

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. І. Сікорського»

**Процеси та апарати хімічних виробництв 1. Технічна гідравліка. Основи
теплопередачі. Теплообмінне обладнання**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання розрахункової роботи студентів
галузі знань 16 Хімічна та біоінженерія

Рекомендовано Вченою радою інженерно-хімічного факультету

Київ
НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського»
2016

Процеси та апарати хімічних виробництв 1. Технічна гідравліка. Основи теплопередачі.
Теплообмінне обладнання

Метод. вказівки до виконання розрахункової роботи студентів з дисципліни «**Процеси та апарати хімічних виробництв**» для студентів галузі знань 16 Хімічна та біоінженерія/ Укладач: Т.Б. Шилович. – К.: НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», 2016. – 14 с.

*Гриф надано Вченою радою ІХФ
(Протокол № 8 від 31.10. 2016 р.)*

Навчальне видання

**Процеси та апарати хімічних виробництв 1. Технічна гідравліка. Основи
теплопередачі. Теплообмінне обладнання**

Методичні вказівки до виконання розрахункової роботи студентів з дисципліни «**Процеси та апарати хімічних виробництв**» для студентів галузі знань 16 Хімічна та біоінженерія

Авторська редакція

Укладач:

Т.Б. Шилович, к.т.н., доц

Відповідальний редактор

В.І.Сівецький, к.т.н., проф

Рецензент:

О.М. Мовчанок, к.т.н., доц.

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Підготовка до виконання РР	5
2 Завдання для виконання РР	5
3 Теоретичні відомості	7
4 Оформлення роботи	11
Література	11
Додатки	12

ВСТУП

Підготовка, виконання, оформлення і захист студентських робіт, зокрема – розрахункових робіт (РР), є важливою складовою частиною навчального процесу в вищих навчальних закладах науково-технічного профілю. Всі звітні роботи, які, згідно з учбовою програмою та навчальним планом, які повинні виконувати студенти, мають бути виконаними і оформленими відповідно до вимог діючих в Україні стандартів. Складовими частинами виконання учбових завдань є отримання та узгодження технічного завдання, самостійна підготовка матеріалів РР, грамотне оформлення творчих результатів та заключна частина – захист виконаної РР.

Метою методичних вказівок є допомога студентам галузі знань 16 Хімічна та біоінженерія у процесі роботи над виконанням розрахункової роботи з кредитного модуля «Процеси та апарати хімічних виробництв 1. Технічна гідравліка. Основи теплопередачі. Теплообмінне обладнання».

1 ПІДГОТОВКА ДО ВИКОНАННЯ РР

Стандартними етапами процесу виконання РР є:

- 1) отримання і узгодження завдання для розрахунку;
- 2) робота з джерелами науково-технічної інформації;
- 3) виконання інженерно-технічних розрахунків;
- 4) робота над текстовою частиною РР та її оформлення.

Розрахункова робота з кредитного модуля «Процеси та апарати хімічних виробництв 1. Технічна гідравліка. Основи теплопередачі. Теплообмінне обладнання» виконується згідно навчального плану підготовки бакалаврів з напрямку галузі знань 16 Хімічна та біоінженерія і передбачена як індивідуальне завдання для студентів. Завдання розрахункової роботи охоплюють основні питання задач теплообміну. Метою розрахункової роботи являється формування у студентів вмінь розраховувати процеси теплообміну в теплообмінному обладнанні. Завдання для розрахункової роботи видається студентам на 3-4 тижні навчання, виконується протягом семестру, здається на перевірку та захищається на 12-13 тижні навчання.

Індивідуальне завдання для виконання РР складається з 5 задач за окремими розділами матеріалів кредитного модуля.

2 ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВИКОНАННЯ РР

Задача 1. (з прикладом розв'язання) Двошарова стінка складається з шару вогнетриву 1 (шамот) та шару теплоізоляції 2 (діатомітова цегла), товщиною $\delta_1 = 460$ мм, $\delta_2 = 115$ мм. Температура стінки вогнетриву $t_{c1} = 1300^\circ\text{C}$, температура зовнішнього середовища на достатній відстані (повітря, що омиває теплоізоляцію) $t_{\text{н}} = 20^\circ\text{C}$. Тепловіддача від стінки до оточуючого середовища задана $\alpha_2 = 18 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$.

Визначити густину теплового потоку та знайти розподіл температури в стінці за умов стаціонарного режиму та показати графічно у вигляді залежності

температури від товщини стінки. Визначити температуру в площині дотику шарів [6].

Рішення:

Необхідно в першому наближенні визначити середні температури шарів стінки та знайти коефіцієнти теплопровідності матеріалів, із яких вони зроблені. Для цього при виконанні інженерних розрахунків можна прийняти [1]:

$$t_{\text{сеп1}} = 0,8t_{c1} = 0,8 \times 1300 = 1040^{\circ}\text{C}, \quad t_{\text{сеп2}} = 0,5t_{\text{сеп1}} = 0,5 \times 1040 = 520^{\circ}\text{C}.$$

За додатком 1 знаходимо теплопровідність шамоту та діатоміту, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$:

$$\lambda_1 = 1,04 + 0,0015 \times t_{\text{сеп1}} = 2,6; \quad \lambda_2 = 0,17 + 0,000135 \times t_{\text{сеп2}} = 0,248.$$

Знаходимо питомий тепловий потік за (5):

$$q = \frac{(t_{c1} - t_n)}{(R_{\lambda1} + R_{\lambda2} + R_{\alpha_2})} = \frac{(1300 - 20)}{(0,177 + 0,464 + 0,056)} = 1841 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

де $R_{\alpha} = \frac{1}{\alpha_2}$ - термічний опір тепловіддачі, $\frac{\text{м}^2\text{К}}{\text{Вт}}$.

Для визначення температури в площині дотику скористуємося виразом для визначення питомого теплового потоку: $q = \frac{\lambda_1}{\delta_1}(t_{c1} - t_{c2})$, де t_{c2} - температура на границі шару шамоту та діатоміту, яку треба визначити. Аналогічно із виразу $q = \frac{\lambda_2}{\delta_2}(t_{c2} - t_{c3})$ визначаємо температуру зовнішньої поверхні діатоміту t_{c3} , що омивається повітрям. Відповідь: $t_{c2} = 974^{\circ}\text{C}$, $t_{c3} = 120^{\circ}\text{C}$.

Результати представити у вигляді залежності температури від товщини стінки (рис.1), температуру повітря зобразити на відстані 1 м від стінки. Визначити середню температуру шарів у другому наближенні $t'_{\text{сеп1}}, t'_{\text{сеп2}}$ як середнє арифметичне температур поверхонь та відносну помилку першого наближення температури:

$$\gamma = \frac{t_{\text{сеп1}} - t'_{\text{сеп1}}}{t_{\text{сеп1}}} \cdot 100\%, \quad \gamma = \frac{t_{\text{сеп2}} - t'_{\text{сеп2}}}{t_{\text{сеп2}}} \cdot 100\%.$$

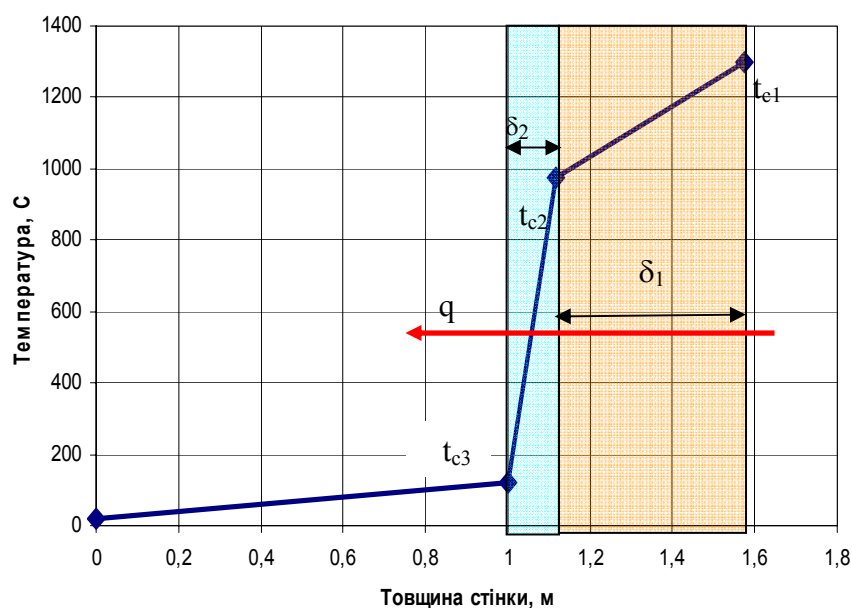


Рис.1 – Розподіл температури в двошаровій стінці

Індивідуальні завдання для розрахунку за варіантами дані в таблиці 1.

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку

Варіант	Вогнетрив 1	Теплоізоляція 2	$t_{c1}, ^\circ$	$t_{п}, ^\circ$	α_2	$\delta_1, \text{мм}$	$\delta_2, \text{мм}$
1	Шамот, $\rho= 1900 \text{ кг/м}^3$	Діатоміт, $\rho= 1100 \text{ кг/м}^3$	1350	18	16	510	95
2	Шамот, $\rho= 1300\text{кг/м}^3$	Діатоміт, $\rho= 750 \text{ кг/м}^3$	1340	20	17	505	200
3	Шамот, $\rho= 1200\text{кг/м}^3$	Діатоміт, $\rho= 1100 \text{ кг/м}^3$	1330	22	18	500	300
4	Шамот, $\rho= 1000\text{кг/м}^3$	Діатоміт, $\rho= 750 \text{ кг/м}^3$	1120	24	19	600	110
5	Шамот, $\rho= 800\text{кг/м}^3$	Діатоміт, $\rho= 1100 \text{ кг/м}^3$	1310	26	20	490	115
6	Динас, 1900кг/м^3	Діатоміт, $\rho= 750 \text{ кг/м}^3$	1400	28	21	470	120
7	Динас, 1100кг/м^3	Діатоміт, $\rho= 750 \text{ кг/м}^3$	1420	30	22	460	125
8	Шамот, $\rho= 1900 \text{ кг/м}^3$	Діатоміт, $\rho= 1100 \text{ кг/м}^3$	1355	18	22	450	130
9	Шамот, $\rho= 1300\text{кг/м}^3$	Діатоміт, $\rho= 750 \text{ кг/м}^3$	1345	20	21	440	95
10	Шамот, $\rho= 1200\text{кг/м}^3$	Діатоміт, $\rho= 1100 \text{ кг/м}^3$	935	22	20	430	100
11	Шамот, $\rho= 1000\text{кг/м}^3$	Діатоміт, $\rho= 750 \text{ кг/м}^3$	1010	24	19	540	135
12	Шамот, $\rho= 800\text{кг/м}^3$	Діатоміт, $\rho= 1100 \text{ кг/м}^3$	1210	26	18	650	300
13	Динас, 1900кг/м^3	Діатоміт, $\rho= 750 \text{ кг/м}^3$	1350	28	17	460	115
14	Динас, 1100кг/м^3	Діатоміт, $\rho= 1100 \text{ кг/м}^3$	930	30	16	470	220
15	Динас, 1100кг/м^3	Діатоміт, $\rho= 1100 \text{ кг/м}^3$	1300	30	15	470	325

Задача 2. У трубці діаметром d , мм рухається вода зі швидкістю w , м/с. Температура стінки трубки $t_c=50^\circ\text{C}$. Яку довжину повинна мати трубка, щоб при температурі води на вході t_{p1} , $^\circ\text{C}$, її температура на виході була t_{p2} , $^\circ\text{C}$. Вихідні дані для розрахунку знаходяться за таблицею 2, де n – порядковий номер студента за списком академічної групи .

Таблиця 2 - Вихідні дані для розрахунку задачі 2

$d, \text{мм}$	$w, \text{м/с}$	$t_{p1}, ^\circ\text{C}$	$t_{p2}, ^\circ\text{C}$
$6+0,1n$	0.4	$10+n$	$20+n$

Задача 3. Обмурівка топкової камери парового котла виконана із шамотної цегли, зовнішня обшивка – з листової сталі. Відстань між ними дорівнює 30 мм, тому її можна вважати малою порівняно з розмірами стін топки. Розрахувати втрати теплоти в оточуюче середовище з одиниці поверхні в одиницю часу в умовах стаціонарного режиму за рахунок променевого теплообміну між поверхнями обмурівки і обшивки. Температура зовнішньої поверхні обмурівки t_1 , $^\circ\text{C}$, а температура сталевий обшивки t_2 , $^\circ\text{C}$. Ступінь чорноти шамоту $\epsilon_{ш}=0,8$, листової сталі $\epsilon_c=0,6$. Вихідні дані для розрахунку за таблицею 3.

Задача 4. В трубчатому пароводяному теплообміннику суха насичена водяна пара з тиском p , Па конденсується на зовнішній поверхні труб. Вода, що рухається у

трубках, нагрівається від $t_{p1}', ^\circ\text{C}$ до $t_{p1}'', ^\circ\text{C}$. Визначити середньологарифмічний температурний напір в цьому теплообміннику. Вихідні дані для розрахунку визначити за таблицею 3.

Таблиця 3 - Вихідні дані для розрахунку задач 3 та 4.

$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$p, \text{Па}$	t_{p1}'	t_{p1}''
$127 + n$	$50 + n$	$(3,5 + 0,1n) \cdot 10^5$	$20 + 0,1n$	$90 + n$

Задача 5. Гумова пластина товщиною $2\delta = 20$ мм, нагріта до температури $t_0 = 140^\circ\text{C}$, розміщена у повітряному середовищі з температурою $t_p = 5 + n, ^\circ\text{C}$. Визначити температури на поверхні пластини та на осі через $\tau = 20$ хв після початку охолодження. Коефіцієнт теплопровідності гуми $\lambda = 0,175$ Вт/(м·К), температуропровідності $a = 0,833 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Коефіцієнт тепловіддачі від поверхні до оточуючого повітря прийняти $\alpha = 65$ Вт/(м²·К).[5]

3 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

3.1 Задача 1 виконується за темою «Теплопровідність» [2].

Теплопровідність є способом передачі теплоти, який здійснюється за рахунок руху структурних часток речовини внаслідок нерівномірності температурного поля. Згідно гіпотези Фур'є кількість теплоти, dQ_τ , Дж, що проходить через елемент ізотермічної поверхні dF , м², за проміжок часу $d\tau$, с, пропорційно температурному градієнту $\frac{\partial t}{\partial n}$:

$$dQ_\tau = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau \quad (1)$$

де λ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ - фізичний параметр речовини, який характеризує її здатність проводити теплоту і називається теплопровідністю [3]. Теплопровідність речовини залежить від температури, тиску та роду даної речовини. Для багатьох речовин залежність теплопровідності від температури приймають лінійною:

$$\lambda = \lambda_0(1 + b(t - t_0)) \quad (2),$$

де λ_0 - значення теплопровідності при температурі t_0 , b - експериментально визначений коефіцієнт. Якщо $t_0 = 0^\circ\text{C}$, тоді (2) записується як

$$\lambda = \lambda_0 + B \cdot t \quad (3)$$

Для пласкої однорідної стінки, товщиною δ , м густина теплового потоку q , Вт/м² при температурах на поверхнях стінки з одного боку t_{c1} , а з другого t_{c2} визначається за формулою:

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}) \quad (4)$$

Для багат шарової стінки, що складається з n шарів, питомий тепловий потік розраховується за формулою:

$$q = \frac{(t_{c1} - t_{cn+1})}{\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \right)} = \frac{(t_{c1} - t_{cn+1})}{\left(\sum_1^n R_{\lambda n} \right)} \quad (5)$$

$$\text{де } \frac{\lambda}{\delta} - \text{теплова провідність стінки, } \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}};$$

$$\frac{\delta}{\lambda} = R_{\lambda} - \text{термічний опір стінки, } \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}.$$

Якщо теплопровідність матеріалу стінки описується залежністю від температури, її можна визначити при середньому значенні температури даної стінки, тобто: $t = 0.5(t_{\text{ст}1} + t_{\text{ст}2})$ підставляємо в (3) і визначаємо теплопровідність.

3.2 Задача 2 виконується за темою «Вимушена конвекція» [2].

Конвекція теплоти – це процес її переносу при переміщенні об'ємів рідини із області з однією температурою в область з іншою температурою [3], тобто процес переносу теплоти нерозривно пов'язаний з переносом самого середовища (рідини). Рух рідини може бути ламінарним, перехідним або турбулентним. Про режим течії судять зі значення числа Рейнольдса. Для труб круглого перерізу розташованих горизонтально число Рейнольдса розраховується за формулою:

$$Re = \frac{\omega \cdot d}{\nu} \quad (6),$$

де ω - середня швидкість рідини, м/с, d - внутрішній діаметр труби, м, ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини, м²/с. При $Re < Re_{\text{кр}1} \cong 2320$ течія є ламінарною, при $Re > Re_{\text{кр}2} \cong 10^4$ течія є турбулентною, при $Re_{\text{кр}1} < Re < 10^4$ – режим течії називають перехідним [2].

Кількість теплоти, яка передається від гарячої поверхні з температурою $t_{\text{ст}}$ до холодної рідини з температурою t_p в одиницю часу визначається за законом Ньютона-Ріхмана:

$$Q = \alpha(t_{\text{ст}} - t_p)F \quad (7),$$

або питомий тепловий потік, віднесений до 1 м² пласкої поверхні:

$$q = \frac{Q}{F} = \alpha(t_{\text{ст}} - t_p) \quad (8)$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К), який характеризує інтенсивність теплообміну між поверхнею тіла та оточуючим середовищем. Для циліндричних тіл питомою одиницею теплового потоку є лінійний тепловий потік q_l , Вт/м, віднесений до одного погонного метра труби, довжиною l , м:

$$q_l = \frac{Q}{l} = \alpha \pi d (t_{\text{ст}} - t_p) \quad (9).$$

Коефіцієнт тепловіддачі визначають використовуючи емпіричні залежності теорії подібності, які мають загальний вигляд: $Nu = f(Re, Gr, Pr, Pr_{\text{ст}})$ (10),

де $Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$ - число Нуссельта, безрозмірний комплекс, який являє собою безрозмірний

коефіцієнт тепловіддачі; $Gr = \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} \beta (t_{\text{ст}} - t_p)$ - число Грасгофа, яке характеризує відношення під'ємних сил, що утворюються внаслідок різниці густин холодної і нагрітої рідини до сил в'язкості, де β , 1/К – коефіцієнт об'ємного розширення рідини; $Pr = \frac{\nu}{a}$ - число Прандля,

характеризує співвідношення молекулярних сил переносу кількості руху і теплоти, знаходиться за таблицями властивостей рідини: Pr – за середньою температурою рідини, $Pr_{\text{ст}}$ – за температурою стінки (див. Таблиця Д2.1). Аналітичний вигляд (9) залежить від режиму течії (табл. 1).

Таблиця 1 – Емпірична формула для числа Nu в залежності від режиму течії [4]

Режим	$Nu=f(Re, Gr, Pr, Pr_{ст})$
ламінальний	$Nu = 0.17 Re^{0.33} Gr^{0.1} Pr^{0.43} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0.25}$
перехідний	$Nu = 2.26 \cdot 10^{-4} Re^{1.3} Pr^{0.43} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0.25}$
турбулентний	$Nu = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.43} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0.25}$

де $Pr_{ст}$ визначається для рідини при температурі стінки.

Кількість теплоти, яку сприймає рідина в процесі нагріву від температури t_{p1} до температури t_{p2} від нагрітої стінки каналу (труби діаметром d , м) можна визначити із рівняння теплового балансу:

$$Q = G \cdot c_p \cdot (t_{p2} - t_{p1}) = \rho \cdot \omega \cdot S \cdot c_p \cdot (t_{p2} - t_{p1}) \quad (11),$$

де ρ , $кг/м^3$ – густина рідини та c_p , $Дж/(кг \cdot K)$ – теплоємність рідини знаходяться за середньою температурою рідини, $G = \rho \omega S$, $кг/с$ – масова витрата рідини, S , $м^2$ – площа перетину каналу.

3.3 Задача 3 виконується за темою «Променевий теплообмін» [2].

Закон Стефана-Больцмана встановлює залежність між густиною потоку інтегрального полусферичного випромінювання E_0 від абсолютної температури T , К:

$$E_0 = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \sigma_0 T^4 \quad (12),$$

де σ_0 – стала Стефана-Больцмана, $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-4}$, $Вт/(м^2 \cdot K^4)$

Для зручності практичних розрахунків (12) представляють у вигляді:

$$E_0 = c_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (13),$$

де $c_0 = 5,67$, $Вт/(м^2 \cdot K^4)$ – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла. Для сірих тіл (13) має

$$\text{вигляд: } E = \epsilon E_0 = \epsilon c_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (14),$$

де ϵ - коефіцієнт теплового випромінювання, c – випромінювальна здатність сірого тіла, $Вт/(м^2 \cdot K^4)$.

У випадку теплообміну в системі тіл з плоскопаралельними поверхнями густина результуючого випромінювання визначається із співвідношення:

$$E_p = q_{1-2} = c_0 \epsilon_{np} \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] \quad (15),$$

де T_1, T_2 – температури поверхонь, що випромінюють, К; $\epsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$ - зведена ступінь

чорноти, $Вт/(м^2 \cdot K^4)$, ϵ_1, ϵ_2 - ступінь чорноти тіл, що складають систему [3].

3.4 Задача 4 виконується за темами «Теплообмін під час зміни агрегатного стану речовини» та «Теплопередача».

Процес переходу пари в рідкий стан з відводом теплоти називається конденсацією. Конденсація пари від стану сухого насичення до стану води, що кипить, відбувається в ізобарно-ізотермічному процесі ($T_s = \text{const}$, $p_s = \text{const}$). Теплота, яка відводиться в процесі конденсації називається теплою фазового переходу (позначається r , кДж/кг). Дані про температуру, тиск, теплоту фазового переходу та інші параметри водяної пари можна визначити за додатком Д.3 або за довідниками [5-6].

Середній температурний напір для теплообмінних апаратів з прямотоком (рис.2) визначається:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{г}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{г}}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \quad (16)$$

де $\Delta t_{\text{г}} = t'_{\text{p2}} - t'_{\text{p1}}$; $\Delta t_{\text{м}} = t''_{\text{p2}} - t''_{\text{p1}}$, $t'_{\text{p1}}, t''_{\text{p1}}$ - температура рідини 1 на вході та виході з теплообмінника, $t'_{\text{p2}}, t''_{\text{p2}}$ - температура рідини 2 на вході та виході з теплообмінника.

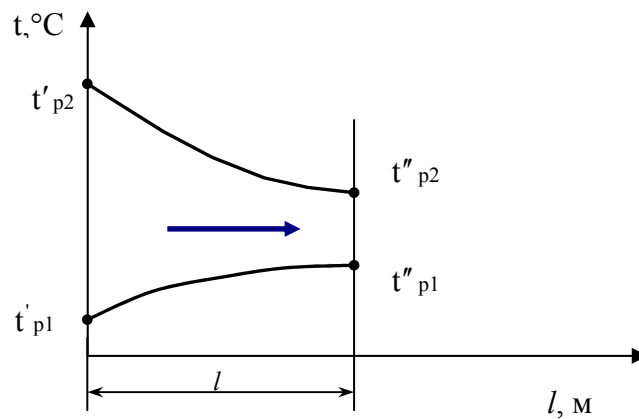


Рис.2 Зміна температур робочих середовищ вздовж поверхні теплообміну при прямотоці

Якщо $\frac{\Delta t_{\text{г}}}{\Delta t_{\text{м}}} \leq 2$, середній температурний напір можна розрахувати за:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{г}} + \Delta t_{\text{м}}}{2} \quad (17).$$

3.5 Задача 5 виконується за темою «Нестационарний теплообмін».

Узагальнене рівняння нестационарної теплопровідності має вигляд:

$$\theta = f(\text{Fo}, \text{Bi}, \bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}) \quad (18),$$

де $\text{Fo} = \frac{a \cdot \tau}{\delta^2}$ - число Фур'є, безрозмірний час, $\text{Bi} = \frac{\alpha \delta}{\lambda}$, число Біо, яке визначає теплообмен на границі «тіло-середовище», $\bar{X} = \frac{x}{l}$, $\bar{Y} = \frac{y}{l}$, $\bar{Z} = \frac{z}{l}$ - безрозмірні координати точок, a - температуровідність тіла, $\text{м}^2/\text{с}$, τ - час, с , δ - напівтовщина пласкої пластини, м , α - коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, λ - теплопровідність тіла, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ x, y, z - координати точок. Безрозмірна температура θ розраховується за формулою:

$$\theta = \frac{t - t_p}{t_0 - t_p}, \quad t_0 - \text{температура тіла в початковий момент часу } \tau=0, \quad t - \text{температура тіла в момент часу}$$

τ , t_p - температура середовища, в яке занурене тіло. Залежності температури $\theta_{x=\delta}$ (на поверхні пластини), $\theta_{x=0}$ (на осі пластини) від Fo та Bi називаються номограмами (наведено в додатках на рис. Д 3.1-Д 3.2).

4 ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ

РР виконується студентом за рахунок часу СРС. Робота оформляється на листах формату А4, має перший титульний лист, на якому вказано назву даного виду роботи, групу, прізвище і ініціали студента, другий лист містить зміст роботи, з третього листа починається виконання роботи. Приводяться вихідні дані задачі, рисунок до задачі з необхідними позначеннями, наведено формули для розрахунку з поясненнями їх застосування, підстановка числових значень та результат з відповідною розмірністю, наприкінці пишеться слово «Відповідь» і наводиться отримане рішення. Кожне завдання починається з нової сторінки. Сторінки РР повинні мати наскрізну нумерацію, перший лист не нумерується. Робота виконується у рукописному вигляді. Робота повинна бути скріпленою з лівої сторони.

ЛІТЕРАТУРА

1. Левченко П.В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности. Учебное пособие для вузов. Перепечатка с издания 1968 г. – М.: ООО ИД «Альянс». 2007. 366 с.
2. Шилович Т.Б. Робоча програма кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі-1. Теплові процеси», Київ – 2014, НТУУ «КПІ», 14 с.
3. Исаченко В.П. и др. Теплопередача: Учебник для вузов.- М.: Энергоиздат. - 1981. –С. 416.
4. Коваленко І.В., Малиновский В.В.. Розрахунки основних процесів, машин та апаратів хімічних виробництв. Навчальний посібник. Київ “Норіта-плюс”, 2006 р. 212с.
5. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник.- М.: Энергоатомиздат. -1984. –С. 80.
6. Краснощеков Е.А. Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче: Учебное пособие для вузов.- М.: Энергия. -1980. –С.288.

ДОДАТКИ

Таблиця Д1. Властивості вогнестійких і теплоізоляційних матеріалів

Вироби	Густина, $\rho, \text{кг/м}^3$	Допустима робоча температура, $^{\circ}\text{C}$	Теплопровідність, $\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$
1	2	3	4
Шамотні	>1900	1350-1500	1,04+0,00015 t
	1900	1350-1500	0,70+0,00064 t
	1300	1300	0,61+0,00018 t
	1200	1300	0,35+0,00035 t
	1000	1250	0,28+0,00023 t
	800	1200	0,21+0,00043 t
Динасові	1900	1650-1700	1,07+0,00093 t
	1100	1500	0,58+0,00043 t
Діатомітові	1100	900	0,27+0,00023 t
	750	900	0,17+0,00035 t

Таблиця Д2 - Фізичні властивості води на лінії насичення

t, $^{\circ}\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$a\cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu\cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta\cdot 10^4, \text{К}^{-1}$	Pr
0	999,9	4,212	0,551	13,1	1,78	-0,63	13,67
10	999,7	4,191	0,574	13,7	1,306	0,70	9,52
20	998,2	4,183	0,599	14,3	1,006	1,82	7,02
30	995,7	4,174	0,618	14,9	0,805	3,21	5,42
40	992,2	4,174	0,635	15,3	0,669	3,87	4,31
50	988,1	4,174	0,618	15,7	0,556	4,49	3,54
60	983,2	4,179	0,658	16,0	0,478	5,11	2,98
70	977,8	4,187	0,674	16,3	0,415	5,7	2,55
80	971,8	4,195	0,680	16,6	0,365	6,32	2,21
90	965,3	4,208	0,683	16,8	0,326	6,95	1,95
100	958,4	4,220	0,685	16,9	0,295	7,52	1,75
110	961,0	4,233	0,686	17,0	0,272	8,08	1,6
120	943,1	4,250	0,686	17,1	0,252	8,64	1,47
130	934,8	4,266	0,686	17,2	0,233	9,19	1,36
140	926,1	4,287	0,685	17,2	0,217	9,72	1,25
150	917,0	4,313	0,684	17,3	0,203	10,3	1,17
160	907,4	4,346	0,683	17,3	0,191	10,7	1,10
170	897,3	4,380	0,679	17,3	0,181	11,3	1,05
180	886,9	4,417	0,674	17,2	0,173	11,9	1,00
190	876,0	4,459	0,670	17,1	0,165	12,6	0,96
200	853,0	4,505	0,668	17,0	0,158	13,3	0,93

Таблиця Д3– Термодинамічні властивості водяної пари на лінії насичення

$p_s, 10^5 \text{ Па}$	$t_s, ^\circ\text{C}$	$r, \text{ кДж/кг}$
3,6	139,87	2145,3
3,8	141,79	2139,4
4,0	143,62	2133,8
4,2	145,39	2128,4
4,4	147,09	2123,2
4,6	148,73	2118,1
4,8	150,31	2113,2
5,0	151,85	2108,4
5,2	153,33	2103,7
5,4	154,77	2099,1
5,6	156,16	2094,6
5,8	157,52	2090,3
6,0	158,84	2086,0
6,2	160,12	2081,8
6,4	161,38	2077,7
6,6	162,60	2073,7

Номограми для середини та поверхні пластини

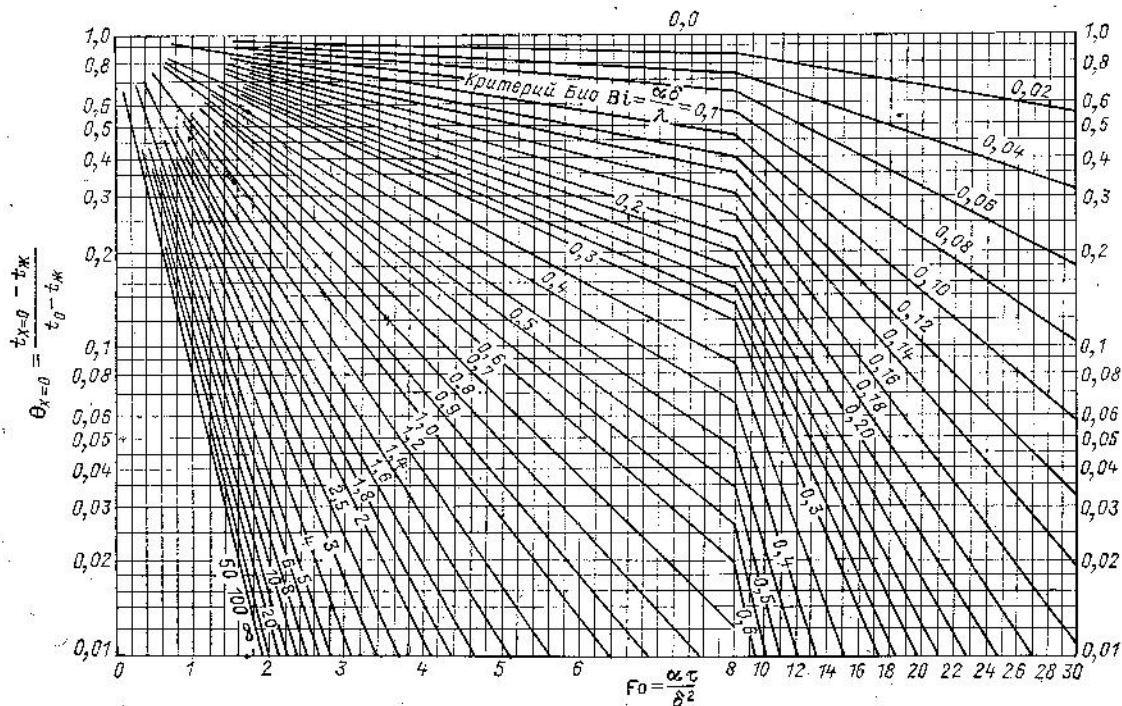


Рис.Д3.1 Залежність $\Theta = f(Fo, Bi)$ для середини тонкої пластини

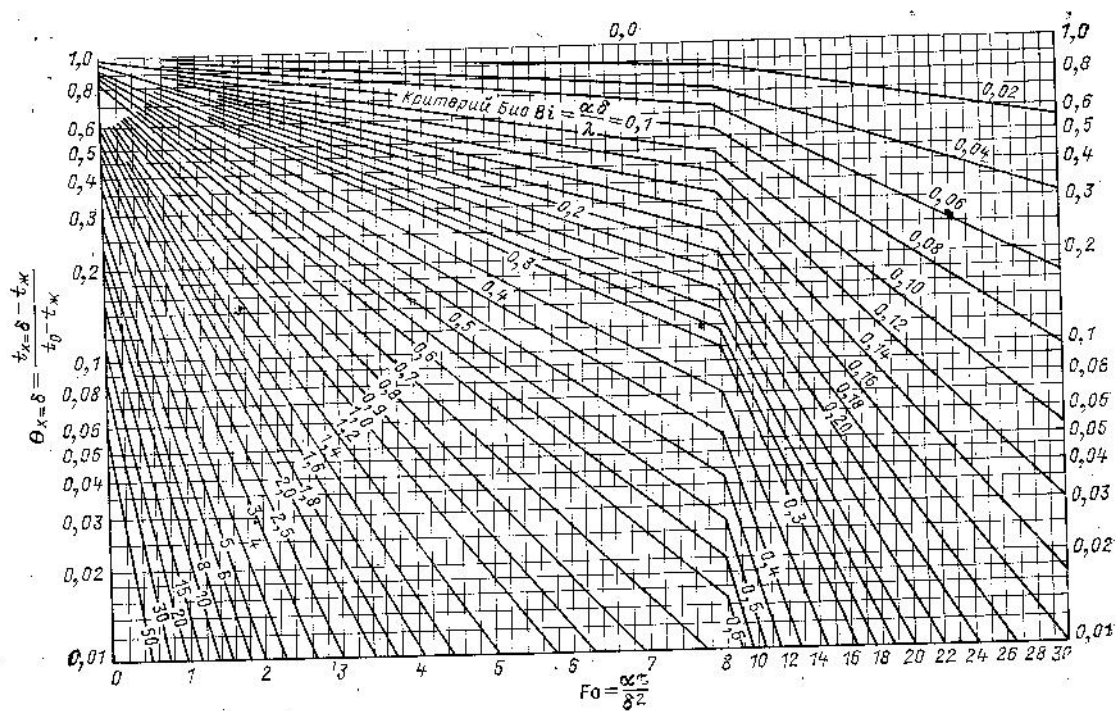


Рис.Д3.2 Залежність $\Theta = f(Fo, Bi)$ для поверхні тонкої пластини [24].