

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ»

## Теплові процеси

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи № 7  
«Вивчення нестационарного процесу теплопередачі  
в апараті періодичної дії»  
за курсом «Основні процеси та апарати хімічної технології»

Затверджено на засіданні  
кафедри процесів та апаратів  
хімічної технології.  
Протокол № 11 від 04.06.2010.

Дніпропетровськ ДВНЗ УДХТУ2010

Теплові процеси: методичні вказівки до виконання лабораторної роботи №7 «Вивчення нестационарного процесу теплопередачі в апараті періодичної дії» з курсу «Основні процеси та апарати хімічної технології» для студентів III-IV курсів усіх спеціальностей та форм навчання / Укл.: О.С. Смірнова, С.О. Опарін. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2010. – 15 с.

Укладачі: О.С. Смірнова, канд. техн. наук  
С.О. Опарін, канд. техн. Наук

Відповідальний за випуск П.Г. Сорока, д-р техн. наук

Навчальне видання

Теплові процеси

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи з теплових процесів за курсом «Основні процеси та апарати хімічної технології» для студентів III-IV курсів усіх спеціальностей

Укладачі: СМІРНОВА Олена Степанівна  
ОПАРІН Сергій Олександрович

Редактор Л.М. Тонкошкур  
Коректор Л.Я. Гоцуцова

Підписано до друку 16.11.10. Формат 60×84 1/16. Папір ксерокс. Друк різнограф. Умов.-друк. арк. 0,68. Облік.-вид. арк. 0,72. Тираж 100 прим. Замовлення № 69. Свідоцтво ДК № 303 від 27.12.2000.

---

ДВНЗ УДХТУ, 49005, м. Дніпропетровськ-5, просп. Гагаріна, 8.

---

Видавничо-поліграфічний комплекс ІнКомЦентру

**Мета роботи** – визначити тривалість охолодження гарячої води холодною, яка проходить через зміювик, та перевірити її розрахунковим шляхом в умовах нестационарного теплообміну.

## 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ

Технологічні процеси, швидкість протікання яких визначається інтенсивністю підведення або відведення теплоти, називаються тепловими. До них належать процеси нагрівання, охолодження, випаровування та конденсації. Перенесення теплоти відбувається від більш нагрітого середовища до менш нагрітого. Середовища, що приймають участь у теплових процесах, називають **теплоносіями** (гарячий та холодний).

Розрізняють три елементарних способи перенесення теплоти: те

**ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ** – перенесення теплоти внаслідок хаотичного (теплого) руху мікрочастинок: молекул, атомів, іонів та електронів.

У твердому тілі теплопровідність здійснюється за рахунок коливань атомів та іонів у кристалічних решітках, а також за рахунок переміщення вільних електронів (метали). В рідинах, газах та в плазмі – за рахунок зіткнення атомів, молекул та електронів. Основним законом передачі теплоти за допомогою теплопровідності є закон Фур'є, згідно з яким кількість тепла  $dQ$  є прямо пропорційна поверхні  $dF$ , перпендикулярній тепловому потоку, температурному градієнту  $\frac{\partial t}{\partial n}$  і часу  $d\tau$ .

$$dQ = -\lambda dF \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \cdot d\tau. \quad (1.1)$$

Коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  є фізичною величиною, яка характеризує здатність тіла проводити теплоту і залежить від природи речовини, її структури, температури та інших факторів, розмірність  $[\lambda] = \frac{Вт}{м \cdot К}$ . Його значення наводяться в довідковій літературі [1].

Знак мінус, який знаходиться в правій частині рівняння, вказує на те, що тепло переміщується в сторону падіння температури.

**КОНВЕКЦІЯ** – це перенесення тепла внаслідок руху та перемішування макроскопічних об'ємів газу або рідини. Конвекція є складовою конвективного теплообміну, в якому перенесення теплоти відбувається за рахунок поєднання конвекції та теплопровідності.

Основний закон для перенесення тепла за допомогою конвективного теплообміну виражається рівнянням тепловіддачі або законом охолодження Ньютона:

$$dQ = \alpha dF (t_{cm} - t_p) d\tau. \quad (1.2)$$

Згідно з законом Ньютона, кількість тепла  $dQ$ , яка переноситься за час  $d\tau$  до або від поверхні  $dF$ , з температурою стінки  $t_{cm}$  рідині з температурою  $t_p$  прямо пропорційна поверхні, часу і різниці температур. Коефіцієнт пропорційності  $\alpha$  має назву коефіцієнта тепловіддачі. Розмірність  $[\alpha] = \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ .

Коефіцієнт  $\alpha$  є складною функцією багатьох величин: швидкості рідини  $w$ , її густини  $\rho$ , в'язкості  $\mu$ , теплоємності  $c$ , теплопровідності  $\lambda$ , інших фізичних властивостей теплоносія, геометричних параметрів стінки (труби) – довжини  $L$ , діаметра  $d$  та інших параметрів. Таким чином,  $\alpha = f(w; \mu; \rho; \lambda; \beta; d; L; \varepsilon)$  і розраховується згідно з узагальненим емпіричним критеріальним рівнянням для типових випадків тепловіддачі.

Конвективний теплообмін включає не тільки теплові, але й гідродинамічні явища. Коли рух рідини викликаний дією зовнішніх сил (подача насосом, дія надлишкового тиску), тоді при передачі тепла має місце **вимушена конвекція**. А рівняння для розрахунку  $\alpha$  визначаються, в цілому, значенням критерію Рейнольдса:  $\alpha_{вимуш} = f(Re)$ .

Об'єми рідини можуть рухатись і за рахунок різниці густини в різних точках неізотермічного потоку. Біля гарячої поверхні густина рідини менша, ніж біля холодної, в результаті цього виникає потік у сторону меншої густини. Таке явище називається **природною** або **вільною конвекцією**. В цьому випадку рівняння для розрахунку  $\alpha$  визначаються добутком критерію Грасгофа ( $Gr$ ) та критерію Прандтля ( $Pr$ ):  $\alpha = f(Gr \cdot Pr)$ .

Окремим випадком розглядають тепловіддачу при зміні агрегатного стану теплоносія: конденсація пари, кипіння рідини. Узагальнені рівняння для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  при плівковій, краплинній, змішаній конденсації та при кипінні наведені в літературі [1,2].

**ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ** – це процес розповсюдження теплоти за допомогою електромагнітних хвиль, що виникають при тепловому русі атомів або молекул випромінюючого тіла. Променистий теплообмін складається з процесів випромінювання і поглинання. Всі тіла здатні випромінювати енергію, а також поглинати її. Тверді тіла випромінюють в інфрачервоній області спектру і мають довжину хвилі  $\lambda = 0,8-40$  мкм з суцільним спектром.

Гази (водяна пара, діоксид вуглецю  $CO_2$ , діоксид сірки  $SO_2$ ) випромінюють, в основному, у видимій частині, утворюючи лінійчатий спектр. Основними законами при тепловому випромінюванні є закон Стефана-Больцмана:

$$E_0 = k_0 \cdot T^4, \quad (1.3)$$

де  $E_0$  – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла,  $Вт/м^2$ ;

$$k_0 \text{ – константа Больцмана, } k_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}.$$

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА – це перенесення тепла від гарячого теплоносія до холодного через поверхню, яка їх розділяє. Теплопередача є складним сумарним процесом, який відбувається за рахунок поєднання декількох елементарних способів перенесення теплової енергії (рис. 1.1).

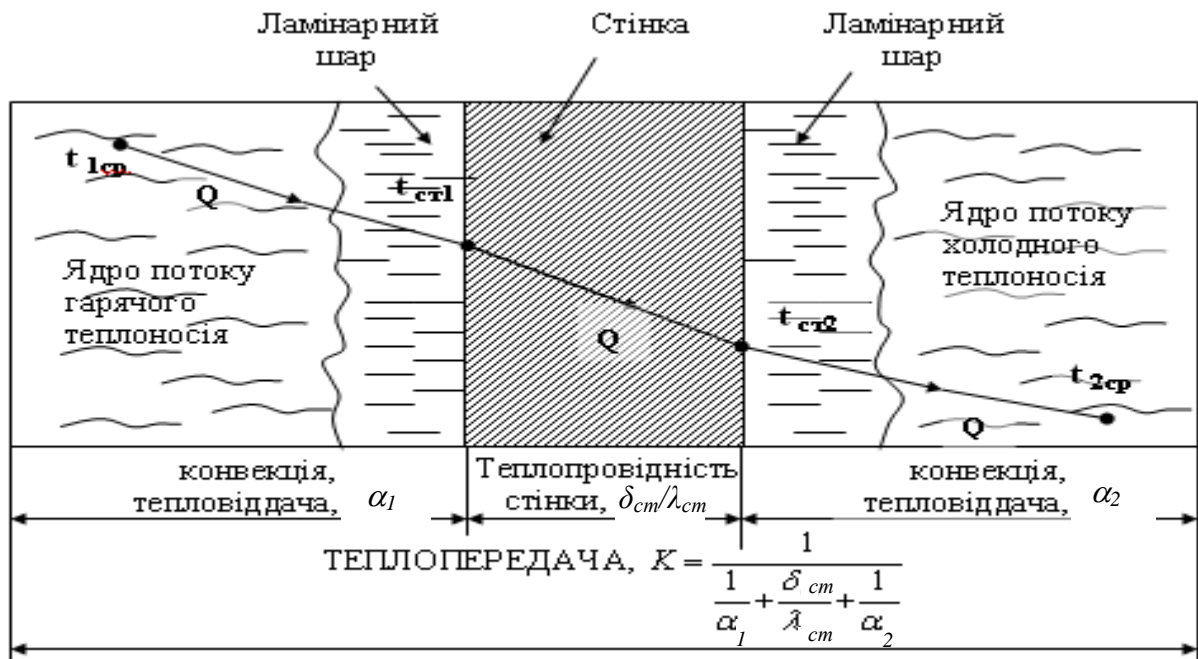


Рис. 1.1. Схема перенесення тепла при теплопередачі

Тепло передається з ядра потоку гарячого теплоносія з температурою  $t_{1cp}$  до внутрішньої стінки з температурою  $t_{cm1}$  в більшій мірі за рахунок конвекції (тепловіддачі) і в меншій – теплопровідності. Відповідає цій стадії коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_1$ . Аналогічно відбувається процес перенесення тепла від внутрішньої стінки з температурою  $t_{cm2}$  до ядра потоку холодного теплоносія  $t_{2cp}$ . Характеризується ця стадія коефіцієнтом тепловіддачі  $\alpha_2$ .

Передача тепла від гарячої стінки поверхні теплопередачі з температурою  $t_{cm1}$  до холодної з температурою  $t_{cm2}$  здійснюється тільки за допомогою теплопровідності ( $\delta_{cm}/\lambda_{cm}$ ).

При малій турбулізації потоків теплоносіїв виникає тепловий пограничний шар, подібний гідродинамічному пристінному (ламінарному) шару. В ньому домінуючу роль при передачі тепла відводиться також теплопровідності.

Коефіцієнт тепловіддачі для гарячого теплоносія  $\alpha_1$  не залежить від умов протікання тепловіддачі холодного теплоносія і може характеризуватись різними видами конвекції. Аналогічно – для коефіцієнта тепловіддачі холодного теплоносія  $\alpha_2$ .

Таким чином, перенесення тепла  $Q$  від гарячого теплоносія до холодного через розділяючу поверхню є сумарним процесом, що включає три основні

вказані стадії, називається теплопередачею, і характеризується коефіцієнтом теплопередачі  $K$ .

Для плоскої поверхні коефіцієнт теплопередачі визначається рівнянням:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1.4)$$

де  $\frac{1}{\alpha_1}$  і  $\frac{1}{\alpha_2}$  – термічний опір тепловіддачі більш та менш нагрітого теплоносія відповідно;

$\sum \frac{\delta}{\lambda}$  – сумарний термічний опір стінки.

Процес теплопередачі при змінних температурах теплоносіїв можна описати основним рівнянням теплопередачі:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{ср.л} \cdot \tau, \quad (1.5)$$

де  $Q$  – кількість тепла, що передається від гарячого теплоносія до холодного, через розділяючу поверхню, Дж;

$F$  – площа поверхні теплопередачі,  $m^2$ ;

$\Delta t_{ср.л}$  – середня логарифмічна температура (температурний напір) між теплоносіями,  $K$ ;

$\tau$  – тривалість процесу,  $s$ ;

$K$  – коефіцієнт теплопередачі,  $Вт/(m^2 \cdot K)$ .

Процеси теплопередачі можуть здійснюватись, як безперервно (стаціонарно), так і періодично (не стаціонарно). У періодично діючих апаратах має місце нестаціонарна (нестала) теплопередача, при якій температура теплоносіїв змінюється як по поверхні теплообміну, так і за часом ( $\tau \neq 0$ ).

До цього випадку належить широко розповсюджене устаткування, в якому охолодження чи нагрівання рідини відбувається через стінку апарата встановленого у середині змійовика або через зовнішню стінку апарата.

## 2. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА АПАРАТА ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ

Схема установки наведена на рис. 3.1.

Теплообмінний апарат складається з бака 1, у середині якого розташований змійовик 2, а зовні – оболонка 3. Установка обладнана термометрами для вимірювання температури гарячої води 16 та холодної води на вході 13 та виході з апарата 14, 15, витратоміром 17 для визначення об'єму охолоджуючої води, водомірним склом 4 для вимірювання об'єму охолоджуваної води та вентилями 5-12.

### 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДУ

3.1. Бак 1 заповнюють водою до об'єму 45 літрів.

3.2. Воду в баці 1 підігрівають за допомогою електричних нагрівачів до температури  $60^{\circ}$ - $70^{\circ}$ С.

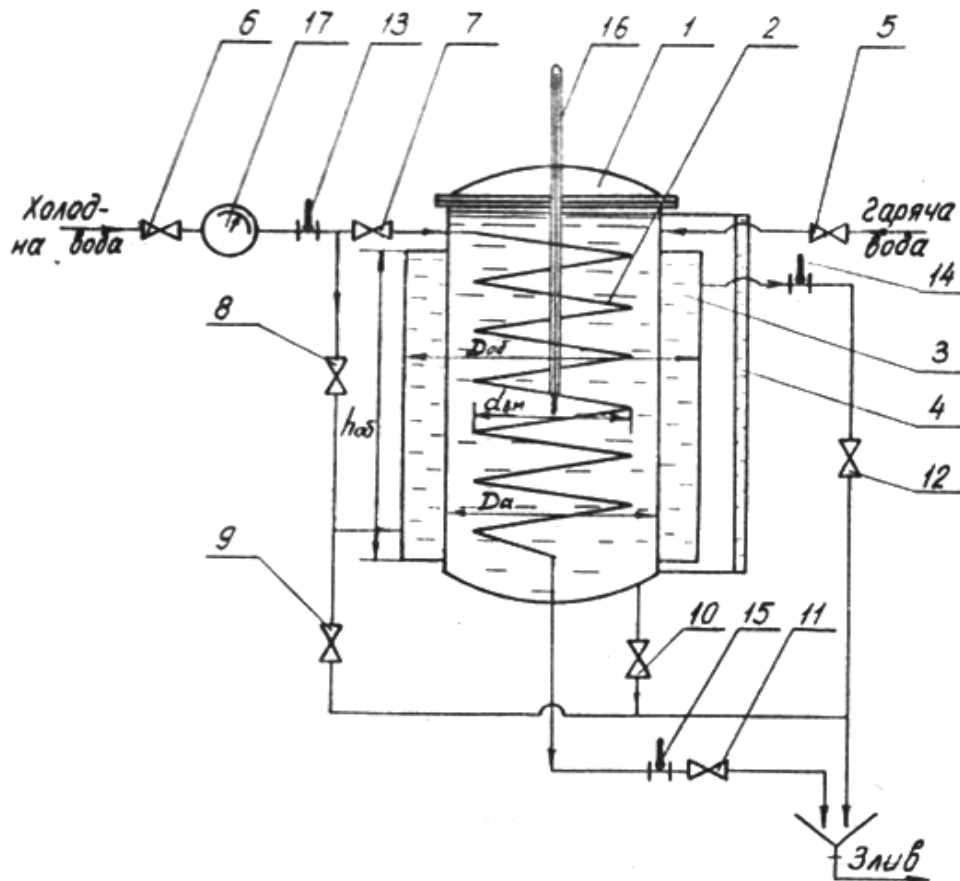


Рис.2. Схема установки періодичної дії

1 - бак; 2 - змійовик; 3 - оболонка; 4 - водомірне скло;  
5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 - вентилі; 13, 14, 15, 16 - термометри;  
17 - витратомір

#### Характеристика апарата

Об'єм апарата $V_1$	50 л
Діаметр витка змійовика $D_{зм}$	300 мм
Зовнішній діаметр трубки змійовика $d_{зовн}$	22 мм
Внутрішній діаметр трубки змійовика $d_{вн}$	18 мм
Кількість витків $n$	6
Крок між витками $h_{зм}$	60 мм
Зовнішній діаметр бака $D_{зв}$	400 мм
Внутрішній діаметр оболонки $D_p$	460 мм
Висота оболонки $h_p$	400 мм
Матеріал з якого виготовлений змійовик – нержавіюча сталь марки X18H10T.	

- 3.3. Записують початкові покази витратоміра 17 для холодної води та термометра 16.
- 3.4. Відкривають послідовно вентилі 11, 7, 6 та подають воду в змішувик. Фіксують при цьому час початку дослідів.
- 3.5. Через кожні 3-5 хвилин записують покази термометра 16 (гаряча вода –  $t_1$ ) та термометра 15 (кінцева температура холодної води –  $t_{2k}$ ).
- 3.6. В середині дослідів фіксують початкову температуру холодної води –  $t_{2n}$ . Вона повинна мати постійне значення протягом всього дослідів.
- 3.7. Дослід закінчують при досягненні температури гарячої води 30-35<sup>0</sup>C.
- 3.8. Записують кінцевий показ витратоміра 17 для холодної води.
- 3.9. За різницею кінцевих та початкових показів витратоміра 17 визначають витрату холодної води  $V_2$ .
- 3.10. Одержані дані заносять до табл. 3.1 та використовують їх у наступних розрахунках.

Таблиця 3.1

## Дослідні дані

№ дослідів	Час дослідів	Температура гарячої води	Об'єм гарячої води	Початкова і кінцева температура холодної води		Покази витратоміра холодної води		Об'єм холодної води	Фактор охолодження			
	$\tau$ , хв	$t_1$ , <sup>0</sup> C	$V_1$ , м <sup>3</sup>	$t_{2n}$ , <sup>0</sup> C	$t_{2k}$ , <sup>0</sup> C	на початку дослідів $V_{2n}$ , м <sup>3</sup>	на кінець дослідів $V_{2k}$ , м <sup>3</sup>	$V_2$ , м <sup>3</sup>	$A$			
1			Одне значення	Одне значення		Одне значення	Одне значення	Одне значення				
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												



## 4. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ

4.1. Середня кінцева температура холодної води:

$$t_{2k}^{cp} = \frac{t_{2k}^1 + t_{2k}^2 + \dots + t_{2k}^n}{n} \quad (4.1)$$

4.2. Середня температура холодної води:

$$t_{2cp} = \frac{t_n + t_{2k}^{cp}}{2} \quad (4.2)$$

4.3. Фізичні властивості холодної води при температурі  $t_{2cp}$  вибираємо з табл. XXXIX [1] та заносимо до табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Параметр	$t_{2cp},$ $^{\circ}C$	$\rho_2,$ $кг/м^3$	$c_2,$ $кДж/(кг \cdot K)$	$\lambda_2 \cdot 10^2,$ $Вт/(м \cdot K)$	$\mu_2 \cdot 10^6,$ $Па \cdot с$	$\nu_2 \cdot 10^6,$ $м^2/с$	$\beta_2 \cdot 10^4,$ $K^{-1}$	$Pr_2$
Значення параметра								

4.4. Середнє арифметичне значення фактора охолодження:

$$A_{cp} = \frac{\sum A_i}{n}, \quad (4.3)$$

де

$$A_i = \frac{t_1^i - t_{2n}}{t_1^i - t_{2k}^i}, \quad (4.4)$$

$n$  – кількість замірів в досліді;

$A_i$  – визначається для кожного заміру;

$t_1^i$  – температура гарячої води для даного заміру,  $^{\circ}C$ ;

$t_{2n}$  – початкова температура холодної води, постійне значення для всіх замірів,  $^{\circ}C$ ;

$t_{2k}^i$  – кінцева температура холодної води для даного заміру,  $^{\circ}C$ .

4.5. Середня логарифмічна різниця температур між гарячою та холодною водою:

$$\Delta t_{cp.l.} = \frac{t_{1n} - t_{1k}}{\ln \frac{t_{1n} - t_{2n}}{t_{1k} - t_{2n}}} \cdot \frac{A_{cp} - 1}{A_{cp} \cdot \ln A_{cp}}, \quad (4.5)$$

де  $t_{1n}$  – температура гарячої води на початку досліду,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $t_{1k}$  – температура гарячої води на кінець досліду,  $^{\circ}\text{C}$ .

4.6. Середня температура гарячої води:

$$t_{1cp} = \Delta t_{cp.l.} + t_{2cp}. \quad (4.6)$$

4.7. Фізичні властивості гарячої води при середній температурі  $t_{1cp}$  знаходимо з табл. ХХХІ [1] та заносимо до табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Параметр	$t_{1cp}, ^{\circ}\text{C}$	$\rho_l, \text{кг/м}^3$	$c_l, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda_l \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$\mu_l \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu_l \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta_l \cdot 10^4, \text{K}^{-1}$	$Pr_l$
Значення параметра								

4.8. Кількість тепла, що передається через поверхню змійовика від гарячої води з врахуванням втрат тепла 10-15% в навколишнє середовище:

$$Q_l = (0,85 \div 0,9) \cdot V_l \cdot \rho_l \cdot c_l \cdot (t_{1n} - t_{1k}), \text{Дж}, \quad (4.7)$$

де  $V_l$  – об'єм гарячої води,  $\text{м}^3$ ;  
 $\rho_l$  – густина гарячої води,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $c_l$  – теплоємність гарячої води,  $\text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ .

4.9. Загальна довжина змійовика:

$$L_{зм} = n \cdot \sqrt{(\pi \cdot d_{зм})^2 + h_{зм}^2}; \quad L_{зм} = 6 \cdot \sqrt{(3,14 \cdot 0,3)^2 + 0,06^2} = 5,66 \text{ м.}$$

4.10. Поверхня змійовика (поверхня теплопередачі):

$$F_{зм} = \pi \cdot d_{cp(tp)} \cdot L; \quad F = 3,14 \cdot 0,02 \cdot 5,66 = 0,355 \text{ м}^2.$$

4.11. Критерій Грасгофа для гарячої води:

$$Gr = \frac{g \cdot h^3 \cdot \Delta t \cdot \beta_l}{\nu^2}, \quad (4.8)$$

де  $h$  – визначаючий геометричний розмір,  $h = d_{зовн} = 0,022 \text{ м}$ ;

$\Delta t$  – різниця температур між температурами гарячої води та зовнішньою стінкою зміювика,  $^{\circ}\text{C}$ .

З невеликим припущенням можна прийняти:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{cp.l.}}{3};$$

$\nu_l$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості гарячої води,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;

$\beta_l$  – коефіцієнт температурного розширення гарячої води,  $\text{K}^{-1}$ .

4.12. Коефіцієнт тепловіддачі від гарячої води до зовнішньої стінки зміювика (природна конвекція):

$$Nu_l^{npr} = C \cdot (Gr_l \cdot Pr_l)^n, \quad (4.9)$$

або:

$$\alpha_l^{npr} = C \cdot (Gr_l \cdot Pr_l)^n \cdot \frac{\lambda_l}{d_{зовн}}, \quad (4.10)$$

де  $Pr_l$  – критерій Прандтля для гарячої води;

$\lambda_l$  – коефіцієнт теплопровідності гарячої води,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Всі фізичні властивості води беруть з табл. 4.2 при середній температурі гарячої води  $t_{lcp}$ .

Коефіцієнт  $C$  та  $n$  залежать від добутку  $(Gr_l \cdot Pr_l)$  і наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Вид режиму течії	Значення $(Gr_l \cdot Pr_l)$	Значення коефіцієнта $C$	Значення коефіцієнта $n$
Ламінарний	$Gr \cdot Pr < 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
Пперехідний	$5 \cdot 10^2 < Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
Турбулентний	$Gr \cdot Pr > 2 \cdot 10^7$	0,135	0,33

4.13. Об'ємна секундна витрата холодної води:

$$V_c^{x.s} = \frac{V_2}{\tau}, \quad \text{м}^3/\text{с}, \quad (4.11)$$

де  $V_2$  – об’єм холодної води, витрачений за час дослідів,  $m^3$ ;  
 $\tau$  – тривалість дослідів,  $s$ .

4.14. Середня швидкість холодної води:

$$\omega_{2cp} = \frac{V_c^{x.6}}{S_{тр}^{3M}} = \frac{V_c^{x.6}}{0,785 \cdot d_{вн}^2}, \text{ м/с}, \quad (4.12)$$

де  $d_{вн}$  – внутрішній діаметр трубки зміювика,  $d_{вн} = 0,018 \text{ мм}$ .

4.15. Критерій Рейнольдса для холодної води:

$$Re_2 = \frac{\omega_{2cp} \cdot d_{вн} \cdot \rho_2}{\mu_2}, \quad (4.13)$$

де  $\rho_2$  – густина холодної води,  $kg/m^3$ ;  
 $\mu_2$  – динамічний коефіцієнт в’язкості холодної води,  $Pa \cdot s$ .

4.16. Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої стінки зміювика до холодної води (вимушена конвекція)  $\alpha_2^{вим}$  ( $Вт/(m^2 \cdot K)$ ):

$$\alpha_2^{вим} = Nu_2^{вим} \cdot \frac{\lambda_2}{d_{вн}}, \quad (4.14)$$

де  $Nu_2^{вим}$  – критерій Нуссельта при вимушеній конвекції;  
 $\lambda_2$  – коефіцієнт теплопровідності холодної води,  $Вт/(m \cdot K)$ .

Рівняння для визначення критерію Нуссельта при вимушеній конвекції ( $Nu_2^{вим}$ ) залежать від величини критерію Рейнольдса для холодної води і наведені в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Значення $Re$ , вид течії	Вид рівняння
$Re \leq 2320$ ламінарний	$Nu = 0,17 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot Gr^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}}\right)^{0,25}$
$2320 < Re \leq 10000$ перехідний	$Nu = 0,008 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,43}$
$Re > 10000$ турбулентний	$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$

4.17. Коефіцієнт тепловіддачі для змійовика:

$$\alpha_2^{з.м} = \alpha_2^{в.м} \cdot \left( 1 + 3,54 \frac{d_{тр}^{cp}}{D_{з.м}} \right), \quad (4.15)$$

де  $d_{тр}^{cp}$  – середній діаметр трубки змійовика,  $d_{тр}^{cp} = 0,02$  м;  
 $D_{з.м}$  – діаметр витка змійовика,  $D_{з.м} = 0,3$  м.

4.18. Сумарний коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1^{прир}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2^{з.м}}}; \frac{Вт}{м^2 \cdot К}, \quad (4.16)$$

де  $\delta_{ст}$  – товщина стінки трубки змійовика,  $\delta_{ст} = 0,002$  м;  
 $\lambda_{ст}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу змійовика;  
 $\lambda_{ст} = 17,5$  Вт/(м·К) (нержавіюча сталь) [1].

4.19. Розрахунковий час охолодження:

$$\tau_p = \frac{Q_1}{K \cdot \Delta t_{ср.л.} \cdot F_{зм} \cdot 60}, \text{ хв.} \quad (4.17)$$

4.20. Графік процесу охолодження гарячої води  $t_l$  у залежності від часу дослідів  $\tau$  будується за даними табл. 3.1 і має загальний вигляд:

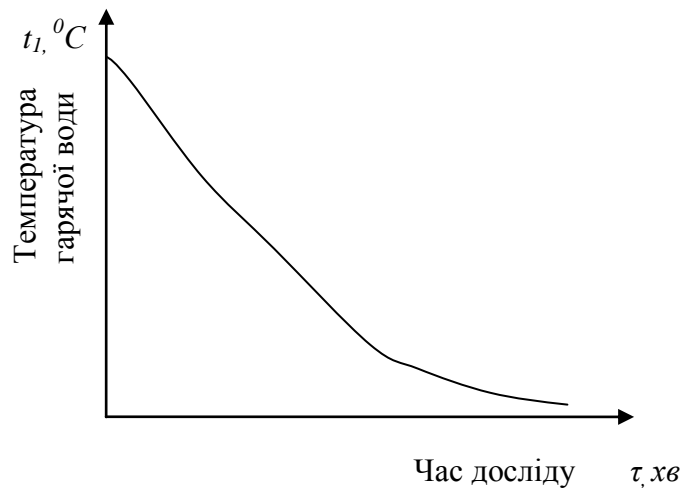


Рис. 4.1. Графік процесу охолодження гарячої води

## 5. ЗМІСТ ЗВІТУ

- 5.1. Назва лабораторної роботи.
- 5.2. Мета роботи.
- 5.3. Опис установки та характеристика апарата.
- 5.4. Таблиця дослідних даних.
- 5.5. Таблиця довідкових даних.
- 5.6. Розрахунки.
- 5.7. Графік процесу охолодження гарячої води.
- 5.8. Висновок.

## 6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 6.1. Назва та мета лабораторної роботи № 7.
- 6.2. Які процеси називаються тепловими?
- 6.3. Що таке теплоносії?
- 6.4. Назвіть три елементарні способи перенесення тепла.
- 6.5. Дайте визначення процесу теплопровідності.
- 6.6. Запишіть та сформулюйте закон Фур'є для теплопровідності.
- 6.7. Дайте визначення процесу конвекції при теплообміні.
- 6.8. Запишіть та сформулюйте рівняння охолодження Ньютона (рівняння тепловіддачі).
- 6.9. Що характеризує та від яких параметрів залежить коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ ?
- 6.10. Яким чином підбирають критеріальні рівняння для визначення коефіцієнтау, тепловіддачі  $\alpha$  при вимушеній конвекції?
- 6.11. Яким чином підбирають критеріальні рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  при природній конвекції?
- 6.12. Дайте визначення процесу теплопередачі та наведіть схему процесу.
- 6.13. Запишіть та сформулюйте основне рівняння теплопередачі при перемінних температурах теплоносіїв.
- 6.14. В яких часових режимах можуть здійснюватись теплові процеси?
- 6.15. Як змінюється температура теплоносіїв при нестационарних (періодичних) процесах?
- 6.16. Як визначається основний коефіцієнт теплопередачі  $K$  через коефіцієнти тепловіддачі  $\alpha$ ?
- 6.17. З яких основних елементів складається дослідна установка з лабораторної роботи №7?
- 6.18. Які дослідні дані фіксувались у лабораторній роботі № 7?
- 6.19. Для якого теплоносія розраховувався коефіцієнт тепловіддачі з природної конвекції? Від яких критеріїв він залежить?
- 6.20. Для якого теплоносія розраховувався коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  з вимушеної конвекції. Від яких критеріїв він залежить?

6.21. Запишіть та прокоментуйте рівняння, з якого був визначений розрахунковий час охолодження гарячої води.

## 7. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

7.1. Павлов К.Ф., Романов П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.

7.2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 764 с.

