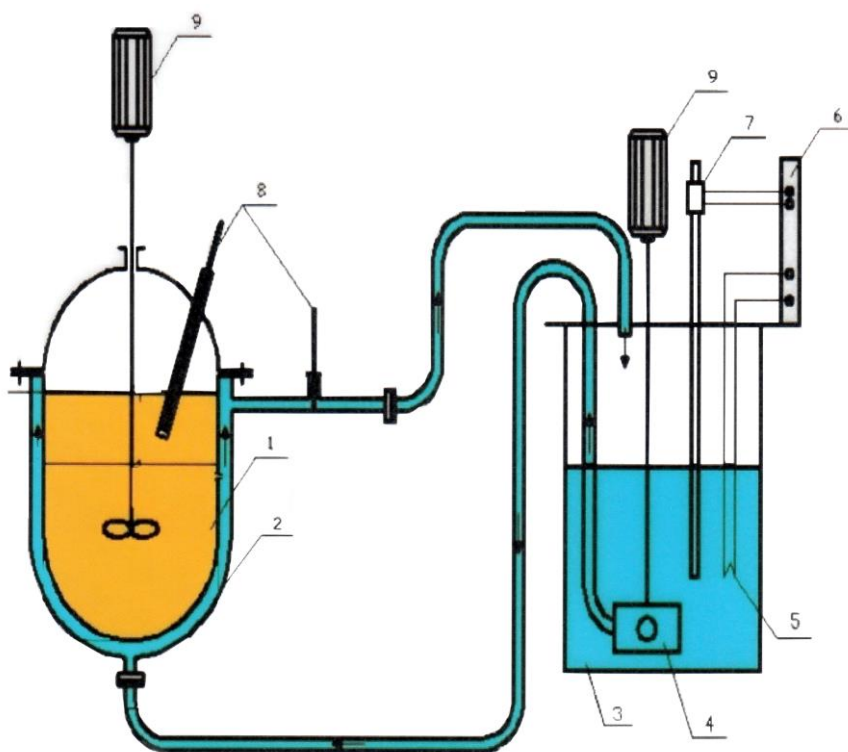
$$\alpha = 9,74 + 0,07 \cdot (T_{\text{ст}} - T_{\text{пов}}). \quad (13.11)$$

Мета роботи: експериментальне визначення коефіцієнта теплопередачі від гарячого масла до суміші через оболонку реактора; встановлення втрат тепла від зовнішньої поверхні апарата; встановлення витрат гарячого теплоносія, який подається в оболонку реактора.

13.2 Схема експериментальної установки та методика проведення дослідів

Робота виконується на моделі реактора об'ємного типу, який має пропелерну мішалку з чотирма лопатями. Схема установки наведена на рис. 13.1.

Реактор заповнено сумішшю гліцерину з водою, у якій вміст гліцерину складає 50 % (мас), кількість суміші – $(2,25...2,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Гарячий теплоносій (масло) підігрівається в термостаті 3. Температура масла встановлюється за контактним термометром 7 і підтримується системою регулювання 6. Насосом 4 масло подається в оболонку 2 реактора. Термометрами 8 вимірюється температура масла та суміші в реакторі.



1 – реактор з мішалкою; 2 – оболонка реактора; 3 – термостат; 4 – насос; 5 – електронагрівач; 6 – регулятор температури і блок управління; 7 – контактний термометр; 8 – термометри; 9 – електродвигун; 10 – вентиль

Рис. 13.1 – Схема установки для дослідження теплообміну в реакторі

Порядок виконання експерименту.

13.3.1 Встановити задану керівником температуру масла на контактному термометрі.

13.3.2 Закрити вентиль 10 так, щоб масло не потрапляло в оболонку реактора.

13.3.3 Вмикнути електронагрівачі термостата.

13.3.4 Коли в термостаті температура досягне заданої величини, відкрити вентиль 10 і починати відраховувати час.

13.3.5 Записувати температури масла та рідини через кожні 5 хвилин до встановлення стаціонарних умов (температури рідини в реакторі та масла на виході із оболонки більше не змінюються).

13.3.6 Після встановлення стаціонарних умов вмикнути мішалку і записати температуру через 5 хвилин.

Дані експериментів та розрахунків заносять до табл. 13.1.

Таблиця 13.1 – Результати експериментів

№ п/п	Час, с	Температура, °С			
		Масло		Суміш	
		T ₁	T ₂	T _р ^{поч.}	T _р ^{кін.}

13.3 Порядок виконання розрахунків

13.3.1 Густина суміші в реакторі підраховується за рівнянням

$$\rho_{\text{сум}} = \frac{100}{\frac{X_1}{\rho_1} + \frac{X_2}{\rho_2}}, \quad (13.12)$$

де X₁, X₂ – масові долі гліцерину та води, %;

ρ₁, ρ₂ – густина гліцерину та води, кг/м³.

13.3.2 Теплоємність суміші у реакторі

$$C_p = C_1 \cdot X_1 + C_2 \cdot X_2, \quad (13.13)$$

де C₁, C₂ – теплоємності гліцерину та води, Дж/(кг·К).

13.3.3 Визначають кількість тепла Q за рівнянням (13.2).

13.3.4 Знаходять кількість рідини у реакторі за основних розмірів реактору

$$\begin{aligned} D &= 165 \text{ мм}; & d &= 142 \text{ мм}; \\ H &= 190 \text{ мм}; & h_2 &= 145 \text{ мм}; \\ h_1 &= 55 \text{ мм}; & d &= 60 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Примітка. Величину F встановлюють як поверхню напівсфери з діаметром D.

13.3.5 Розраховують коефіцієнт теплопередачі для нестационарних умов.

13.3.6 За середньою температурою визначають витрати масла.

13.3.7 Встановлюють теплові втрати Q_в в стаціонарних умовах.

13.3.8 Розраховують коефіцієнт теплопередачі для стаціонарних умов.

13.3.9 Встановлюють втрати тепла від зовнішньої поверхні апарата.

Результати розрахунків заносять до табл. 13.2.

Таблиця 13.2 – Результати розрахунків

№ п/п	C _р , Дж/(кг·К)	Q, Вт	A	ΔT _{ср} ^{нестац} , °С	K, Вт/(м ² ·К)	α, Вт/(м ² ·К)	Q _в , Вт	G _м ^{нестац} , кг/с

13.4 Контрольні питання

13.4.1 Охарактеризуйте процеси теплопередачі в стаціонарних і нестационарних умовах.

13.4.2 Дайте визначення коефіцієнтам масопередачі та масовіддачі.

13.4.3 Назвіть типи перемішувачів пристроїв.

13.4.4 Визначте як впливає перемішування на процес теплопередачі в реакторі.

13.4.5 Вкажіть необхідність ізоляції апаратів.

РОБОТА №19. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РЕКТИФІКАЦІЇ БІНАРНОЇ СУМІШІ

Ректифікація – розділення рідких однорідних летючих сумішей на компоненти чи групи компонентів (фракції) в процесі багаторазового двостороннього масо- та теплообміні між паровим та рідинним потоками, які рухаються протилежно.

19.1 Теоретичні відомості

Під час взаємодії фаз в процесі ректифікації відбувається дифузія легколетючого компоненту (спирту) із рідини в пару, а важколетючого (води) – із пари в рідину. В процесі ректифікації вихідна суміш, наприклад із двох компонентів А+В, поділяється на дві частини: частину, яка збагачена легко летючим компонентом А (дистиллят), і частину, в якій легколетючого компонента мало (кубова рідина).

Концентрація компоненту А (спирту) в рідкій суміші компонентів А+В встановлюється в мольних або масових долях:

– мольний склад (мольна доля) – відношення числа молей компоненту А до суми молей компонентів А та В

$$X = \frac{\text{кмоль } A}{\text{кмоль } (A + B)} \quad (19.1)$$

– масовий склад (масова доля) – відношення маси компоненту А до маси суміші А та В

$$\bar{X} = \frac{\text{кг } A}{\text{кг } (A + B)} \quad (19.2)$$

Аналогічно визначається концентрація легколетючого компоненту в паровій фазі Y та \bar{Y} . В промисловості використовують об'ємну концентрацію в об'ємних долях або відсотках

$$c = \frac{V_a}{V_a + V_b}, \quad (19.3)$$

де V_a , V_b – об'єми компонентів А та В до утворення суміші спирт + вода.

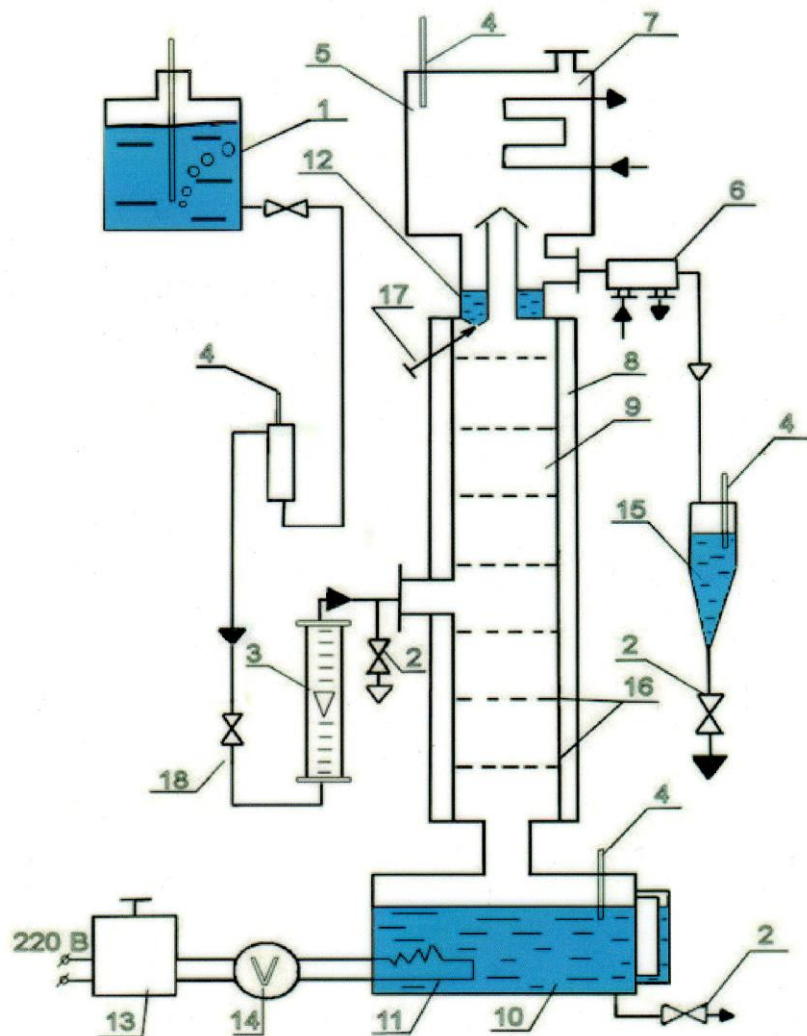
Примітка. Так суміш спирт – вода під назвою "горілка" має: $c = 40$ % об., $\bar{X} = 33.33$ % мас., $X = 16.36$ % (моль); густина рідини $\rho_{20} = 948,0$ кг/м³. Ця суміш кипить за температурою 84,12 °С.

Мета роботи: ознайомлення з методом встановлення кількості контактних тарілок та їх ККД в ході проведення процесу ректифікації

19.2 Опис експериментальної установки та методика проведення експерименту

Схема установки надана на рис. 19.1 і складається з колони 9 з провальними тарілками 16, внутрішній діаметр якої 38 мм. Діаметр отворів тарілок 3,5 мм, а живий перетин тарілки складає 18 %.

З верхньої тарілки колони пари з високим вмістом спирту надходять в конденсатор (дефлегматор) 5, де відбувається повне конденсування. Конденсат, який утворюється, збирається в нижній частині дефлегматора 12, а потім поділяється на два потоки: один з них проходить через холодильник 6 в збірник дистилляту 15, а другий повертається в колону на верхню тарілку який називають флегмою. Співвідношення потоків регулюється вентилем 17 так, щоб витрати флегми становили 1,9 л/год. Охолодження парів в дефлегматорі проводиться за допомогою холодильника 7, до якого поступає охолоджуюча вода.



1 – напірна ємкість; 2 – відбірники проб; 3 – ротаметр; 4 – термометри; 5 – дефлегматор; 8 – оболонка; 9 – колона; 10 – куб-випарник; 11 – електронагрівник; 12 – збірник рідини дефлегматора; 13 – автотрансформатор; 14 – вольтметр; 15 – збірник дистилляту; 16 – тарілки; 17, 18 – вентилі

Рис. 19.1 – Схема установки для дослідження процесу ректифікації

На одну із тарілок в середній частині колони поступає вихідна суміш спирту з водою. Витрати суміші, що подається із напірної ємкості 1, встановлюється за ротаметром 3 вентилем 18. Рідина, що стікає з нижньої тарілки має малий вміст спирту. Вона зливається в куб-випарник, де частково перетворюється в пару, яка повертається в колону. Куб має електронагрівник 11, потужність якого регулюється автотрансформатором 13 і контролюється вольтметром 14. Температура вихідної суміші, кубової рідини та парів в дефлегматорі контролюється термометрами 4. Вміст спирту в пробах встановлюється з допомогою рефрактометра за показниками заломлення.

Проведення дослідів.

19.2.1 Перед пуском установки перш за все подають воду в холодильник дефлегматора.

19.2.2 Встановлюють рівні рідини у кубі та у напірній ємкості на початку експерименту.

19.2.3 В напірну ємкість 1 заливають біля 5 літрів вихідної суміші.

19.2.4 За допомогою рефрактометра встановлюють показник заломлення в пробах вихідної і кубової рідини. Для цього витирають насухо площини камер рефрактометра, які

стикаються. На поверхню вимірювальної призми паличкою або піпеткою наносять одну-дві краплини суміші. Стискають камери рефрактометра і спостерігають в окулярі межу світлотіні, з якою суміщують візирну лінію і відраховують за шкалою показник заломлення. Якщо забарвлення світлотіні розмито, то освітлювачем добиваються кращої контрастності поля зору.

19.2.5 За отриманим значенням показника заломлення встановлюють концентрацію спирту у суміші за допомогою тарувального графіку. Якщо вимірювання проводять за температури, яка відрізняється від 20 °С, то необхідно провести перерахунок показів на 20 °С згідно інструкції до приладу. Після кожного вимірювання необхідно промивати дистильованою водою та витерти насухо площини верхньої та нижньої камер рефрактометра.

19.2.6 За скляним рівнеміром встановлюють кількість рідини в кубі. Якщо рідини мало, куб доповнюють дистильованою водою, якщо забагато, то навпаки зливають зайву частину кубової рідини.

19.2.7 Вмикають електронагрівач куба, встановлюють на вольтметрі напругу струму спочатку 220 В, а потім за температури в кубі біля 100 °С напругу зменшують до 170 В.

19.2.8 Після того, як почнеться конденсація пари в дефлегматорі, у колону вентиляем 18 подають вихідну суміш, встановлюючи задані витрати суміші.

В момент коли в збірнику дистилату з'являться перші краплі рідини, починається вихід колони в сталий режим. Під час стаціонарного режиму витримують усі параметри роботи установки протягом 5...10 хвилин, після чого зливають отриманий дистилат із збірника 15 в мірну посудину, визначаючи об'єм отриманого дистилату, його температуру і показник заломлення.

19.2.9 Потім встановлюють інші задані керівником витрати вихідної суміші і починають відраховувати час експерименту (5...10 хвилин за вказівками викладача). Витримують усі параметри роботи установки.

19.2.10 Після закінчення вимірювань вмикають електронагрівач куба, закривають подачу вихідної суміші і охолоджуючої води.

19.2.11 Встановлюють рівні рідини у кубі та у напірній ємкості в кінці експерименту. Кількість рідини в кубі збільшується, а в напірній ємкості – зменшується. Збільшення об'єму рідини в кубі встановлюється за різницею рівнів у скляному рівнемірі та виходячи з того, що зовнішні стінки кубу мають розміри 200×200 мм, товщина стінки 3 мм. Зменшення рідини в напірній ємкості встановлюється за тарувальним графіком впродовж всього часу проведення експериментів.

19.2.12 За показниками заломлення встановлюють масові концентрації спирту в пробах: вихідної суміші \bar{X}_f , кубової рідини \bar{X}_w , дистилату \bar{X}_d .

Результати експерименту заносять до таблиці 19.1.

Таблиця 19.1 – Результати експерименту

Номер досліджу	Тривалість досліджу τ , с	Вихідна суміш					Дистилат				Кубова рідина		
		Покази рогаметра n	Витрати V , м ³ /год	Показ. заломлення λ	Концентрація, %	Температура, °С	Показ. заломлення λ	Концентрація, %	Кількість V , м ³	Температура, °С	Показ. заломлення λ	Концентрація, %	Температура, °С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

19.3 Оброблення результатів експерименту

19.3.1 За концентраціями проб встановлюють густину вихідної суміші \bar{X}_f , кубової рідини \bar{X}_w , дистилляту \bar{X}_d . (Справочник химика. Т. 3 /Под ред. Б.П. Никольского.– М., Л.: Химия.– 1966.–1008 с. (стр. 551-574)).

19.3.2 Перераховують концентрації проб в мольні долі X_f, X_w, X_d .

19.3.3 Встановлюють масові витрати вихідної суміші M_f , дистилляту M_d , кубової рідини M_w :

$$M = \frac{V \cdot \rho}{\tau} \quad (19.4)$$

19.3.4 Перераховують масові витрати у відповідні мольні G_f, G_d, G_w :

$$G_f = \frac{M_f}{[X_f \cdot 46 + (100 - X_f) \cdot 18]}, \quad (19.5)$$

$$G_d = \frac{M_d}{[X_d \cdot 46 + (100 - X_d) \cdot 18]}, \quad (19.6)$$

$$G_w = \frac{M_w}{[X_w \cdot 46 + (100 - X_w) \cdot 18]}. \quad (19.7)$$

19.3.5 Із рівняння матеріального балансу колони знаходять G_w , кмоль:

$$G_w = G_f - G_d. \quad (19.8)$$

19.3.6 Із рівняння матеріального балансу колони по легколетучому компоненту знаходять X_w , %(мол.)

$$G_w \cdot X_w = G_f \cdot X_f - G_d \cdot X_d. \quad (19.9)$$

19.3.7 Значення G_w (п.5) та X_w (п.6) порівнюють з тими, які знайдено експериментально. У разі значного розбігу даних експеримент слід повторити. Якщо значення сходяться, то результати розрахунків заносять до табл. 19.2 і переходять до визначання кількості ступенів зміни концентрації.

Таблиця 19.2 – Результати розрахунків

Вихідна суміш			Дистиллят			Кубова рідина		
ρ_f , кг/м ³	M_f , кг/с	G_f , кмоль/с	ρ_d , кг/м ³	M_d , кг/с	G_d , кмоль/с	ρ_w , кг/м ³	M_w , кг/с	G_w , кмоль/с

19.3.8 Будують x,y-діаграму (в мольних частках) для системи етиловий спирт – вода (див. табл. 19.3), на якій наносять допоміжну діагональ $Y = X$ з координатами від точки (0;0) до точки з координатами (1;1) – рис. 19.2.

19.3.9 Наносимо рівноважні значення x та відповідні їм значення y в мольних частках на діаграму. В результаті отримаємо точки, які з'єднуємо з отриманням рівноважної кривої для системи етиловий спирт – вода (рис. 19.2).

19.3.10 На x,y-діаграмі на осі ox позначають мольні частки вихідної суміші X_f , дистилляту X_d , кубової рідини X_w і проводять вертикальні лінії паралельно осі oy . Таким

чином знаходять точку А і В, абсциси яких відповідають X_d і X_w , а ординати визначаються належністю допоміжній діагоналі (рис. 19.2).

Таблиця 19.3 – Рівноважні масові частки рідини (x, %) і пари (y, %) і температури кипіння (t, °C) подвійної суміші етиловий спирт – вода (за 760 мм рт. ст.)

x	0	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	Азеотропна суміш
y	33,2	44,2	53,1	57,6	61,4	65,4	69,9	75,3	81,8	89,8		89,4
t	90,5	86,5	83,2	81,7	80,8		79,4		78,6	78,4	78,4	78,15

19.3.11 Визначають дійсне флегмове число R як відношення витрати флегми (1,9 л/год) до витрат дистилату (визначають за тарувальним графіком).

19.3.12 Робоче флегмове число повинно бути більшим за мінімальне флегмове число, яке визначають з рівняння робочої лінії укріплювальної частини колони за наступним виразом:

$$R_{\min} = \frac{X_d - Y_f^*}{Y_f^* - X_f}, \quad (19.10)$$

де Y_f^* – концентрація в паровій фазі рівноважна з концентрацією вихідної суміші (знаходиться за x,y-діаграмою у разі доведення складу X_f до перетину з рівноважною кривою).

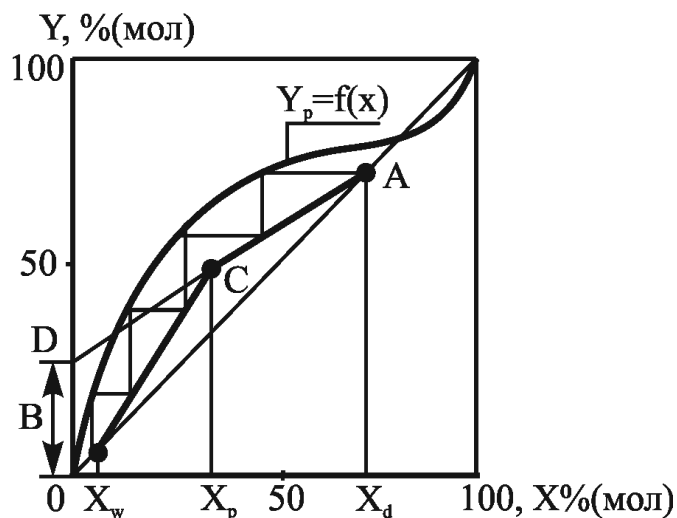


Рис. 19.2 – Визначення кількості ступенів зміни концентрації

19.3.13 За визначеними значеннями R , x_f , x_d , x_w на діаграму рівноваги наносять робочу лінію, яка складається з двох частин:

– для верхньої (зміцнювальної) частини колони (відрізок AC на рис.19.2):

$$Y = \frac{R}{R+1} X + \frac{X_d}{R+1}, \quad (19.11)$$

де $\frac{R}{R+1} = \text{tg} \alpha = A$ – тангенс кута нахилу робочої лінії до осі абсцис;

$\frac{X_d}{R+1} = B = OD$ – відрізок, що відтинається робочою лінією на осі ординат x,y -діаграми.

– для нижньої (вичерпної) частини колони – вичерпної (відрізок CB на рис.19.2)

$$Y = \frac{R+f}{R+1} \cdot X - \frac{1-f}{R+1} \cdot X_w, \quad (19.12)$$

де $\frac{R+f}{R+1} = \operatorname{tg}\alpha' = A'$ – тангенс кута нахилу робочої лінії до осі ординат;

$\frac{1-f}{R+1} = B'$ – відрізок, що відтинає робоча лінія на осі абсцис x,y -діаграми.

Відкладають на осі ординат відрізок OD і сполучають прямий кінець відрізка (точку D) з точкою A . З точки A , що відповідає заданому складу x_f . Проводять вертикаль до перетину з лінією AD , отримуючи точку C . Отже, пряма AC – робоча лінія зміцнювальної частини колони.

З точки, що відповідає заданому складу x_w , проводять вертикаль до перетину з допоміжною діагоналлю діаграми, отримуючи точку B – кінцеву точку робочої лінії вичерпної частини колони. Сполучаємо точки C і B , отримуючи робочу лінію вичерпної частини колони.

Лінія BCA є робоча лінія процесу ректифікації.

19.3.14 Між лінією рівноваги та робочою лінією будують ступені зміни концентрації (рис. 19.2). Кожна ступінь відповідає одній теоретичній тарілці.

Починаючи з точки A , вписують прямокутні трикутники між робочою лінією і лінією рівноваги.

Таку будову проводять в інтервалі між x_D і x_w . Кількість трикутників в інтервалі від x_D до x_w відповідає числу теоретичних тарілок для укріплюючої частини колони, в інтервалі від x_f до x_w – числу тарілок для вичерпної частини.

19.3.15 Розраховують ККД тарілок колони як відношення числа теоретичних ступенів N_T до числа дійсних тарілок N_D :

$$\eta = \frac{N_T}{N_D}. \quad (19.14)$$

19.3.16 Порівнюють розрахункове ККД з довідниковими даними з ККД того типу тарілок, що встановлені у колоні.

19.4 Контрольні питання

19.4.1 Охарактеризуйте роботу ректифікаційної установки.

19.4.2 Опишіть масообмінні процеси, які відбуваються на тарілках колони.

19.4.3 Назвіть типи тарілок, які використовують у ректифікаційних колонах, якими параметрами характеризують тарілки у колоні.

19.4.4 Опишіть зміну положення робочої лінії верхньої частини колони у разі зміни флегмового числа за незмінної концентрації дистилляту; як змінюють флегмове число на практиці.

19.4.5 Поясніть для чого використовують дефлегматор в установці.

РОБОТА №20. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДЕСОРБЦІЇ

Сорбція – поглинання рідиною або твердим тілом рідких або газоподібних речовин із навколишнього середовища. Сорбційним процесам властива селективність (вибірковість) – кожен сорбент здатний поглинати тільки певні речовини і не поглинати інші. Ця властивість сорбентів дозволяє робити поділ сумішей речовин без витрати механічної роботи. Процес відокремлення поглиненого компонента від сорбенту називається десорбцією, тобто виділення з рідини розчиненого в ній компонента.

Використання сорбційних і десорбційних процесів в одній установці при підборі відповідного абсорбенту або адсорбенту дозволяє виділити з газової суміші один з компонентів в чистому вигляді і багато разів використати абсорбент або адсорбент.

20.1 Теоретичні відомості

Система, яка тут вивчається, має дві фази – рідку та газову та компонент, який переходить із однієї фази в іншу. Так, якщо в повітрі, яке знаходиться в кімнаті, є CO_2 , то концентрація CO_2 в повітрі на діаграмі $Y-X$ представляється лінією $Y = Y_1$. Припустимо, що є закрита колба з водою, в якій розчинено CO_2 . Концентрація CO_2 у воді на діаграмі $Y-X$ визначається лінією $X = X_1$. Якщо занести колбу в кімнату і відкрити її, то утворюється система, яка характеризується точкою 1 на рис. 20.1.

Якщо точка 1 лежить над лінією рівноваги (рис. 20.1а), концентрація CO_2 в газовій фазі вище рівноважної, а в рідкій фазі, навпаки, нижче. Тобто CO_2 буде переходити в рідку фазу (відбувається процес абсорбції CO_2).

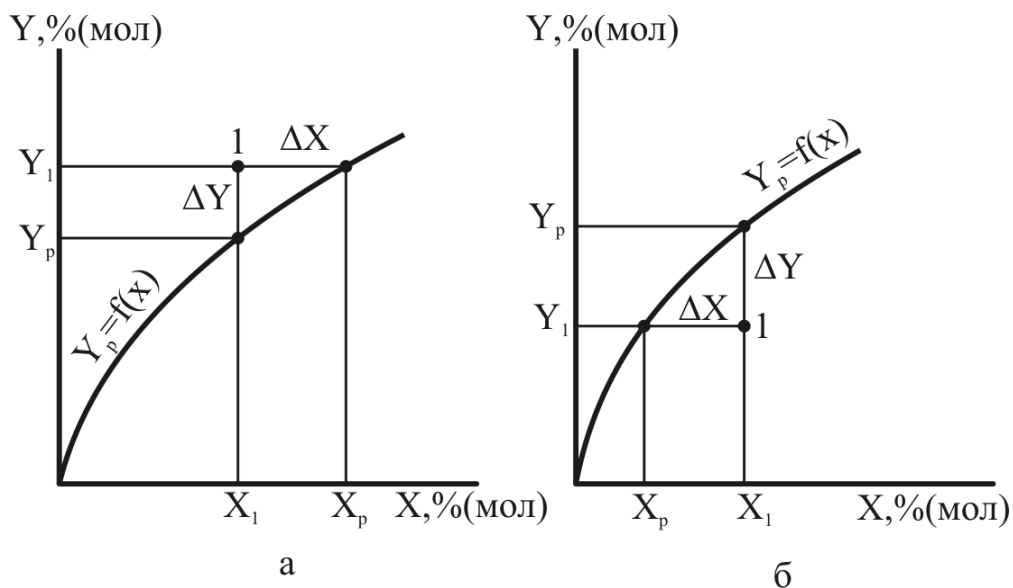
Рушійна сила процесу абсорбції (рис. 20.1а)

$$\Delta X = X_1^p - X_1 \quad (20.1)$$

або

$$\Delta Y = Y_1 - Y_1^p \quad (20.2)$$

Якщо точка 1 лежить під лінією рівноваги (рис. 20.1б), то концентрація CO_2 в газовій фазі нижче рівноважної, а в рідкій фазі, навпаки, вище. Отже, CO_2 буде переходити в газову фазу (відбувається процес десорбції CO_2).



а – абсорбція; б – десорбція

Рис. 20.1 – Визначення рушійної сили процесів сорбції

Рушійна сила процесу десорбції (рис.20.1б)

$$\Delta X = X_1 - X_1^p \quad (20.3)$$

або

$$\Delta Y = Y_1^p - Y_1 \quad (20.4)$$

Загальне рівняння масо передачі процесу десорбції

$$M = K_y \cdot S \cdot \Delta Y \quad (20.5)$$

або

$$M = K_x \cdot S \cdot \Delta X \quad (20.5)$$

де M – кількість CO_2 , що десорбувалася з води, кмоль/с;

S – поверхня масопередачі, м^2 ;

ΔY , ΔX – рушійна сила процесу десорбції, кмоль/кмоль;

K_y , K_x – коефіцієнти масопередачі, $\text{кмоль}/[\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot (\text{кмоль}/\text{кмоль})]$.

Коефіцієнти масопередачі залежать від коефіцієнтів масовіддачі в газовій фазі β_y та в рідкій фазі β_x :

$$K_y = \frac{1}{\left[\frac{1}{\beta_y} + \frac{m}{\beta_x} \right]}, \quad (20.6)$$

$$K_x = \frac{1}{\left[\frac{1}{\beta_x} + \frac{1}{m \cdot \beta_y} \right]}, \quad (20.7)$$

де m – константа фазової рівноваги.

CO_2 – важкорозчинний газ, тому основний дифузійний опір під час переходу його із однієї фази в іншу становить рідинна плівка, тобто $\beta_x \gg \beta_y$ і $\frac{1}{\beta_x} \ll \frac{1}{m \cdot \beta_y}$, а рівняння

(20.7) приймає вигляд

$$K_x = \beta_x, \quad (20.8)$$

а рівняння (20.5) перетворюється

$$M = \beta_x \cdot S \cdot \Delta X. \quad (20.9)$$

Для всього апарата використовують наступний вираз для розрахунку середньої рушійної сили

$$\Delta X_{\text{cp}} = \frac{X_{\text{поч}} - X_{\text{кін}}}{m_x} \quad (20.10)$$

де $X_{\text{поч}}$, $X_{\text{кін}}$ – концентрація CO_2 в рідині на вході в десорбер та на виході з нього;

m_x – число одиниць переносу:

$$m_x = \int_{X_{\text{кін}}}^{X_{\text{поч}}} \frac{dX}{X - X_p}. \quad (20.11)$$

Рівняння (20.9) приймає вид

$$M = \beta_x \cdot S \cdot \Delta X_{\text{cp}}. \quad (20.12)$$

Якщо лінію рівноваги $Y_p = f(X)$ розглядати як пряму, то рівняння (20.10) спрощується і ΔX_{cp} визначається як середнє логарифмічне. В разі десорбції зручніше

концентрацію CO₂ в газовій фазі виражати через парціальний тиск p (Па), а концентрацію CO₂ в рідкій фазі – через об'ємну концентрацію C (кг/м³), тоді рівняння (20.12) перетворюється

$$G = \beta_c \cdot S \cdot \Delta C_{cp}, \quad (20.13)$$

де G – кількість CO₂, яка перейшла із рідини в повітря, кг;

S – площа масопередачі, м²;

ΔC_{cp} – середня рушійна сила, кг/м³;

β_c – коефіцієнт масовіддачі в рідкій фазі, м/с.

Величина G визначається через кількість рідини, яка подається на зрошення L та різницю концентрацій CO₂ в рідині на вході C_{поч} та виході C_{кін} десорбера

$$G = L \cdot (C_{поч} - C_{кін}). \quad (20.14)$$

Із-за труднощів визначення площі поверхні масопередачі S газорідинного шару замість неї в рівнянні (20.13) використовують площу живого перетину тарілки F.

Середня рушійна сила десорбції CO₂ визначається

$$\Delta C_{cp} = \frac{C_{поч} - C_{кін}}{\ln \frac{C_{поч} - C_p}{C_{кін} - C_p}}, \quad (20.15)$$

де C_p – концентрація CO₂ у воді на межі розподілу фаз, рівноважна за наявності CO₂ в повітрі.

В даній системі рівновага між газом і рідиною підкоряється закону Генрі. Величина C_p, що розраховується за законом Генрі, мізерно мала в порівнянні зі значенням C_{поч} та C_{кін}, тому нею в розрахунках нехтують.

На основі рівнянь (20.13), (20.14), (20.15) коефіцієнт масопередачі (масовіддачі) визначається

$$K_c = \beta_c = \frac{L}{F} \ln \frac{C_{поч}}{C_{кін}}. \quad (20.16)$$

ККД тарілки (чи її поглинаюча здібність) визначається

$$\eta = \frac{C_{поч} - C_{кін}}{C_{поч} - C_p}, \quad (20.17)$$

нехтуючи величиною C_p, отримаємо

$$\eta = \frac{C_{поч} - C_{кін}}{C_{поч}}. \quad (20.18)$$

Експериментальні дані обробляються у критеріальному вигляді

$$Nu_d = A \cdot Re_r^m \cdot Re_p^n, \quad (20.19)$$

де Nu, Re_r, Re_p – критерії подоби.

Дифузійний критерій Нусельта

$$Nu_d = \frac{\beta_c \cdot d_o}{D_p}, \quad (20.20)$$

де d_o – діаметр отворів, м;

D_p – коефіцієнт дифузії CO₂ в воді, м²/с.

Критерій Рейнольдса для газової фази

$$Re_r = \frac{w_r \cdot D_k \cdot \rho_r}{\mu_r}, \quad (20.21)$$

де w_r – швидкість газу віднесена до поперечного перетину колони, м/с;

D_k – діаметр колони, м;

ρ_r – густина газу, кг/м³;

μ_r – в'язкість газу, Па·с.

Критерій Рейнольдса для рідини

$$Re_p = \frac{L}{(\Pi \cdot \nu_p)}, \quad (20.22)$$

де Π – змочений периметр отворів на тарілці, м;

ν_p – кінематична в'язкість води, м²/с.

Визначення показників ступенів n і m , а також коефіцієнту A проводять графічним методом. Для цього будують графік $\lg(Nu_d) = f_1(\lg Re_p)$ за умови $Re_r = \text{const}$ (знаходять n) і графік $\lg(Nu_d) = f_2(\lg Re_r)$ за умови $Re_p = \text{const}$ (знаходять m). За характером залежності $Nu_d/(Re_p) = f_3(Re_r)$ визначається величина A .

Мета роботи: визначення коефіцієнту масопередачі процесу десорбції CO₂ із води; вивід критеріального рівняння, яке описує процес; оцінка поглинаючої здібності тарілки.

20.2 Опис лабораторної установки та проведення дослідів

Схема лабораторної установки наведена на рис. 20.2.

Робота проводиться на колонах (діаметр 105 мм) з ковпачковими або вихровими тарілками (живий перетин ковпачкової тарілки – 10,6 %, вихрової тарілки – 20 %; діаметр отворів ковпачкової тарілки – 2 мм; розмір щільових отворів вихрової тарілки – (15x4)мм; число отворів (вихрова тарілка) – 26).

Після попереднього насичення води діоксидом вуглецю із балона 13 в баці 3, замірюють його вміст у воді, а потім насосом 12 подають на зрошення колони 1 або 2 в залежності від положення перемикача. Вихідна концентрація CO₂ у воді становить 1,2...1,6 кг/м³. Потім вмикають газодувку 4 і встановлюють витрату повітря (приблизно) по напрузі струму, яка регулюється ЛАТРом 7. Точно витрати повітря встановлюються за показами газового лічильника 5.

Порядок проведення експерименту.

20.2.1 Перевірити наявність вимірювальних рідин у приладах.

20.2.2 З дозволу керівника наситити воду у ємкості 3 карбон(IV) оксидом, повертаючи редуктор балону 13.

20.2.3 Відбирають пробу у кількості 30 мл насиченої рідини на вході у колону і титруванням проби 0.1 N розчином NaOH з додаванням індикатору фенолфталеїну визначають кількість титранту, за яким розраховують вміст CO₂ в воді на початку експерименту. Вихідна концентрація CO₂ у воді зазвичай становить 1,2...1,6 кг/м³.

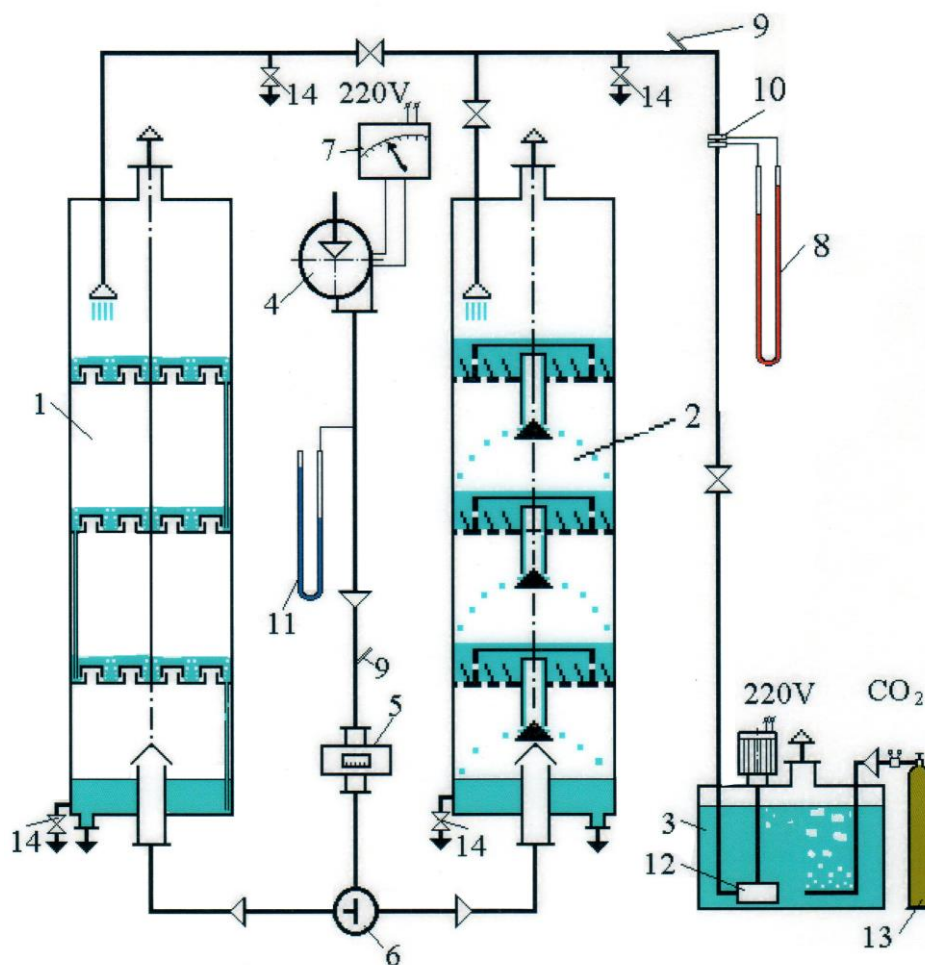
20.2.4 Вмикаючи насос 12 і подають насичену рідину на зрошення колони, яку задає керівник, встановлюючи задану витрату рідини.

20.2.5 Вмикають газодувку 4 і встановлюють задану витрату повітря за допомогою автотрансформатору 7 шляхом регулювання напруги. Точно витрати повітря встановлюють за газовим лічильником 5 впродовж 5-хвилинного експерименту.

20.2.6 Після витримування параметрів установки впродовж 5 хвилин відбирають пробу на виході рідини із колони у кількості 100 мл і встановлюють кількість титранту.

20.2.7 Для виводу рівняння (20.19) у критеріальному вигляді експеримент проводять спочатку за $Re_r = \text{const}$, тобто за постійної витрати повітря, змінюючи витрати води 3...4 рази, а потім, навпаки, за $Re_p = \text{const}$ (за постійної витрати води змінюють 3...4

рази витрати повітря). В ході проведення дослідів також слід фіксувати тиск повітря перед газовим лічильником, у колоні, барометричний тиск, а також температури води та повітря.



1 – колона з ковпачковими тарілками; 2 – колона з вихровими тарілками; 3 – бак з водою; 4 – газодувка; 5 – газовий лічильник; 6 – перемикач; 7 – ЛАТР; 8 – манометр; 9 – термометр; 10 – діафрагма; 11 – манометр; 12 – насос; 13 – балон з CO₂; 14 – відбір проб

Рис. 20.2 – Схема установки для дослідження масопередачі в апаратах з вихровими або ковпачковими тарілками

Експериментальні дані заносять до таблиці 20.1.

Таблиця 20.1 – Результати експерименту

Номер досліджу	Тривалість досліджу τ , с	Вхід у колону					Вихід з колони				Титрант затрачений на титрування, мл	
		Покази ротаметру n	Витрати насиченої рідини	Показник заломлення λ	Концентрація, %	Температура, °C	Показники заломлення	Концентрація, %	Кількість V, м ³	Температура, °C	Вхід до колони	Вихід з колони

20.3 Обробка результатів дослідів

20.3.1 За кількістю титранту, який пішов на титрування проб, встановлюють концентрацію CO_2 у воді на вході і на виході з колони за наступним виразом:

$$C_{\text{вх(вих)}} = \frac{44 \cdot V_{\text{NaOH}} \cdot 0,01}{V_{\text{пр}}}, \quad (20.23)$$

де V_{NaOH} – об'єм розчину NaOH, що витрачений на титрування проб, мл;

$V_{\text{пр}}$ – об'єм проби, мл.

20.3.2 Тиск повітря в колоні визначається наступним чином:

$$P_{\text{к}} = P_{\text{бар}} + \rho \cdot g \cdot h, \quad (20.24)$$

де h – показ дифманометра, м;

ρ – густина робочої рідини в дифманометрі, кг/м^3 .

20.3.3 Об'ємні витрати повітря:

$$Q_{\text{г}} = \frac{V_{\text{кін}} - V_{\text{поч}}}{\tau}. \quad (20.25)$$

20.3.4 Розраховують швидкість газу в колоні:

$$W_{\text{г}} = \frac{4 \cdot Q_{\text{г}}}{\pi \cdot D^2} = \frac{Q_{\text{г}}}{0,785 \cdot D^2}. \quad (20.26)$$

і густину повітря

$$\rho_{\text{г}} = 1,293 \cdot \frac{T_0 \cdot P_{\text{к}}}{T_{\text{к}} \cdot P_0}, \quad (20.27)$$

де $T_{\text{к}}$, $P_{\text{к}}$ – температура та тиск повітря у колоні, К.

20.3.5 Встановлюють периметр отворів на тарілці П.

20.3.6 За рівнянням (20.16) встановлюють коефіцієнт масопередачі $K_c = \beta_c$.

20.3.7 За літературою встановлюють коефіцієнти дифузії та в'язкості.

20.3.8 Розраховують критерії $Nu_{\text{д}}$, $Re_{\text{г}}$, $Re_{\text{р}}$ для всіх режимів роботи колони.

20.3.9 Графічним методом визначають показники ступенів n , m , а також величину A і записують критеріальне рівняння (20.19).

20.4 Контрольні питання

20.4.1 Опишіть існуючі способи проведення десорбції

20.4.2 Назвіть фактори, які впливають на процес десорбції

20.4.3 Назвіть що являється рушійною силою процесів абсорбції та десорбції.

20.4.4 Охарактеризуйте критерії, що описують процес масопередачі в десорбері

20.4.5 Назвіть типи апаратів, що використовуються для проведення десорбції