

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

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ № 7
«ВИВЧЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПРОЦЕСУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ
В АПАРАТІ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ»
З ДИСЦИПЛІН «ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ»,
«ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ»
ЗА ОСВІТНІМ РІВНЕМ «БАКАЛАВР»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ «015 ПРОФЕСІЙНА ОСВІТА»,
«181 ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ»,
«162 БІОТЕХНОЛОГІЇ ТА БІОІНЖЕНЕРІЯ»**

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

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ № 7
«ВИВЧЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПРОЦЕСУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ
В АПАРАТІ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ»
З ДИСЦИПЛІН «ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ»,
«ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ»
ЗА ОСВІТНІМ РІВНЕМ «БАКАЛАВР»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ «015 ПРОФЕСІЙНА ОСВІТА»,
«181 ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ»,
«162 БІОТЕХНОЛОГІЇ ТА БІОІНЖЕНЕРІЯ»

Затверджено на засіданні
кафедри процесів, апаратів та
загальної хімічної технології
Протокол № 8 від 19.05.2023р.

Методичні вказівки до лабораторних занять № 7 «Вивчення нестационарного процесу теплопередачі в апараті періодичної дії» з дисциплін «Процеси та апарати харчових виробництв», «Процеси та апарати біотехнологічних виробництв» за освітнім рівнем «Бакалавр» для студентів спеціальностей «015 Професійна освіта», «181 Харчові технології», «162 Біотехнології та біоінженерія» / Укл.: А.О. Гура, Т.В. Гриднєва, В.А. Коток. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2024. – 17 с.

Укладачі: А.О. Гура, канд. техн. наук
Т.В. Гриднєва, канд. техн. наук
В.А. Коток, канд. техн. наук

Відповідальний за випуск Ю.Є. Скар, д-р хім. наук

Навчальне видання

Методичні вказівки до лабораторних занять № 7 «Вивчення нестационарного процесу теплопередачі в апараті періодичної дії» з дисциплін «Процеси та апарати харчових виробництв», «Процеси та апарати біотехнологічних виробництв» за освітнім рівнем «Бакалавр» для студентів спеціальностей «015 Професійна освіта», «181 Харчові технології», «162 Біотехнології та біоінженерія»

Укладачі: ГУРА Анна Олександрівна
ГРИДНЄВА Тетяна Василівна
КОТОК Валерій Анатолійович

Авторська редакція

Підписано до друку 01.04.24. Формат 60×84/16. Папір ксерокс. Друк різнограф.
Умов. друк. арк. 0,77. Обл.-вид. арк. 0,82. Тираж 100 прим. Зам. № 318.
Свідоцтво ДК № 5026 від 16.12.2015

ДВНЗ УДХТУ, просп. Науки (Гагаріна), 8, м. Дніпро, 49005

Редакційно-видавничий відділ

Мета роботи – визначити тривалість охолодження гарячої води холодною, яка проходить через змішувач, 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 λ 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 α має назву коефіцієнта тепловіддачі. Розмірність $[\alpha] = \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$.

Коефіцієнт α є складною функцією багатьох величин: швидкості рідини w , її густини ρ , в'язкості μ , теплоємності c , теплопровідності λ , 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 α 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 α 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 α 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).

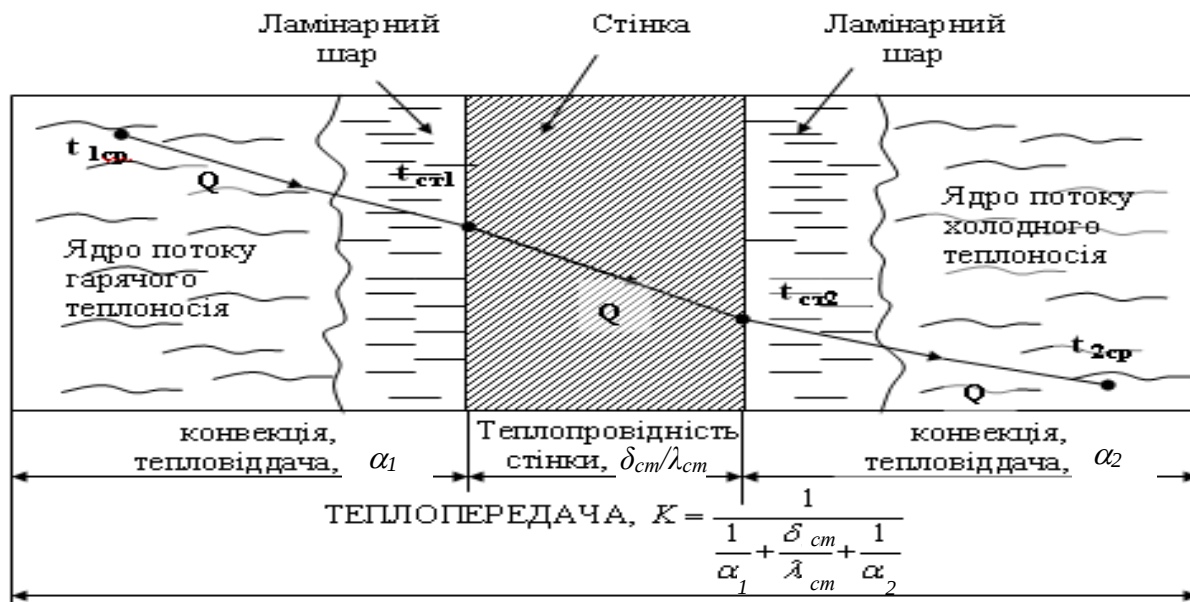


Рис. 1.1. Схема перенесення тепла при теплопередачі

Тепло передається з ядра потоку гарячого теплоносія з температурою t_{1cp} до внутрішньої стінки з температурою t_{cm1} в більший мірі за рахунок конвекції (тепловіддачі) і в менший – теплопровідності. Відповідає цій стадії коефіцієнт тепловіддачі α_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 α_2 .

Передача тепла від гарячої стінки поверхні теплопередачі з температурою t_{cm1} до холодної з температурою t_{cm2} здійснюється тільки за допомогою теплопровідності (δ_{cm}/λ_{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 α_1 не залежить від умов протікання тепловіддачі холодного теплоносія і може характеризуватись різними видами конвекції. Аналогічно – для коефіцієнта тепловіддачі холодного теплоносія α_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, м²;

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

τ – тривалість процесу, с;

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

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 змішувача 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 змішувач 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 $60^0\text{-}70^0\text{C}$.

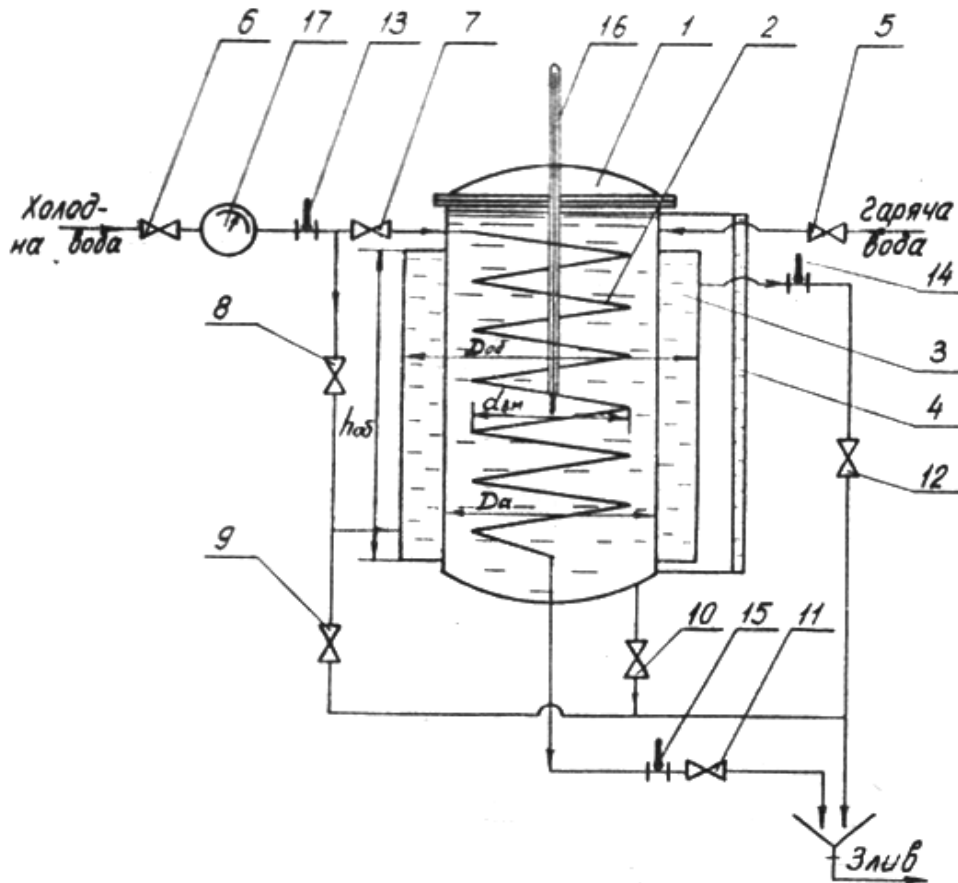


Рис.2. Схема установки періодичної дії

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 досліду.
- 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 досліду фіксують початкову температуру холодної води – t_{2n} . Вона повинна мати постійне значення протягом всього досліду.
- 3.7. Дослід закінчують при досягненні температури гарячої води 30-35°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

№ дослід	Час досліду	Температура гарячої води	Об'єм гарячої води	Початкова і кінцева температура холодної води		Покази витратоміра холодної води		Об'єм холодної води	Фактор охолод ження
	$\tau, \text{хв}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$V_1, \text{м}^3$	$t_{2n}, ^\circ\text{C}$	$t_{2k}, ^\circ\text{C}$	на початку досліду $V_{2n}, \text{м}^3$	на кінець досліду $V_{2k}, \text{м}^3$	$V_2, \text{м}^3$	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:

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

4.2. Середня температура холодної води:

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

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:

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

де t_{1n} – температура гарячої води на початку досліді, $^{\circ}C$;

t_{1k} – температура гарячої води на кінець досліді, $^{\circ}C$.

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. XXXI [1] та заносимо до табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Параметр	$t_{1cp}, ^\circ\text{C}$	$\rho_1,$ кг/м^3	$c_1,$ $\text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda_1 \cdot 10^2$ $\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$\mu_1 \cdot 10^6,$ $\text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu_1 \cdot 10^6$ $\text{м}^2/\text{с}$	$\beta_1 \cdot 10^4$ K^{-1}	Pr_1
Значення параметра								

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

$$Q_1 = (0,85 \div 0,9) \cdot V_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 \cdot (t_{1n} - t_{1k}), \text{ Дж}, \quad (4.7)$$

де V_1 – об'єм гарячої води, м^3 ;

ρ_1 – густина гарячої води, кг/м^3 ;

C_1 – 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):

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

4.11. Критерій Грасгофа для гарячої води:

$$Gr_1 = \frac{g \cdot h^3 \cdot \Delta t \cdot \beta_1}{\nu_1^2}, \quad (4.8)$$

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

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

З невеликим припущенням можна прийняти:

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

ν_1 – кінематичний коефіцієнт в'язкості гарячої води, $\text{м}^2/\text{с}$;

β_1 – коефіцієнт температурного розширення гарячої води, K^{-1} .

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

$$Nu_1^{npr} = C \cdot (Gr_1 \cdot Pr_1)^n, \quad (4.9)$$

або:

$$\alpha_1^{npr} = C \cdot (Gr_1 \cdot Pr_1)^n \cdot \frac{\lambda_1}{d_{зовн}}, \quad (4.10)$$

де Pr_1 – критерій Прандтля для гарячої води;

λ_1 – коефіцієнт теплопровідності гарячої води, $Вт/(м \cdot К)$.

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

Коефіцієнт C та n залежать від добутку $(Gr_1 \cdot Pr_1)$ і наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Вид режиму течії	Значення $(Gr_1 \cdot Pr_1)$	Значення коефіцієнта C	Значення коефіцієнта n
Ламінарний	$Gr \cdot Pr < 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
Перехідний	$5 \cdot 10^2 < Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
Турбулентний	$Gr \cdot Pr > 2 \cdot 10^7$	0,135	0,33

4.13. Об'ємна секундна витрата холодної води:

$$V_c^{x.6} = \frac{V_2}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4.11)$$

де V_2 – об'єм холодної води, витрачений за час дослідів, м^3 ;

τ – тривалість дослідів, с .

4.14. Середня швидкість холодної води:

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

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

4.15. Критерій Рейнольдса для холодної води:

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

де ρ_2 – густина холодної води, кг/м^3 ;

μ_2 – динамічний коефіцієнт в'язкості холодної води, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

4.16. Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої стінки зміювика до холодної води (вимушена конвекція) $\alpha_2^{\text{вум}}$ ($\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$):

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

де $Nu_2^{\text{вум}}$ – критерій Нуссельта при вимушеній конвекції;

λ_2 – коефіцієнт теплопровідності холодної води, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

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

Таблиця 4.4

Значення Re , вид течії	Вид рівняння
$Re \leq 2320$ ламінальний	$Nu = 0,17 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot Gr^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}$
$2320 < Re \leq 10000$ 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 зміювика:

$$\alpha_2^{3M} = \alpha_2^{\text{вум}} \cdot \left(1 + 3,54 \frac{d_{mp}^{cp}}{D_{3M}} \right), \quad (4.15)$$

де d_{mp}^{cp} – середній діаметр трубки зміювика, $d_{mp}^{cp} = 0,02 \text{ м}$;

D_{3M} – діаметр витка зміювика, $D_{3M} = 0,3 \text{ м}$.

4.18. Сумарний коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1^{npup}} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2^{зм}}} \cdot \frac{Вт}{м^2 \cdot К}, \quad (4.16)$$

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

4.19. Розрахунковий час охолодження:

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

4.20. Графік процесу охолодження гарячої води t_1 у залежності від часу досліду τ будується за даними табл. 3.1 і має загальний вигляд:

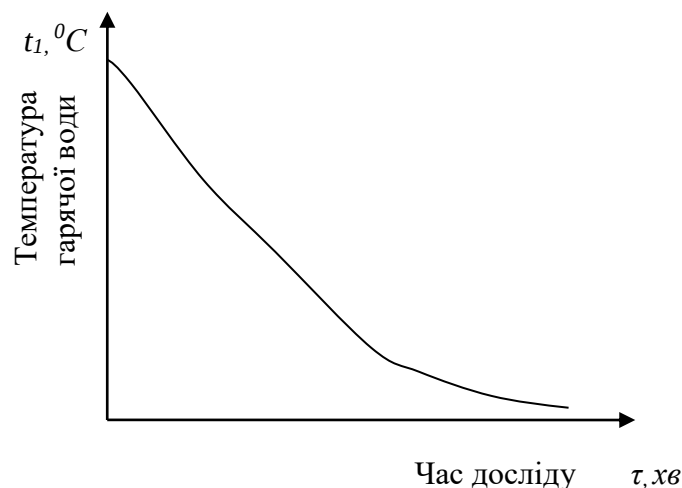


Рис. 4.1. Графік процесу охолодження гарячої води

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 α ?
- 6.10. Яким чином підбирають критеріальні рівняння для визначення коефіцієнта, тепловіддачі α при вимушеній конвекції?
- 6.11. Яким чином підбирають критеріальні рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі α 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 α ?
- 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 α 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

Базова

1. Мікульонок І.О. Механічні, гідромеханічні й масообмінні процеси та апарати хімічної технології: Навч. посіб. 2-ге вид., перероб. і допов. – К.: ІВЦ «Політехніка», 2002. – 304 с.: іл.
2. Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник / За ред. проф. Малежика І.Ф. – Київ, НУХТ. – 2003. – 400 с.
3. Ханик Я. М., Дубинін А. І., Атаманюк В. М., Станіславчук О. В. Процес та апарати хімічних технологій. Частина І.: Навчальний посібник – Львів, Видавництво національного університету "Львівська політехніка", 2005. – 192 с.
4. Бойко В.С., Самойчук К.О, Тарасенко В.Г. та ін. Процеси і апарати. Гідромеханічні процеси: Підручник – Мелітополь, 2019. – 212с.

Допоміжна

1. Тарасенко І.І. Процеси та апарати харчових виробництв : навч. посіб. – К.: Київ. Нац. торг.-екон. ун-т, 2002. – 203 с.
2. Черевко О.І. - Процеси та апарати харчових виробництв. – 2-ге видання, доп. та випр.. – Х.: Світ Книг, 2014. – 496 с.
3. Черевко О.І. Процеси і апарати харчових виробництв : підручник / О.І. Черевко, А.М. Поперечний. – Х. : ХДАТОХ. – 2002. – 417 с.

Властивості води на лінії насичення

t , °C	$p \cdot 10^{-3}$, Па	ρ , кг/м ³	i , кДж/ кг	c_p , кДж/ (кг·°C)	$\lambda \cdot 10^{-2}$, Вт/ (м·°C)	$\alpha \cdot 10^8$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, K ⁻¹	$\sigma \cdot 10^4$, Н/м	Pr
0	1,013	999,9	0,000	4,212	55,1	13,1	1788	1,789	-0,63	756,4	13,67
10	1,013	999,7	42,04	4,191	57,4	13,7	1306	1,306	+0,7	741,6	9,52
20	1,013	998,2	83,91	4,183	59,9	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,02
30	1,013	995,7	125,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805	3,21	712,2	5,42
40	1,013	992,2	167,5	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659	3,87	696,5	4,31
50	1,013	988,1	209,3	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556	4,49	676,9	3,54
60	1,013	983,2	251,1	4,179	65,9	16,0	469,9	0,478	5,11	662,2	2,98
70	1,013	977,8	293,0	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415	5,70	643,5	2,55
80	1,013	971,8	335,0	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365	6,32	625,9	2,21
90	1,013	965,3	377,0	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326	6,95	607,2	1,95
100	1,013	958,4	419,1	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	68,5	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	68,6	17,1	237,4	0,252	8,64	548,4	1,47
130	2,70	934,8	546,4	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233	9,19	528,8	1,36
140	3,61	926,1	589,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	6,18	907,4	675,4	4,346	68,3	17,3	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,92	897,3	719,3	4,380	67,9	17,3	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	67,4	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,00
190	12,55	875,0	807,8	4,459	67,0	17,1	144,2	0,165	12,6	400,2	0,96
200	15,55	863,0	852,5	4,505	66,3	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,93
210	19,08	852,8	897,7	4,555	65,5	16,9	130,5	0,153	14,1	354,1	0,91
220	23,20	840,3	943,7	4,614	64,5	16,6	124,6	0,148	14,8	331,6	0,89
230	27,98	827,3	990,2	4,681	63,7	16,4	119,7	0,145	15,9	310,0	0,88
240	33,48	813,6	1037,5	4,766	62,8	16,2	114,8	0,141	15,8	258,5	0,87
250	39,78	799,0	1085,7	4,844	61,8	15,9	109,9	0,137	18,1	261,9	0,86
260	46,94	784,0	1135,1	4,949	60,5	15,6	105,9	0,135	19,1	237,4	0,87
270	55,05	767,9	1185,3	5,070	59,0	15,1	102,0	0,133	21,6	214,8	0,88
280	64,19	750,7	1236,8	5,230	57,4	14,6	98,1	0,131	23,7	191,3	0,90
290	74,45	732,3	1290,0	5,485	55,8	13,9	94,2	0,129	26,2	168,7	0,93
300	85,92	712,5	1344,9	5,736	54,0	13,2	91,2	0,128	29,2	144,2	0,97
310	98,70	691,1	1402,2	6,071	52,3	12,5	88,3	0,128	32,9	120,7	1,03
320	112,9	667,1	1462,1	6,574	50,6	11,5	85,3	0,128	38,2	98,10	1,11
330	128,6	640,2	1526,2	7,244	48,4	10,4	81,4	0,127	43,3	76,71	1,22
340	146,1	610,1	1594,8	8,165	45,7	9,17	77,5	0,127	53,4	56,70	1,39
350	165,4	574,4	1671,4	9,504	43,0	7,88	72,6	0,126	66,8	38,16	1,60
360	186,7	528,0	1761,5	13,984	39,5	5,36	66,7	0,126	109	20,21	2,35
370	210,5	450,5	1892,5	40,321	33,7	1,86	56,9	0,126	264	4,709	6,79

ЗМІСТ

1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ.....	3
2. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА АПАРАТА ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ.....	6
3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДУ.....	7
4. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ.....	9
5. ЗМІСТ ЗВІТУ.....	13
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	14
7. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	15
Додаток 1.....	16