

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Одеська політехніка»
Кафедра теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

з дисципліни «Спеціальні задачі відновлюваної енергетики»
для студентів бакалаврів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»

Одеса 2024
Міністерство освіти і науки України

Національний університет «Одеська політехніка»
Кафедра теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

з дисципліни «Спеціальні задачі відновлюваної енергетики»
для студентів бакалаврів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»

Затверджено
на засіданні кафедри
теоретичної, загальної та
нетрадиційної енергетики
Протокол № 6 від 06.10.24

Одеса 2024

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни " Спеціальні задачі
відновлюваної енергетики " для студентів бакалаврів спеціальності 141

«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/ Уклад.:В. О. Бударін.

- Одеса, 2024.- 23 с

Укладач: В.О.Бударін,
кандидат техн. наук; доцент,

Зміст

1	Теплопровідність при стаціонарному режимі.	4
	1.1. Плоска стінка при граничних умовах 1 роду	4
	1.2. Теплопередача через плоску стінку	6
	1.3. Циліндрична стінка	9
	1.4. Теплова ізоляція	12
2	Теплопровідність при нестаціонарному режимі	13
	2.1. Аналітичне рішення для пластини	13
	2. 2. Номограмний метод розрахунку	15
	Додатки	17
	Література	23

ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ПРИ СТАЦІОНАНОМУ

РЕЖИМІ

1.1.Плоска стінка при граничних умовах 1 роду.

Теоретичні передумови

Мета розрахунку є знаходження розподілу температури уздовж товщини стінки та теплового потоку, що проходить через усі шари стінки. Відомими вважаються дві температури твердих поверхонь.

Одношарова стінка

Найпростішою та поширеною задачею, яка розв'язується завдяки теорії теплопровідності, є визначення густини теплового потоку, що передається крізь однорідну плоску стінку товщиною δ , на поверхні якої підтримуються температури t_{w1} та t_{w2} (одновимірна задача).

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{w1} - t_{w2}) = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{R_w},$$

де $R_w = \frac{\delta}{\lambda}$ — термічний опір стінки.

Багатошарова плоска стінка

Звідси густина теплового потоку

$$q = \frac{t_{w1} - t_{w(n+1)}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} = \frac{t_{w1} - t_{w(n+1)}}{\sum_{i=1}^n R_{wi}} \quad (1.1)$$

Розрахувавши густину теплового потоку через багатошарову стінку, можна визначити падіння температури в кожному шарі та знайти температури на межах всіх шарів ($i=k$):

$$t_{w(k+1)} = t_{w1} - q \sum_{i=1}^k R_{wi}, \quad (1.2)$$

де R_{wi} - термічний опір теплопровідності i -го шару стінки, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

Приклад 1.1.

Стінка холодильної камери виконана з коркової плити товщиною $\bar{\delta}_1 = 100$ мм і обшита по обидва боки сосновими дошками товщиною $\bar{\delta}_2 = 15$ мм

кожна. На зовнішніх поверхнях дощок температури відповідно $t_{w1} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $t_{w4} = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплопровідність матеріалу дощок $\lambda_1 = 0,151\text{ Вт/(м.К)}$.

1. Розрахувати та зобразити температурне поле в стінці камери.
2. Визначити втрати теплоти з 1 м^2 поверхні камери.

Розв'язок

Температурне поле в плоскій стінці має вигляд падаючої ломаної лінії, вигляд якої потрібно розрахувати.

Із таблиці знаходимо теплопровідність пробки $\lambda_w = 0,07\text{ Вт/(м.К)}$.

Густину теплового потоку знайдемо по рівнянню для тришарової плоскої стінки

$$q = \frac{t_{w1} - t_{w4}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{12 + 20}{\frac{2 \cdot 0,015}{0,151} + \frac{0,1}{0,007}} = 2,18 \quad \text{Вт/м}^2$$

Температури на межах різних шарів знайдемо з рівнянь

$$t_{w2} = t_{w1} - q \frac{\delta_1}{\lambda_1} = 20 - 2,18 \frac{0,015}{0,151} = 19,5^{\circ}\text{C}$$

$$t_{w3} = t_{w2} - q \frac{\delta_2}{\lambda_2} = 19,5 - 2,18 \frac{0,01}{0,007} = -11,5^{\circ}\text{C}$$

Точка с температурою $t_w = 0^{\circ}\text{C}$ знаходиться між t_{w1} і t_{w2} .

З подібності трикутників для температурного поля $X_{tw=0} = 0,015 + \Delta x$,

Тоді знайдемо Δx з рівняння

$$0 = 19,5 - \frac{19,5 + 11,6}{0,1} \Delta x \quad \text{або} \quad X_{tw=0} = 0,015 + 0,062 = 0,072$$

1.2. Теплопередача через плоску стінку

Теоретичні передумови

Одношарова стінка

Мета розрахунку процесу є знаходження розподілу температур уздовж товщини стінки та теплового потоку, що передається від гарячої до холодної рідини з температурами t_{f1} та t_{f2} .

Теплота від гарячої рідини з температурою t_{f1} передається першій поверхні, розповсюджується в матеріалі твердої стінки та від другої поверхні нагріває холодну рідину з температурою t_{f2} .

В кінцевому вигляді маємо:

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{\Delta t}{R_1 + R_w + R_2} = \frac{\Delta t}{R_\Sigma} = k \cdot \Delta t \quad (1.3)$$

Рівняння (1.3) називається рівнянням теплопередачі для одношарової плоскої стінки, де R_1 – перший конвективний термічний опір, (м².К/Вт); R_w - термічний опір теплопровідності, (м².К)/Вт; R_2 - другий конвективний термічний опір, (м².К)/Вт; R_{Σ} - сумарний термічний опір теплопередачі, (м².К)/Вт; k - коефіцієнт теплопередачі плоскої стінки, Вт/(м².К).

$$k = 1/R_\Sigma = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Багатошарова стінка

Рис.1 . Багатошарова стінка при граничних умовах 3 роду

Застосуємо властивість адитивності термічного опору та отримаємо рівняння теплопередачі для багатошарової стінки:

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{R_1 + \sum_{i=1}^n R_{w_i} + R_2} = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{R_\Sigma} = k(t_{f1} - t_{f2})$$

де $R_{\Sigma} = R_1 + \sum_{i=1}^n R_{w_i} + R_2$ — повний (сумарний) термічний опір багатошарової плоскої стінки. Величина зворотня термічному опору називається коефіцієнтом теплопередачі і розраховується за рівняннями:

$$k = 1/R_{\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (1.4)$$

Температури на межах багатошарової плоскої стінки:

$$\begin{aligned} t_{w_1} &= t_{f_1} - qR_1 \\ t_{w_{(n+1)}} &= t_{f_2} + qR_2 \end{aligned}$$

При незначному термічному опорі теплопровідності $R_w \Rightarrow 0$, рівняння (1.4) приймає вигляд

$$k = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

Приклад 1.2.

Стальна плоска стінка випарника завтовшки $\delta_2 = 20$ мм вкрита шаром накипу завтовшки $\delta_1 = 20$ мм. Коефіцієнт теплопровідності сталі $\lambda_2 = 50$ Вт/(м.К), а накипу $\lambda_1 = 1$ Вт/(м.К). Коефіцієнт тепловіддачі від води до накипу $\alpha_1 = 1000$ Вт/(м².К), коефіцієнт тепловіддачі від сталі до навколишнього середовища $\alpha_2 = 10$ Вт/(м².К). Температура киплячої води $t_{f1} = 120^\circ\text{C}$, температура навколишнього повітря $t_{f2} = 30^\circ\text{C}$.

Визначити питомий тепловий потік, що віддається від води до повітря, та температури на стиках різнорідних середовищ.

Розв'язок

Питомий тепловий потік розраховуємо по рівнянню теплопередачі для двошарової стінки

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{R_1 + R_{w1} + R_{w2} + R_2} = k \cdot \Delta t$$

Перший конвективний опір

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} = \frac{1}{1000} = 10^{-3} \quad (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт},$$

другий конвективний опір

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{10} = 0.1 \quad (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт},$$

термічний опір накипу

$$R_{w1} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} = \frac{10^{-3}}{1} = 10^{-3} \quad (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт},$$

термічний опір стінки

$$R_{w2} = \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{50} = 4 \cdot 10^{-2} \quad (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}.$$

Питомий тепловий потік

$$q = \frac{120 - 30}{10^{-3} + 10^{-3} + 4 \cdot 10^{-2} + 0,1} = 634 \quad \text{Вт}/\text{м}^2.$$

Температура накипу на межі вода-накип

$$t_{w1} = t_{f1} - \frac{q}{\alpha_1} = 120 - \frac{633,8}{1000} \approx 119,36^\circ \text{C}$$

Температура сталі на межі накип-сталь

$$t_{w2} = t_{w1} - q \cdot R_{w1} = 119,36 - 633,8 \cdot 10^{-3} \approx 118,73^\circ \text{C}$$

Температура сталі на межі сталь-повітря

$$t_{w3} = t_{f2} + q \cdot R_2 = 30 + 633,8 \cdot 0,1 = 93,38^\circ \text{C}$$

Графік температурного поля

1.3.Циліндрична стінка при граничних умовах 1 роду

Теоретичні передумови

Метою розрахунку є знаходження розподілу температури уздовж радіусу та теплового потоку, що проходить через бокову поверхню циліндричної стінки (круглої труби).

Одношарова циліндрична стінка

$$q_l = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1.5)$$

Багатошарова циліндрична стінка

Для визначення лінійної густини теплового потоку багатошарової циліндричної стінки необхідно, як і для багатошарової плоскої стінки, просумувати температурні напори для окремих шарів:

$$q_l = \frac{t_{w1} - t_{w_{(n+1)}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{(i+1)}}{d_i}} .$$

Температура на межах шарів становить:

$$t_{w_{(k+1)}} = t_{w_1} - q_l \sum_{i=1}^k \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{(i+1)}}{d_i} \quad (1.6)$$

Приклад 1.3.

По алюмінієвому проводу діаметром $d = 2$ мм проходить струм. Провід покритий гумовою ізоляцією товщиною $\delta = 1$ мм. Температура зовнішньої поверхні ізоляції $t_{w2} = 50$ °С, а температура її внутрішньої поверхні не повинна перевищувати $t_{w1} = 70$ °С. Коефіцієнт теплопровідності гуми $\lambda = 0,16$ Вт/(м.К).

Визначити:

- 1) припустиму силу струму I ;
- 2) втрати теплоти з 1 м проводу (q_l).

Розв'язок

Ізоляція проводу являє собою циліндричну стінку через яку проходить теплота в наколишне середовище з лінійною густиною теплового потоку q_l , Вт/м.

Теплота передається в ізоляції за рахунок процесу теплопровідності, тому рівняння розрахунку для одношарової циліндричної стінки.

$$q_l = \frac{\pi(t_{w1} - t_{w2})}{\frac{1}{2\lambda_w} \ln \frac{d+2\delta}{d}} = \frac{3,14(70 - 50)}{\frac{1}{2 \times 0,16} \ln \frac{4}{2}} = 196 \quad /$$

З рівняння енергобалансу $\left(q_l = I^2 \rho \frac{L}{f} \right)$ і закону Джоуля – Ленца маємо

$$I = \sqrt{\frac{q_l f}{\rho}} = \sqrt{\frac{196 \cdot 3,14 \cdot 2^2}{4 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}}} = 137 \text{ А}$$

де $\rho = 2,5 \times 10^{-2} \text{ ом} \times \text{мм}^2 / \text{м}$ - питомий опір, $f = \frac{\pi d^2}{4}$ - площа проводу.

Циліндрична стінка при граничних умовах 3 роду

Рівняння (2.22) часто представляють в формі рівняння теплопередачі

$$q_l = \pi k_l \Delta t$$

де $k_l = \frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{R_{l1} + R_{lw} + R_{l2}}$ - лінійний коефіцієнт теплопередачі.

Для двошарової циліндричної стінки рівняння для лінійного коефіцієнту теплопередачі має вигляд

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}} \quad (1.7)$$

Застосування рівнянь (1.6) та (1.7) дозволяє вирішити задачу розрахунку температур на межі сусідніх шарів стінки за допомогою формул

Рис.2. Розподіл температури в багатошаровій стінці.

Згідно (1.7) та рис. 2 в кожному шарі циліндричної стінки температура розподіляється по логарифмічному закону.

Приклад 1.4.

Усередині труби рухається газ з температурою $t_{f1} = 80^\circ\text{C}$ і коефіцієнтом тепловіддачі $\alpha_1 = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, внутрішній діаметр труби $d_1 = 12 \text{ мм}$ товщина стінки $\delta_1 = 5 \text{ мм}$, коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби $\lambda_1 = 15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Зовні труба покрита шаром ізоляції, товщиною $\delta_2 = 30 \text{ мм}$ із коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_2 = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, і омивається потоком повітря з температурою $t_{f2} = 20^\circ\text{C}$. Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_2 = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

1. Визначити втрати теплоти з одного погонного метра труби.
2. Розрахувати і зобразити температурне поле по перетину труби.

Розв'язок

Втрати теплоти с 1 погонного метра

$$Q_{\text{вт}} = \frac{\pi(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_1 + 2\delta_1}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}} = \frac{3,14(80 - 20)}{\frac{1}{50 \times 0,012} + \frac{1}{2 \times 15} \ln \frac{22}{12} + \frac{1}{2 \times 0,2} \ln \frac{82}{22} + \frac{1}{8 \times 0,062}} = 32 \quad /$$

де $d_2 = d_1 + 2\delta_1$, $d_3 = d_2 + 2\delta_2$.

Температури на межах слоїв стінки знайдемо по рівнянням

$$t_{w1} = t_{f1} - \frac{q_l}{\pi} \frac{1}{\alpha_1 d_1} = 80 - \frac{32,3}{3,14 \cdot 50 \cdot 0,012} = 62,8^\circ C$$

$$t_{w3} = t_{f2} + \frac{q_l}{\pi} \frac{1}{\alpha_2 d_3} = 20 + \frac{32,3}{3,14 \cdot 8 \cdot 0,082} = 35,7^\circ C$$

$$t_{w2} = t_{w1} - \frac{q_l}{\pi} \frac{1}{2\lambda_w} \ln \frac{d_2}{d_1} = 62,8 - \frac{32,3}{3,14 \cdot 2 \cdot 15} \ln \frac{22}{12} = 56,6^\circ C$$

1.4. Теплова ізоляція

Теоретичні передумови

Теплова ізоляція необхідна для зменшення переносу теплоти від гарячої рідини, що знаходиться всередині циліндричної стінки (труби) до навколишнього середовища.

Рис.3. Схема розташування шарів для труби з тепловою ізоляцією.

$$d_{кр} = \frac{2\lambda_{i3}}{\alpha_2} \quad (1.8)$$

Для зменшення тепловтрат необхідно, $d_2 \geq d_{кр}$.

Такий результат можливо отримати за умов вибору матеріалу теплоізоляції та інтенсивності охолодження..

Приклад 1.5.

Трубу з зовнішнім діаметром $d_2 = 50$ мм необхідно покрити тепловою ізоляцією з теплопровідністю $\lambda = 0,07$ Вт/(м.К). Коефіцієнт тепловіддачі з

зовнішньої поверхні $\alpha = 7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Визначити придатність теплової ізоляції для використання.

Розв'язок

Розраховуємо критичний діаметр теплової ізоляції та порівнюємо його з геометричним діаметром d_2 .

$$d_{kp} = \frac{2\lambda}{\alpha_2} = \frac{2 \cdot 0,07}{7} = 0,02$$

таким чином $d_2 > d_{kp}$ і тепла ізоляція придатна для використання.

ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ

2.1. Аналітичне рішення для пластини

Розглядаються процеси теплопровідності, що залежать від часу (наприклад, закалка, отжиг).

В результаті аналітичного рішення задачі для плоскої пластини знайдене рівняння для розрахунку безрозмірної температури $\theta = f(X, Bi, Fo)$.

$$\theta = D_i \cos(\mu_i X) \cdot \exp(-\mu_i^2 \cdot Fo) \quad (2.1)$$

де

$$D_i = \frac{2 \sin \mu_i}{\mu_i + \sin \mu_i \cos \mu_i} \text{ - коефіцієнт рівняння}$$

$X = x / \delta$ - безрозмірна координата (δ - половина товщини стінки, м).

$Fo = a\tau / \delta^2$ - число Фур'є (a - температуропровідність матеріалу, τ - час, с).

$\text{ctg} \mu_i = \mu_i / Bi$ - характеристичне рівняння, що дозволяє розрахувати корінь рівняння μ по відомому числу Біо.

/Випадок малих чисел Bi ($Bi < 0,1$)

$$\theta_{x=0} = \exp(-Bi \cdot Fo)$$

Випадок великих чисел Bi ($Bi > 100$)

$$\theta_{x=0} = \frac{4}{\pi} \exp \left[- \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \cdot Fo \right]$$

Для поверхні пластини ($X=1$)

$$\theta_{x=1} = 0$$

Приклад 2.1.

Металевий лист завтовшки $\delta = 5$ мм закаляється в рідині. Початкова температура листа $t_0 = 600^\circ\text{C}$, кінцева температура листа $t(\tau) = 300^\circ\text{C}$, температура рідини $t_f = 80^\circ\text{C}$, теплопровідність матеріалу $\lambda = 45$ Вт/(м.К), коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 300$ Вт/(м².К), теплоємність сталі $c = 2,3$ кДж/(кг.К). Розрахувати час закали.

Розв'язок

Розраховуємо безрозмірну температуру

$$\theta = \frac{t(\tau) - t_f}{t_0 - t_f} = \frac{300 - 80}{600 - 80} = 0,423$$

Розраховуємо критерій Біо

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \frac{\delta}{2}}{\lambda} = \frac{120 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}}{45} = 6,6 \cdot 10^{-3}$$

Так як $Bi < 0,1$ можна використати теоретичну формулу

$$\theta = \exp(-Bi \cdot Fo)$$

Тоді число Фур'є

$$Fo = \frac{\ln \theta}{-Bi} = \frac{\ln 0,423}{-6,6 \cdot 10^{-3}} = 130$$

температуропровідність

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} = \frac{45}{2300 \cdot 7800} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

час закалки

$$\tau = \frac{Fo \cdot \left(\frac{\delta}{2}\right)^2}{a} = \frac{130 \cdot (2,5 \cdot 10^{-3})^2}{2,5 \cdot 10^{-6}} = 325 \text{ с}$$

2.2. Номограмний метод для розрахунку температур та кількості теплоти

Теоретичні передумови

Номограма - графічно задана функція двох аргументів $\theta = f(Bi, Fo)$. або

$$\frac{Q_\tau}{Q_0} = f(Bi, Fo) \quad . \text{ За допомогою номограм розраховують третій параметр } (\theta, Bi, Fo)$$

Номограма для розрахунку кількості теплоти побудована в координатах

$$\frac{Q_\tau}{Q_0} = f(Bi, Fo) \quad \text{і для її використання потрібно знати число Біо та число Фур'є.}$$

Розрахунок кількості теплоти за кінцевий час теплообміну виконується по

формулі (), а кількість теплоти за великий час теплообміну Q_0 - по рівнянню

термодинаміки $Q_0 = c_p \cdot m \cdot \delta t$.

$$Q_\tau = Q_0 \cdot \left(\frac{Q_\tau}{Q_0}\right) \quad (2.2)$$

Приклад 2.2.

Пластина охолоджується в камері від початкової температури $t_0 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$.

Температура повітря в камері $t_f = -2 \text{ }^\circ\text{C}$, коефіцієнт тепловіддачі

$\alpha = 24 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Теплофізичні властивості пластини прийняти такими:

$\lambda = 0,47 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $a = 0,125 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Охолодження вважати закінченим при

досягненні на поверхні пластини температури $t_1 = -1 \text{ }^\circ\text{C}$. Товщину пластини

прийняти: $2\heartsuit = 0,025 \text{ м}$, довжину $l = 2 \text{ м}$, ширину $b = 1 \text{ м}$.

Визначити: 1. Час охолодження пластини.

2. Кількість теплоти, що віддана пластиною в процесі охолодження.

Розв'язок

Знайдемо число Біо

$$Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda} = \frac{24 \cdot 0,0125}{0,47} = 0,61$$

Безрозмірна температура процесу

$$\theta = \frac{t_1 - t_f}{t_0 - t_f} = \frac{-1 + 2}{35 + 2} = 0,027$$

По номограмі знайдемо число Фур'є $F_0 = 8$

$$\tau = \frac{F_0 \cdot \delta^2}{a} = \frac{8 \cdot 0,0125^2}{0,125 \times 10^{-6}} = 9216 \text{ c}$$

Кількість теплоти знайдемо по рівнянню

$$Q_\tau = c_p m (t_0 - t_f) \cdot \left(\frac{Q_\tau}{Q_0} \right),$$

де $Q_0 = c_p m (t_0 - t_f)$ - кількість теплоти за безмежний час охолодження.

Так як $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$, то $c_p \rho = \frac{\lambda}{a}$.

$$\text{Тоді } Q_\tau = 2 \times 0,0125 \times 2 \times \frac{0,47}{0,125 \times 10^{-6}} (35 + 1) \times 0,86 = 5,6$$

де відношення $(Q_\tau / Q_0) = 0,86$ вибираємо по номограмі для розрахунку кількості теплоти для пластини.

ДОДАТКИ

Додаток 1. Теплофізичні властивості твердих тіл, рідини та газу

Назва	Густина. ρ , кг / м ³	Питома теплоємність. c_p , Дж / (кг·К)	Питома теплопровідність. λ , Вт / (м·К)	Температура, °C
Алюміній	$2.7 \cdot 10^3$	$0.88 \cdot 10^3$	209.3	100
Дерево сосни (8-10% вологості)	$0.4 \cdot 10^3$.. $0.55 \cdot 10^3$	$1.7 \cdot 10^3$	0.14..0.41	0,35...0,72
Латунь	$8.4 \cdot 10^3$.. $8.7 \cdot 10^3$	-	85.5	20
Мідь	$8.93 \cdot 10^3$	$0.39 \cdot 10^3$	389.6	0...200
Нікель	$8.9 \cdot 10^3$	$0.46 \cdot 10^3$	35	20
Олово	$7.29 \cdot 10^3$	$0.23 \cdot 10^3$	-	0...100
Сталь	$7.7 \cdot 10^3$.. $7.9 \cdot 10^3$	$0.46 \cdot 10^3$	45.4	300
Стекло	$2.50 \cdot 10^3$.. $2.59 \cdot 10^3$	700	0.74	20
Текстоліт	$1.3 \cdot 10^3$.. $1.4 \cdot 10^3$	1500	0,3	20

Фторопласт	$2.1 \cdot 10^3 \dots$ $2.4 \cdot 10^3$	$0.92 \cdot 10^3 \dots$ $1.05 \cdot 10^3$	0.233	20
------------	--	--	-------	----

Додаток 2. Номограми для розрахунку третього параметру

ЛІТЕРАТУРА

1. Лабай В.Й. Тепломасообмін: Підручник для ВНЗ. —Львів, Тріада Плюс, 2003-260 с.
2. Співак, О. Ю. Тепломасообмін. Частина I : навчальний посібник /
О. Ю. Співак, Н. В. Резидент. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 113 с. ISBN
978-966-641-841-1
3. Нікульшин В. Р., Бударін В. О.. Тепломасообмін частина 1: навчальний
посібник/В. Р. Нікульшин, В. О. Бударін.– Одеса: Медіа Арт, 2014. - 90 с.
4. Wong K-F.V. Intermediate Heat Transfer. New York, Basel: Marcel Dekker, Inc.,
2021. — 407 p. — ISBN: 0-8247-4236-2.