

*К.С. Епіфанов*

# **РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ ЧЕРЕЗ ОРЕБРЕНУ ТРУБУ**

**Методичні вказівки до виконання курсової роботи  
до дисципліни «Тепломасообмін»**

**2018**

*Міністерство освіти і науки України*  
Національний аерокосмічний університет  
ім. М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

К.С. Єпіфанов

**РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ  
ЧЕРЕЗ ОРЕБРЕНУ ТРУБУ**

Методичні вказівки до виконання курсової роботи до дисципліни «Тепломасообмін»

Харків «ХАІ» 2018

УДК 536.24.023

Розрахунок теплового потоку через оребрену трубу. Методичні вказівки до виконання курсової роботи до дисципліни «Тепломасообмін». – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т “Харк. авіац. ін-т”, 2018. – 29 с.

Методичні вказівки до виконання курсової роботи до дисципліни «Тепломасообмін» Конспект лекцій по курсу «Термодинаміка і теплообмін» складений відповідно до існуючої робочої програмою і призначений для студентів Національного аерокосмічного університету імені М. Є. Жуковського «ХАІ», яких навчають в галузі знань 14 «Електрична інженерія».

Іл. 6. Бібліогр.: 7 назв.

Рецензенти:

© Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», 2018 г.

# ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І СКОРОЧЕНЬ

## УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$B_i$  – критерій Біо;  
 $E$  – коефіцієнт ефективності ребра;  
 $F$  - площа,  $m^2$ ;  
 $L$  – довжина,  $m$ ;  
 $Nu$  – критерій Нуссельта;  
 $Pr$  – критерій Прандтля;  
 $Q$  - тепловий потік,  $Вт$ ;  
 $Re$  – критерій Рейнольдса;  
 $S$  – шаг ребер,  $m$ ;  
 $T$  – температура,  $K$ ;  
 $W$  – швидкість,  $m/c$ ;  
 $b$  – коефіцієнт;  
 $d$  – діаметр,  $m$ ;  
 $f$  - площа поперечного перетину,  $m^2$ ;  
 $h$  – висота,  $m$ ;  
 $p$  – тиск,  $бар$ ;  
 $q$  – питомий тепловий потік,  $Вт/м$ ,  $Вт/м^2$ ;  
 $r$  – радіус,  $m$ ;  
 $u$  - периметр поперечного перетину,  $m$ ;  
 $x$  – лінійний розмір,  $m$ ;  
 $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $Вт/(м^2 \cdot K)$ ;  
 $\delta$  – товщина,  $m$ ;  
 $\varepsilon$  – поправка;  
 $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності,  $Вт/(м \cdot K)$ ;  
 $\mu$  - коефіцієнт динамічної в'язкості,  $Па \cdot c$ ;  
 $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості,  $m^2/c$ ;  
 $\psi$  - коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу коефіцієнта тепловіддачі по поверхні ребра;  
 $\rho$  – густина,  $кг/м^3$ ;  
 $\sigma$  - коефіцієнт поверхневого натягу,  $Н \cdot м$ ;  
 $\vartheta$  – надлишкова температура,  $K$ ;

## ІНДЕКСИ

$L$  – рідина;  
 $q$  – кипіння у необмеженому об'ємі;  
 $l$  – віднесена до довжини;  
 $sat$  – насичення;  
 $v$  – пар;

w – чиста рідина;  
0 - незбурений потік;  
1 – внутрішня поверхня;  
2 – зовнішня поверхня;  
m – матеріал;  
p – рідина, довкілля, ребро;  
c – стінка;

## СКОРОЧЕННЯ

## ВСТУП

Дана робота є навчальним посібником для виконання курсової роботи з дисципліни «Тепломасообмін».

Теплообмінні процеси використовуються в промисловості і техніці для забезпечення заданих температурних режимів протікання технологічних процесів.

Для реалізації теплообмінних процесів застосовуються теплообмінні апарати різної конструкції. У промисловості широко поширені апарати з трубчастої поверхнею теплообміну, які досить прості у виготовленні, надійні в експлуатації і універсальні за призначенням, тобто можуть бути використані для реалізації теплообміну між газами, парами, рідинами в широкому діапазоні їх тисків і температур. Для збільшення інтенсивності теплообміну поверхня теплообмінного апарату може бути забезпечена ребрами.

Відповідно, відпрацювання методики розрахунку теплопередачі через ребрені поверхні при підготовці інженерів-теплоенергетиків є досить актуальною.

## 1. СКЛАД І ЗМІСТ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Метою курсової роботи є систематизація, закріплення і розширення теоретичних знань, а також розвиток навичок самостійної роботи. Структурними елементами курсової роботи є:

- титульна сторінка;
- завдання на курсову роботу;
- реферат (при необхідності);
- зміст;
- перелік умовних позначень (при необхідності);
- вступ;
- мети і завдання роботи;
- інженерні розрахунки;
- висновки по роботі;
- бібліографічний список;
- додаток (при необхідності).

У «Вступі» дається обґрунтування актуальності теми курсової роботи і формується основна мета виконуваної роботи (відповідно до індивідуального завдання).

У розділі «Мета і завдання роботи» формується конкретна мета роботи і завдання, які необхідно вирішити для її досягнення.

Розділ «Інженерні розрахунки» містить розрахунки матеріальних і теплових балансів і розрахунки, що дозволяє визначити теплові потоки у теплообмінному апараті.

У «Висновках по роботі» наводяться основні результати виконаної курсової роботи.

«Список використаних джерел» включає літературні джерела, на які дається посилання в тексті курсової роботи.

У «Додатках» наводяться відомості, які не ввійшли в розділ «Інженерні розрахунки», але необхідні для документального підтвердження обґрунтованості зроблених висновків.

Докладніше про склад і зміст курсової роботи можливо ознайомитись у роботі [1].

## 2. ОФОРМЛЕННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Оформлення курсової роботи повинно виконуватись з урахуванням вимог до оформлення звіту о науково-дослідної роботи за ДСТУ 3008:2015.

Розрахунково-пояснювальну записку до курсової роботи друкують шрифтом Times New Roman чорного кольору прямого накреслення через півтора-два міжрядкові інтервали кеглем 14. Розмір шрифту для написання заголовків у рядках і колонках таблиць і пояснюваль-

них даних на рисунках і в таблицях встановлює виконавець курсової роботи.

Розрахунково-пояснювальну записку до курсової роботи як паперовий документ друкують з використанням комп'ютера та принтера на одному боці аркуша білого паперу формату А4 (210 мм х 297 мм). У разі потреби можна використовувати аркуші формату А3 (297 мм х 420 мм). Дозволено долучати до записки сторінки, виконані методами репрографії.

Мову записки визначено у статті 21 Закону України «Про засади державної мовної політики».

Рекомендовано на сторінках розрахунково-пояснювальної записки використовувати береги такої ширини: верхній і нижній — не менше ніж 20 мм, лівий — не менше ніж 25 мм, правий — не менше ніж 10 мм.

Абзацний відступ має бути однаковий упродовж усього тексту записки й дорівнювати п'яти знакам.

Відстань між заголовком, приміткою, прикладом і подальшим або попереднім текстом має бути не менше ніж два міжрядкових інтервали.

Відстань між основами рядків заголовка, а також між двома заголовками приймають такою, як у тексті записки.

Сторінки розрахунково-пояснювальної записки нумерують наскрізно арабськими цифрами, охоплюючи додатки. Номер сторінки проставляють праворуч у верхньому куті сторінки без крапки в кінці.

Титульний аркуш входить до загальної нумерації сторінок записки. Номер сторінки на титульному аркуші не проставляють.

Розділи, підрозділи, пункти, підпункти нумерують арабськими цифрами.

Розділи записки нумерують у межах викладення суті записки і позначають арабськими цифрами без крапки, починаючи з цифри «1».

Підрозділи як складові частини розділу нумерують у межах кожного розділу окремо. Номер підрозділу складається з номера відповідного розділу та номера підрозділу, відокремлених крапкою. Після номера підрозділу крапку не ставлять, наприклад, 1.1, 1.2 тощо.

Пункти нумерують арабськими цифрами в межах кожного розділу або підрозділу. Номер пункту складається з номера розділу та порядкового номера пункту, або з номера розділу, порядкового номера підрозділу та порядкового номера пункту, які відокремлюють крапкою. Після номера пункту крапку не ставлять, наприклад, 1.1, 1.2 або 1.1.1, 1.1.2 тощо.

Усі графічні матеріали розрахунково-пояснювальної записки (ескізи, діаграми, графіки, схеми, фотографії, рисунки, кресленики тощо) повинні мати однаковий підпис «Рисунок».



Рисунок подають одразу після тексту, де вперше посилаються на нього, або якнайближче до нього на наступній сторінці, а за потреби — в додатках до записки.

Рисунки нумерують наскрізно арабськими цифрами, крім рисунків у додатках. Дозволено рисунки нумерувати в межах кожного розділу. У цьому разі номер рисунка складається з номера розділу та порядкового номера рисунка в цьому розділі, які відокремлюють крапкою, наприклад, «Рисунок 3.2» — другий рисунок третього розділу.

Таблицю подають безпосередньо після тексту, у якому її згадано вперше, або на наступній сторінці. На кожену таблицю має бути посилання в тексті записки із зазначенням її номера.

Таблиці нумерують наскрізно арабськими цифрами, крім таблиць у додатках. Дозволено таблиці нумерувати в межах розділу. У цьому разі номер таблиці складається з номера розділу та порядкового номера таблиці, відокремлених крапкою, наприклад, «Таблиця 2.1» — перша таблиця другого розділу.

Переліки (за потреби) подають у розділах, підрозділах, пунктах і/або підпунктах. Перед переліком ставлять двокрапку (крім пояснювальних переліків на рисунках).

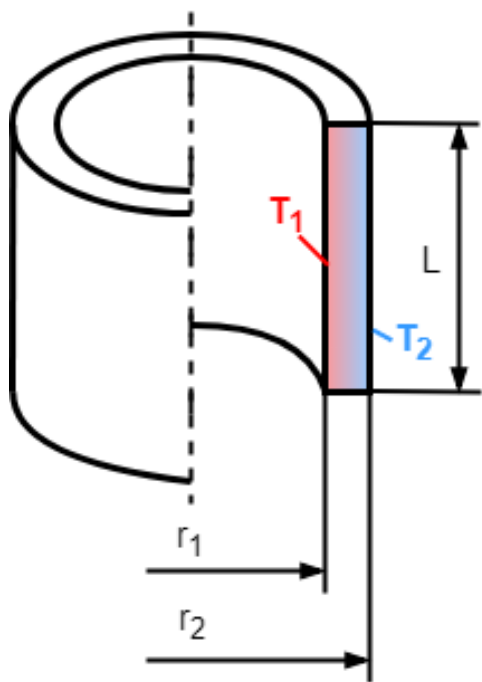
Якщо подають переліки одного рівня підпорядкованості, на які у записці немає посилань, то перед кожним із переліків ставлять знак «тире». Якщо у записці є посилання на переліки, підпорядкованість позначають малими літерами української абетки, далі — арабськими цифрами, далі — через знаки «тире». Після цифри або літери певної позиції переліку ставлять круглу дужку.

Примітки подають у записці, якщо є потреба пояснень до тексту, таблиць, рисунків.

Примітки подають безпосередньо за текстом, під рисунком (перед його назвою), під основною частиною таблиці (у її межах).

Формули та рівняння подають посередині сторінки симетрично тексту окремим рядком безпосередньо після тексту, у якому їх згадано. Найвище та найнижче розташування запису формул(и) та/чи рівняння(-нь) має бути на відстані не менше ніж один рядок від попереднього й наступного тексту.

Нумерують лише ті формули та/чи рівняння, на які є посилання в тексті записки чи додатка.



**Рисунок 3.1. Циліндрична стінка**

Формули та рівняння у розрахунково-пояснювальній записці, крім формул і рівнянь у додатках, треба нумерувати наскрізно арабськими цифрами. Дозволено їх нумерувати в межах кожного розділу.

Номер формули чи рівняння друкують на їх рівні праворуч у крайньому положенні в круглих дужках, наприклад (3). У багаторядкових формулах або рівняннях їхній номер проставляють на рівні останнього рядка.

### 3. ОСНОВНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ТА РОЗРАХУНКОВІ ФОРМУЛИ

#### 3.1. Теплопровідність через циліндричну стінку

Тепловий потік через 1 м циліндричної стінки (див. рисунок 3.1) можна визначити за формулою [3]

$$q_l = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, \quad (3.1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності стінки, Вт/(м\*К);

$T_1$  – температура гарячої сторони стінки, К;

$T_2$  – температура холодної сторони стінки, К;

$r_1$  – радіус внутрішньої поверхні стінки, м;

$r_2$  – радіус зовнішньої поверхні стінки, м.

Тепловий потік через циліндричну стінку висотою  $L$  визначається як

$$Q = q_l \cdot L. \quad (3.2)$$

#### 3.2. Теплопровідність в ребрі постійного перетину

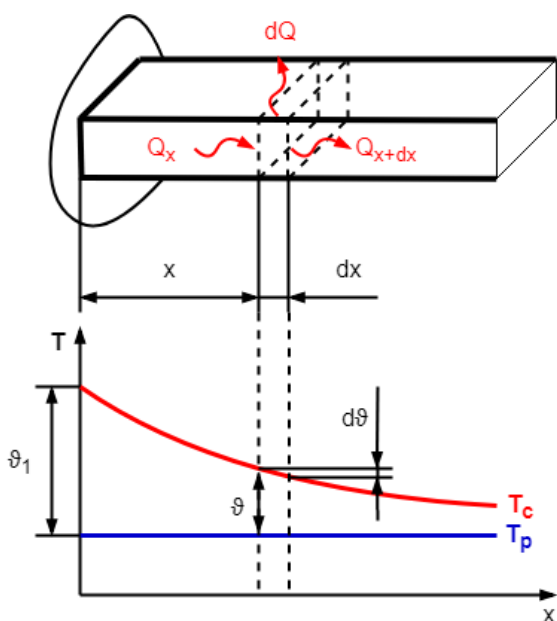


Рисунок 3.2. Ребро постійного

Розглянемо поширення тепла в прямому стрижні з постійним поперечному перетином по довжині (див. рисунок 3.2) [4].

Позначимо:  $f$  – площа поперечного перетину ребра;  $u$  – периметр поперечного перетину ребра. Ребро знаходиться у довікллі з постійній температурою  $T_p$ , коефіцієнт тепловіддачі від поверхні ребра у довікллі буде вважати постійним по усій поверхні. Будемо вважати, що коефіцієнт теплопровідності матеріалу ребра  $\lambda_m$  достатньо великий, а розмір поперечного перетину ребра дуже малий порівняно з

його довжиною. Це дозволяє зробити припущення, що температура змінюється тільки вздовж довжини ребра.

Позначимо:  $\vartheta = T - T_p$  – надлишкова температура ребра, К.

Якщо задана температура у місці контакту ребра з поверхнею  $T_1$ , то надлишкова температура у цій точці буде

$$\vartheta_1 = T_1 - T_p. \quad (3.3)$$

На відстані  $x$  від основи ребра виділимо елемент ребра довжиною  $dx$ . Рівняння теплового балансу для елемента, що розглядається, можливо записати:

$$Q_x - Q_{x+dx} = dQ, \quad (3.4)$$

де  $Q_x$  – кількість теплоти, що входить у ліву грань елемента за одиницю часу, Вт;

$Q_{x+dx}$  – кількість теплоти, що входить у праву грань елемента за одиницю часу, Вт;

$dQ$  – кількість теплоти, що віддається за одиницю часу зовнішньої поверхнею елемента довкіллю, Вт.

Відповідно до закону Фур'є

$$Q_x = -\lambda_M \frac{d\vartheta}{dx} f, \quad (3.5)$$

$$Q_{x+dx} = -\lambda_M \frac{d}{dx} \left( \vartheta + \frac{d\vartheta}{dx} dx \right) f = -\lambda_M f \frac{d\vartheta}{dx} - \lambda_M f \frac{d^2\vartheta}{dx^2} dx. \quad (3.6)$$

Відповідно,

$$dQ = Q_x - Q_{x+dx} = \lambda_M f \frac{d^2\vartheta}{dx^2} dx. \quad (3.7)$$

З іншої сторони, відповідно закону Н'ютона:

$$dQ = \alpha_p \vartheta u dx. \quad (3.8)$$

Прирівнявши (3.7) та (3.8), отримаємо

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} = \frac{\alpha_p u}{\lambda_M f} \vartheta = m^2 \vartheta, \quad (3.9)$$

де

$$m = + \sqrt{\frac{\alpha_p u}{\lambda_M f}}. \quad (3.10)$$

Загальний інтеграл для рівняння (3.9) буде

$$\vartheta = C_1 \cdot e^{m \cdot x} + C_2 \cdot e^{-m \cdot x}. \quad (3.11)$$

Значення постійних  $C_1$  та  $C_2$  визначаються з граничних умов.

Для ребра нескінченної довжини

$$\vartheta = \vartheta_1 \cdot e^{-m \cdot x}, \quad (3.12)$$

а теплота, що відводиться ребром

$$Q = \vartheta_1 \cdot \sqrt{\alpha_p \lambda_M u} f. \quad (3.13)$$

Якщо знехтувати тепловіддачею з вершини ребра, для ребра довжиною  $L$

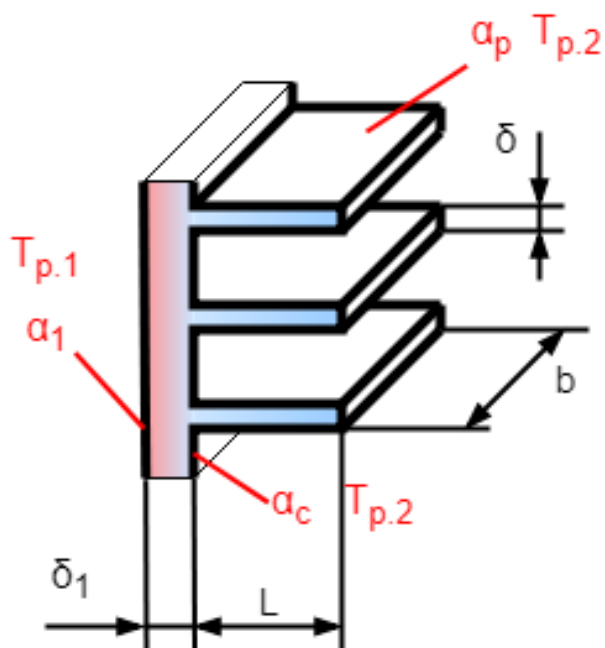


Рисунок 3.3. Оребрена стінка

$$\vartheta = \vartheta_1 \cdot \frac{\text{ch}[m(L-x)]}{\text{ch}(mL)}, \quad (3.14)$$

а теплота, що відводиться ребром

$$Q = \vartheta_1 \cdot \sqrt{\alpha_p \lambda_M u f} \cdot \text{th}(mL). \quad (3.15)$$

### 3.3. Теплопередача через оребрену стінку

Розглянемо теплопередачу через плоску ребристу стінку (див. рисунок 3.3) [4]. Оскільки  $b \gg \delta$ , то периметр поперечного перетину  $u = 2b + 2\delta \approx 2b$ . Площа поперечного перетину  $f = b\delta$ . Відповідно,

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_p u}{\lambda_M f}} = \sqrt{\frac{2\alpha_p}{\lambda_M \delta}}. \quad (3.16)$$

Загальна кількість теплоти,

що віддається оребреною поверхнею  $Q$  знаходиться за формулою

$$Q = Q_c + Q_p, \quad (3.17)$$

де  $Q_c$  – теплота, що віддається міжреберною поверхнею;

$Q_p$  – теплота, що віддається поверхнею ребер.

Згідно за формулою (3.15), з урахуванням того, що  $u \cdot f = 2 \cdot b \cdot b \cdot \delta$ ,

$$Q_p = \vartheta_1 \cdot \sqrt{\alpha_p \lambda_M 2b\delta b} \cdot \text{th}\left(\frac{L}{\delta} \sqrt{\frac{2\alpha_p \delta}{\lambda_M}}\right) = \alpha_p \vartheta_1 F_p \frac{\text{th}\left(\frac{L}{\delta} \sqrt{\frac{2\alpha_p \delta}{\lambda_M}}\right)}{\frac{L}{\delta} \sqrt{\frac{2\alpha_p \delta}{\lambda_M}}}. \quad (3.18)$$

Тут  $\frac{\alpha_p \delta}{\lambda_M} = \text{Bi}$  - число Био,

$F_p$  – площа поверхні ребер,  $\text{m}^2$ .

Визначимо:

$$E = \frac{\text{th}\left(\frac{L}{\delta} \sqrt{2 \cdot \text{Bi}}\right)}{\frac{L}{\delta} \sqrt{2 \cdot \text{Bi}}}. \quad (3.19)$$

Величина  $E$  називається коефіцієнтом ефективності ребра. Тоді рівняння (3.18) приймає вид:

$$Q_p = \alpha_p \vartheta_1 F_p E. \quad (3.20)$$

Теплота, що віддається гладкою частиною оребреної поверхні,

$$Q_c = \alpha_c \vartheta_1 F_c, \quad (3.21)$$

де  $F_c$  – площа поверхні гладкої частини ребреної поверхні,  $m^2$ .

Загальна кількість теплоти

$$Q = Q_p + Q_c = \alpha_p \vartheta_1 F_p E + \alpha_c \vartheta_1 F_c = \alpha_{пр} \vartheta_1 F_{p,c}, \quad (3.22)$$

де  $F_{p,c} = F_p + F_c$ ;

$\alpha_{пр}$  – наведений коефіцієнт тепловіддачі, що визначається за формулою

$$\alpha_{пр} = \alpha_p E \frac{F_p}{F_{p,c}} + \alpha_c \frac{F_c}{F_{p,c}}. \quad (3.23)$$

Для передачі теплоти через пласку ребристу стінку можливо записати систему рівнянь:

$$\begin{cases} Q = \alpha_1 F_1 (T_{p,1} - T_{c,1}) \\ Q = \frac{\lambda}{\delta_1} (T_{c,1} - T_{c,2}) \\ Q = \alpha_{пр} F_{p,c} (T_{c,2} - T_{p,2}) \end{cases}. \quad (3.24)$$

З цих рівнянь отримуємо:

$$Q = \frac{T_{p,1} - T_{p,2}}{\frac{1}{\alpha_1 F_1} + \frac{\delta_1}{\lambda F_1} + \frac{1}{\alpha_{пр} F_{p,c}}}. \quad (3.25)$$

### 3.4. Теплопередача через ребрену трубу

Визначимо формулу для розрахунку теплопередачі через ребрену трубу. Схема ребреної труби приведена на рисунок 3.4.

Відповідно [6], коефіцієнт тепловіддачі конвекцією  $\alpha_k$  при поперечному обтіканні повітрям і димовими газами шахових пучків труб з поперечними ребрами визначається за формулою

$$\alpha_k = 0,223 \frac{\lambda}{S_p^{0,35}} \left( \frac{D}{S_p} \right)^{-0,54} \times \left( \frac{h_p}{S_p} \right)^{-0,14} \left( \frac{W_0}{v} \right)^{0,65}, \quad (3.26)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності повітря або димового газа;

$W_0$  – швидкість повітря або димового газа;

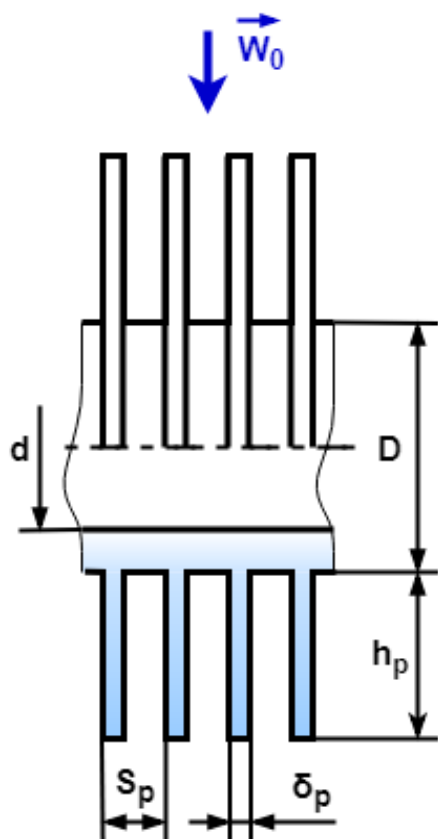


Рисунок 3.4. Ребрена трубка

$\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря або димового газу;  
 $D, d, S_p, h_p$  – лінійні розміри (див. рисунок 3.4).

Коефіцієнт тепловіддачі, що визначається за формулою (3.26), відповідає теплообміну у 4 ряду шахового пучка. У праці [5] стверджується, що теплообмін у 1 ряду шахового пучка або теплообмін одиночної труби дорівнює 78% від теплового потоку у 4 ряді. Відповідно, коефіцієнт тепловіддачі конвекцією  $\alpha_k$  при поперечному обтіканні повітрям і димовими газами одиночної труби з поперечними прямими ребрами визначається за формулою

$$\alpha_k = 0,78 \cdot 0,223 \frac{\lambda}{S_p^{0,35}} \left( \frac{D}{S_p} \right)^{-0,54} \left( \frac{h_p}{S_p} \right)^{-0,14} \left( \frac{W_0}{\nu} \right)^{0,65} \quad (3.27)$$

Наведений коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою

$$\alpha_{пр} = \left[ 1 + \frac{F_p}{F_{p,c}} \cdot (E \cdot \varepsilon_{\Delta} - 1) \right] \cdot \psi \cdot \alpha_k, \quad (3.28)$$

де  $\varepsilon_{\Delta}$  - поправочний коефіцієнт на зміну товщини ребра, для прямого ребра  $\varepsilon_{\Delta} = 1$ ;

$\psi$  - коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу коефіцієнта тепловіддачі по поверхні ребра, для поперечних ребер на круглих трубах  $\psi = 0,85$ ;

$E$  - коефіцієнт ефективності ребра:

$$E = \frac{\text{th} \left( h_p \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \psi \cdot \alpha_k}{\lambda_M \cdot \delta_p}} \right)}{h_p \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \psi \cdot \alpha_k}{\lambda_M \cdot \delta_p}}} \quad (3.29)$$

Передача теплоти через ребристу циліндричну стінку при умові постійної температури рідини у внутрішньому каналі розраховується як:

$$Q = \frac{T_{p,1} - T_{p,2}}{\frac{1}{\alpha_1 F_1} + \frac{d}{2\lambda_M F_1} \cdot \ln \left( \frac{D}{d} \right) + \frac{1}{\alpha_{пр} F_{p,c}}}, \quad (3.30)$$

де  $\alpha_1$  - коефіцієнт тепловіддачі на внутрішньої поверхні;

$F_1$  – площа внутрішньої поверхні;

$d$  – діаметр внутрішньої стінки труби;

$F_{p,c}$  – площа ребристої поверхні.

### 3.5. Розрахунок тепловіддачі при бульбачковому кипінні в умовах вимушеної конвекції в трубах

Згідно праці [4], для визначення коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha$  при бульбачковому кипінні в умовах вимушеної конвекції в трубах можливо скористатися інтерполяційною залежністю

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_w, & \alpha_q/\alpha_w < 0,5 \\ \alpha_q, & \alpha_q/\alpha_w > 2 \\ \alpha_w \cdot \frac{4 \cdot \alpha_w + \alpha_q}{5 \cdot \alpha_w - \alpha_q}, & 0,5 < \alpha_q/\alpha_w < 2 \end{cases}, \quad (3.31)$$

де  $\alpha_w$  – коефіцієнт тепловіддачі при турбулентній течії чистої рідини в каналі;

$\alpha_q$  – коефіцієнт тепловіддачі при бульбачковому кипінні у великому об'ємі.

Турбулентна течія у каналі має місце, якщо виконується умова

$$Re_{L,d} = \frac{W_0 \cdot d}{\nu_L} > 10^4, \quad (3.32)$$

де  $Re_{L,d}$  – критерій Рейнольдса;

$d = 4 \cdot F_n / P$  – гідравлічний діаметр каналу, для каналу круглого поперечного перетину дорівнює фактичному діаметру;

$F_n$  – площа поперечного перетину каналу;

$P$  – периметр поперечного перетину каналу;

$\nu_L$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини.

Середній коефіцієнт тепловіддачі при турбулентній течії чистої рідини в каналі визначається за допомогою числа Нуссельта  $\overline{Nu}_{L,d}$  [3]:

$$\overline{Nu}_{L,d} = 0,021 \cdot Re_{L,d}^{0,8} \cdot Pr_L^{0,43} \left( \frac{Pr_L}{Pr_c} \right)^{0,25} \overline{\varepsilon}_L, \quad (3.33)$$

де  $\overline{Nu}_{L,d} = \frac{\alpha_w d}{\lambda_L}$  – критерій Нуссельта;

$\lambda_L$  – коефіцієнт теплопровідності рідини;

$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}$  – критерій Прандтля;

$\overline{\varepsilon}_L = 1 + 2 \cdot \frac{d}{L}$  – поправка на довжину каналу;

$L$  – довжина каналу.

Якщо  $Re_{L,d} < 2000$ , має місце ламінарний режим течії, в рамках якого може бути реалізований в'язкостний або в'язкістно-гравітаційний режим течії. Конкретний режим залежить від

співвідношення масових сил і сил в'язкості, який визначається критерієм Грасгофа

Критерій Грасгофа для течії рідини у каналі визначається за формулою:

$$Gr_{d,L} = \frac{g\beta\Delta T d^3}{\nu_L^2}, \quad (3.34)$$

Де  $g = 9,81 \text{ м}^2/\text{с}$  – прискорення вільного падіння;

$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$  – коефіцієнт теплового розширення,  $\text{K}^{-1}$ ;

$\Delta T = |T_L - T_c|$  - різниця температур між рідиною та стінкою,  $\text{K}$ .

В'язкостний режим течії має місце, якщо  $Re_{L,d} < 2000$  та  $Gr_{d,L} \cdot Pr_L < 8 \cdot 10^5$ . При цьому критерій Нуссельта визначається як

$$\bar{Nu}_{L,d} = \begin{cases} 1,55 \cdot \left( Re_{L,d} \cdot Pr_L \cdot \frac{d}{L} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_c}{\mu_L} \right)^{-0,14} \cdot \bar{\varepsilon}_L, & \frac{L}{Re_{L,d} \cdot d} < 0,1 \\ 3,66 \cdot \left( \frac{Pr_L}{Pr_c} \right)^{0,25}, & \frac{L}{Re_{L,d} \cdot d} \geq 0,1 \end{cases}, \quad (3.35)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;

$\bar{\varepsilon}_L$  - поправка на довжину каналу:

$$\bar{\varepsilon}_L = \begin{cases} 1, & L/d \geq 50 \\ 0,1 \cdot \left( \frac{L}{Re_{L,d} \cdot d} \right)^{-1/7}, & L/d < 50 \end{cases} \cdot \frac{1}{1 + 2,5 \cdot \frac{L}{Re_{L,d} \cdot d}}, \quad (3.36)$$

В'язкотно-гравітаційний режим течії реалізується, якщо  $Re_{L,d} < 2000$  та  $Gr_{d,L} \cdot Pr_L > 8 \cdot 10^5$ . При цьому критерій Нуссельта визначається як

$$\bar{Nu}_{L,d} = 0,15 \cdot Re_{L,d}^{0,32} \cdot Pr_L^{0,33} \left( Gr_{L,d} \cdot Pr_L \cdot \frac{d}{L} \right)^{0,1} \cdot \left( \frac{Pr_L}{Pr_c} \right)^{0,25} \cdot \bar{\varepsilon}_L, \quad (3.37)$$

де  $\bar{\varepsilon}_L$  - поправка на довжину каналу:

$$\bar{\varepsilon}_L = \begin{cases} 1, & L/d \geq 50 \\ 1,895 \cdot (L/d)^{-0,1695}, & L/d < 50 \end{cases} \quad (3.38)$$

Якщо  $2000 < Re_{L,d} < 10000$ , має місце перехідний режим течії. Критерій Нуссельта визначається як [7]



$$\overline{Nu}_{L,d} = K_0 \cdot Pr_L^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_L}{Pr_C} \right)^{0,25} \cdot \overline{\varepsilon}_L, \quad (3.39)$$

де  $\overline{\varepsilon}_L$  - поправка на довжину каналу, що визначається за формулою (3.38);

$K_0$  – комплекс, що залежить від критерія Рейнольдса (див. табл. 3.1.).

Таблиця 3.1. Залежність комплексу  $K_0$  від критерія Рейнольдса.

$Re \cdot 10^{-3}$	2,2	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	5	6	7	8	9	10
$K_0$	2,2	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

Коефіцієнт тепловіддачі при бульбочковому кипінні у великому об'ємі може бути визначений за формулою:

$$\alpha_q = b \cdot \left( \frac{\lambda_L^2}{\nu_L \cdot \sigma \cdot T_{sat}} \right)^{1/3} \cdot q^{2/3}, \quad (3.40)$$

де  $\sigma$  - коефіцієнт поверхневого натягу, Н·м;

$T_{sat}$  – температура насичення, К;

$q$  – густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;

$$b = 0,075 \cdot \left[ 1 + 10 \cdot \left( \frac{\rho_v}{\rho_L - \rho_v} \right)^{2/3} \right] - \text{коефіцієнт.}$$

Зокрема, коефіцієнт тепловіддачі при бульбочковому кипінні води у великому об'ємі може бути визначений за формулою:

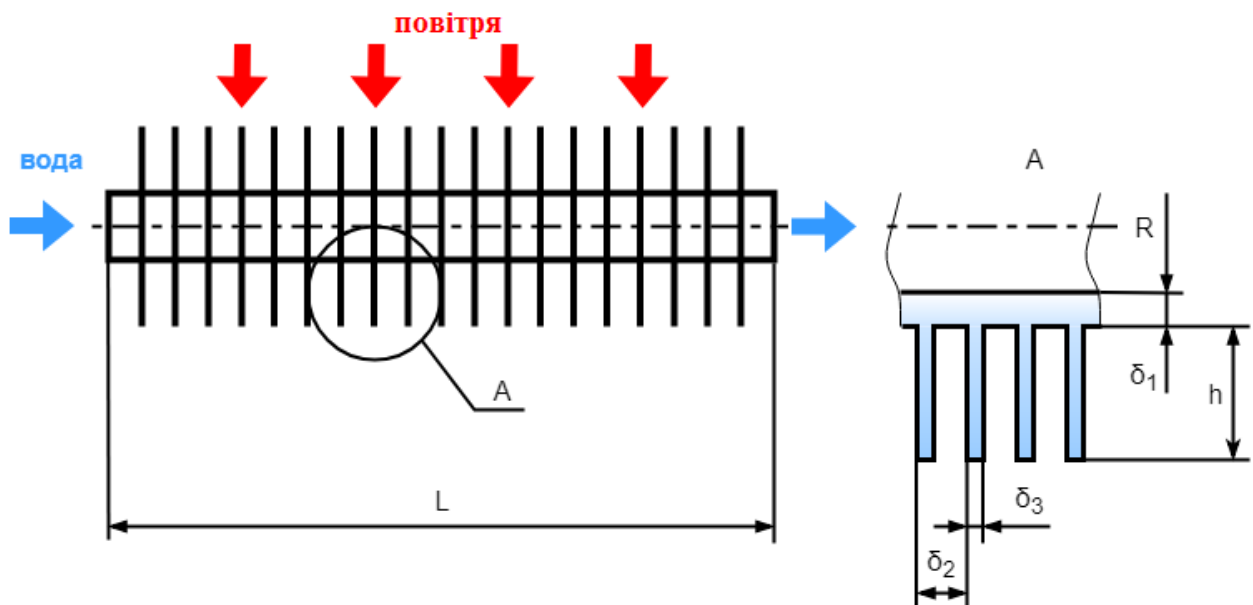


Рисунок 4.1 Оребрена циліндрична труба

$$\alpha_q = \frac{3,4 \cdot p_{\text{sat}}^{0,18}}{1 - 0,0045 \cdot p_{\text{sat}}} \cdot q^{2/3}, \quad (3.41)$$

де  $p_{\text{sat}}$  – тиск насиченої рідини, бар.

Формула застосовна в діапазоні тисків від 1 до 200 бар.

#### 4. ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ

Змістом роботи є розрахунок теплопередачі через оребрену циліндричну трубу (див. рисунок 4.1).

Труба розташована горизонтально. Усередині труби тече насичена вода з початковою температурою  $T_L$ , тиском  $p_2 = p_{\text{sat}}(T_L)$  і швидкістю  $W_2$ . Зовні труба обдувається гарячим повітрям з температурою  $T_p$  і швидкістю  $W_1$  та тиском  $p_1 = 1$  бар. На внутрішньої поверхні труби має місце кипіння, на зовнішньої – вимушена конвекція. Радіаційним теплообміном в порівнянні з конвективними потоками теплоти можливо знехтувати.

Матеріал стінки та ребер труби – сталь 20.

Треба визначити:

тепловий потік через поверхню труби  $Q$ ;

провести аналіз залежності теплового потоку через циліндричну трубу від швидкості руху води, виконав розрахунки зі збільшеною у 2 та 4 рази швидкістю руху води;

провести аналіз залежності теплового потоку від висоти ребер  $h$ , виконав розрахунки зі збільшеною у 2 рази та зі зменшеною у 2 рази висотою ребер;

провести аналіз залежності теплового потоку від швидкості руху повітря, виконав розрахунки зі збільшеною у 2 та зменшеною у 2 рази швидкістю руху повітря.

Вихідні дані до роботи наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Вихідні дані до роботи

№ п/п	L	R	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	h	$W_2$	$W_1$	$T_L$	$T_p$
	м	мм	мм	мм	Мм	мм	м/с	м/с	С	С
1	1	8	1	4	1	15	4	10	200	500
2	1.5	10	1.5	6	1	20	5	9	180	550
3	2	12	2	5	1.5	22	4.5	5	220	525
4	2.5	14	1	5	1.5	16	4	8	190	500
5	1	16	1.5	4	1	18	5	7	210	550
6	1.5	8	2	6	1	20	4.5	6	230	525
7	2	10	1	5	1.5	14	4	10	200	500
8	2.5	12	1.5	5	1.5	15	5	9	180	550
9	1	14	2	4	1	20	4.5	5	220	525
10	1.5	16	1	6	1	22	4	8	190	500

11	2	8	1.5	5	1.5	16	5	7	210	550
12	2.5	10	2	5	1.5	18	4.5	6	230	525
13	1	12	1	4	1	20	4	10	200	500
14	1.5	14	1.5	6	1	14	5	9	180	550
15	2	16	2	5	1.5	15	4.5	5	220	525
16	2.5	8	1	5	1.5	20	4	8	190	500
17	1	10	1.5	4	1	22	5	7	210	550
18	1.5	12	2	6	1	16	4.5	6	230	525
19	2	14	1	5	1.5	18	4	10	200	500
20	2.5	16	1.5	5	1.5	20	5	9	180	550

## 5. АЛГОРИТМ ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКІВ

- 1) Визначаємо властивості повітря за температурою  $T_p$  та тиском  $p_1$ : коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_1$ , густина  $\rho_1$ , коефіцієнт динамічної в'язкості  $\mu_1$ .
- 2) Розрахуємо коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря  $\nu_1 = \mu_1/\rho_1$ .
- 3) Знаходимо:
  - діаметр внутрішнього каналу  $d_1 = 2 \cdot R$ ;
  - зовнішній діаметр трубки  $d_2 = 2 \cdot (R + \delta_1)$ ;
  - зовнішній діаметр ребер  $d_3 = 2 \cdot (R + \delta_1 + h)$ ;
  - площину одного ребра  $F_{p,1} = 2 \cdot \pi \cdot (d_3^2 - d_2^2)/4$ ;
  - кількість ребер  $n_p = L/\delta_2$ ;
  - площину ребер  $F_p = n_p \cdot F_{p,1}$ ;
  - площину міжреберних проміжків  $F_c = \pi \cdot d_2 \cdot (L - n_p \cdot \delta_3)$ ;
  - площину орєбреної поверхні  $F_{p,c} = F_p + F_c$ ;
  - площину внутрішньої поверхні труби  $F_1 = \pi d_1 L$ .
- 4) Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_k$  за формулою (3.27).
- 5) Знаходимо коефіцієнт ефективності ребра за формулою (3.29).
- 6) Наведений коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою (3.28).
- 7) Визначаємо властивості води за температурою  $T_L$ : тиск рідини  $p_2$ , коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_2$ , густина  $\rho_2$ , коефіцієнт динамічної в'язкості  $\mu_2$ , теплоємність води  $c_2$ ,
- 8) Розрахуємо:
  - коефіцієнт кінематичної в'язкості води  $\nu_2 = \mu_2/\rho_2$ ;
  - критерій Прандтля для води  $Pr_L = \mu_2 \cdot c_2 / \lambda_2$ .
- 9) За формулою (3.32) визначаємо критерій Рейнольдса для течії чистої рідини  $Re_{L,d}$ .
- 10) Задаємо температуру внутрішньої поверхні стінки  $T_c$ .
- 11) Визначаємо критерій Прандтля для води при температурі  $T_c$ .

- 12) Якщо  $Re_{L,d} > 10^4$ , знаходимо критерій Нуссельта для течії чистої рідини  $\overline{Nu}_{L,d}$  за формулою (3.33). Якщо  $2000 < Re_{L,d} < 10^4$ , критерій Нуссельта визначаємо за формулою (3.39). Якщо  $Re_{L,d} < 2000$ , в залежності від значення комплексу  $Gr_{d,L} \cdot Pr_L$  для знаходження критерія Нуссельта використовується або формула (3.35), або (3.37).
- 13) За допомогою критерій Нуссельта для течії чистої рідини  $\overline{Nu}_{L,d}$  знаходимо коефіцієнт тепловіддачі чистої рідини  $\alpha_w$ .
- 14) За допомогою формули (3.30) находимо густину теплового потоку на внутрішньої поверхні труби як

$$q = \frac{Q}{F_1} = \frac{T_p - T_L}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{2\lambda_M} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{F_1}{\alpha_{пр} F_{p,c}}}$$

Якщо коефіцієнт тепловіддачі на внутрішньої поверхні труби  $\alpha_1$  ще не визначений, приймаємо  $\alpha_1 \rightarrow \infty$ , відповідно,  $1/\alpha_1 = 0$ .

- 15) За формулою (3.41) визначаємо коефіцієнт тепловіддачі при бульбочковому кипінні у великому об'ємі  $\alpha_q$ .
- 16) За формулою (3.31) знаходимо коефіцієнт тепловіддачі на внутрішньої поверхні труби  $\alpha_1$ .
- 17) За допомогою формули (3.30) находимо густину теплового потоку на внутрішньої поверхні труби як

$$q = \frac{T_p - T_L}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{2\lambda_M} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{F_1}{\alpha_{пр} F_{p,c}}}$$

Якщо його значення відрізняється від значення на попередньої ітерації більш ніж на 1%, повертаємося до пункту 15.

- 18) Знаходимо температуру внутрішньої стінки каналу як

$$T_c = T_L + \frac{q}{\alpha_1}$$

Якщо значення  $T_c$  відрізняється від значення на попередньої ітерації більш ніж на 1 °С, повертаємося до пункту 11.

- 19) За формулою (3.25) знаходимо тепловий потік. Оформлюємо результати розрахунків.

## 6. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ

### 6.1. Вихідні дані

Дано:  $L = 0,9$  м,  $R = 9$  мм,  $\delta_1 = 1$  мм,  $\delta_2 = 3$  мм,  $\delta_1 = 0,8$  мм,  $h = 20$  мм,  $W_2 = 1,2$  м/с,  $W_1 = 8$  м/с,  $T_L = 190$  С,  $T_p = 510$  С (див. рисунок 4.1).

## 6.2. Завдання

Треба знайти тепловий потік через ребрену трубу визначеної геометрії, а також:

провести аналіз залежності теплового потоку через циліндричну трубу від швидкості руху води, виконав розрахунки зі збільшеною у 2 та 4 рази швидкістю руху води;

провести аналіз залежності теплового потоку від висоти ребер  $h$ , виконав розрахунки зі збільшеною у 2 рази та зі зменшеною у 2 рази висотою ребер;

провести аналіз залежності теплового потоку від швидкості руху повітря, виконав розрахунки зі збільшеною у 2 та зменшеною у 2 рази швидкістю руху повітря.

## 6.3. Рішення

Визначаємо: властивості повітря за температурою  $T_p = 510$  С та тиском  $p_1 = 1$  бар:

- коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_1 = 0,05596$  Вт/(м\*К),
- густина  $\rho_1 = 0,4444$  кг/м<sup>3</sup>,
- коефіцієнт динамічної в'язкості  $\mu_1 = 3,596 \cdot 10^{-5}$  Па\*с.

Розрахуємо коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря

$$\nu_1 = \mu_1 / \rho_1 = 3,596 \cdot 10^{-5} / 0,4444 = 8,091 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Знаходимо:

- діаметр внутрішнього каналу  $d_1 = 2 \cdot R = 2 \cdot 9 = 18$  мм;
- зовнішній діаметр трубки  $d_2 = 2 \cdot (R + \delta_1) = 2 \cdot (9 + 1) = 20$  мм;
- зовнішній діаметр ребер  $d_3 = 2 \cdot (R + \delta_1 + h) = 2 \cdot (9 + 1 + 20) = 60$  мм;
- площину одного ребра  $F_{p,1} = 2 \cdot \pi \cdot (d_3^2 - d_2^2) / 4 = 2 \cdot 3,14 \cdot (60^2 - 20^2) / 4 = 5026,6$  мм<sup>2</sup>;
- кількість ребер  $n_p = L / \delta_2 = 900 / 3 = 300$ ;
- площину ребер  $F_p = n_p \cdot F_{p,1} = 300 \cdot 5026,6 = 1,508 \cdot 10^6$  мм<sup>2</sup> = 1,508 м<sup>2</sup>;
- площину міжреберних проміжків  $F_c = \pi \cdot d_2 \cdot (L - n_p \cdot \delta_3) = 3,14 \cdot 0,02 \cdot (0,9 - 300 \cdot 0,0008) = 0,04147$  м<sup>2</sup>;
- площину ребреної поверхні  $F_{p,c} = F_p + F_c = 1,508 + 0,04147 = 1,549$  м<sup>2</sup>;
- площину внутрішньої поверхні труби  $F_1 = \pi d_1 L = 3,14 \cdot 0,02 \cdot 0,9 = 0,05089$  м<sup>2</sup>.

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_k$  за формулою (3.27):

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,78 \cdot 0,223 \frac{\lambda_1}{\delta_2^{0,35}} \left( \frac{d_2}{\delta_2} \right)^{-0,54} \left( \frac{h}{\delta_2} \right)^{-0,14} \left( \frac{W_1}{\nu_1} \right)^{0,65} = \\ &= 0,78 \cdot 0,223 \frac{0,05596}{0,003^{0,35}} \left( \frac{0,02}{0,003} \right)^{-0,54} \left( \frac{0,02}{0,003} \right)^{-0,14} \left( \frac{8}{8,091 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} = \\ &= 36,13 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

Знаходимо коефіцієнт ефективності ребра за формулою (3.29):

$$E = \frac{\text{th}\left(h \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \psi \cdot \alpha_K}{\lambda_M \cdot \delta_1}}\right)}{h \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \psi \cdot \alpha_K}{\lambda_M \cdot \delta_1}}} = \frac{\text{th}\left(0,02 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 36,13}{38 \cdot 0,0008}}\right)}{0,02 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 36,13}{38 \cdot 0,0008}}} = 0,7962.$$

Наведений коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою (3.28):

$$\alpha_{\text{пр}} = \left[1 + \frac{F_p}{F_{p.c}} \cdot (E \cdot \varepsilon_{\Delta} - 1)\right] \cdot \psi \cdot \alpha_K = \left[1 + \frac{1,508}{1,549} \cdot (0,7873 \cdot 1 - 1)\right] \cdot 0,85 \cdot 36,13 = 24,62 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Визначаємо властивості води за температурою  $T_L = 190 \text{ С}$ :

- тиск рідини  $p_2 = 12,72 \text{ бар}$ ;
- коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_2 = 0,6689 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;
- густина  $\rho_2 = 876 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;
- коефіцієнт динамічної в'язкості  $\mu_2 = 1,42 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;
- теплоємність води  $c_2 = 4445 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Розрахуємо коефіцієнт кінематичної в'язкості води  $\nu_2 = \mu_2/\rho_2 = 1,42 \cdot 10^{-4}/876 = 1,621 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Критерій Прандтля для води

$$Pr_L = \mu_2 \cdot c_2 / \lambda_2 = 1,621 \cdot 10^{-7} \cdot 4445 / 0,6689 = 0,944.$$

За формулою (3.32) визначаємо критерій Рейнольдса для течії чистої рідини

$$Re_{L.d.} = W_2 \cdot d_1 / \nu_2 = 1,2 \cdot 0,018 / 1,621 \cdot 10^{-7} = 1,333 \cdot 10^5.$$

$Re_{L.d.} > 10^4$  – турбулентний режим течії.

Задаємо температуру внутрішньої поверхні стінки  $T_c = 200 \text{ С}$ .

Визначаємо критерій Прандтля для води при температурі  $T_c$ :

$$Pr_c = 0,9109.$$

Так як  $Re_{L.d.} > 10^4$ , знаходимо критерій Нуссельта для течії чистої рідини  $\overline{Nu}_{L.d}$  за формулою (3.33):

$$\begin{aligned} \varepsilon_L &= 1 + 2 \cdot \frac{d}{L} = 1 + 2 \cdot \frac{0,018}{0,9} = 1,02; \\ \overline{Nu}_{L.d} &= 0,021 \cdot Re_{L.d.}^{0,8} \cdot Pr_L^{0,43} \left(\frac{Pr_L}{Pr_c}\right)^{0,25} \varepsilon_L = \\ &= 0,021 \cdot (1,333 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot (0,9437)^{0,43} \cdot \left(\frac{0,9437}{0,9109}\right)^{0,25} \cdot 1,02 = 265,2. \end{aligned}$$

За допомогою критерій Нуссельта для течії чистої рідини  $\overline{Nu}_{L.d}$  знаходимо коефіцієнт тепловіддачі чистої рідини  $\alpha_w$ :

$$\alpha_w = \frac{\overline{Nu}_L \cdot d \cdot \lambda_2}{d_1} = \frac{265,2 \cdot 0,6689}{0,018} = 9855 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

За допомогою формули (3.30) знаходимо перше наближення до густини теплового потоку на внутрішньої поверхні труби:

$$q = \frac{T_p - T_L}{\frac{d_1}{2\lambda_M} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{F_1}{\alpha_{пр} F_{p,c}}} = \frac{510 - 190}{\frac{0,018}{2 \cdot 38} \cdot \ln\left(\frac{0,020}{0,018}\right) + \frac{0,05089}{24,62 \cdot 1,549}} = 2,352 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

За формулою (3.41) визначаємо коефіцієнт тепловіддачі при бульбачковому кипінні у великому об'ємі  $\alpha_q$ :

$$\alpha_q = \frac{3,4 \cdot p_{sat}^{0,18}}{1 - 0,0045 \cdot p_{sat}} \cdot q^{2/3} = \frac{3,4 \cdot 12,72^{0,18}}{1 - 0,0045 \cdot 12,72} \cdot (2,352 \cdot 10^5)^{2/3} = 21809 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

За формулою (3.31) знаходимо коефіцієнт тепловіддачі на внутрішньої поверхні труби  $\alpha_1$ :

$$\alpha_q / \alpha_w = 21809 / 9855 = 2,21 > 2, \text{ відповідно, } \alpha_1 = \alpha_q = 21809 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Визначаємо друге наближення до густини теплового потоку на внутрішньої поверхні труби:

$$q = \frac{T_p - T_L}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{2\lambda_M} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{F_1}{\alpha_{пр} F_{p,c}}} = \frac{510 - 190}{\frac{1}{21809} + \frac{0,018}{2 \cdot 38} \cdot \ln\left(\frac{0,020}{0,018}\right) + \frac{0,05089}{24,62 \cdot 1,549}} = 2,275 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Це значення відрізняється від значення на попередньої ітерації на 3,4%, що більш ніж на 1%, тому за формулою (3.41) визначаємо коефіцієнт тепловіддачі при бульбачковому кипінні у великому об'ємі  $\alpha_q$ :

$$\alpha_q = \frac{3,4 \cdot p_{sat}^{0,18}}{1 - 0,0045 \cdot p_{sat}} \cdot q^{2/3} = \frac{3,4 \cdot 12,72^{0,18}}{1 - 0,0045 \cdot 12,72} \cdot (2,275 \cdot 10^5)^{2/3} = 21332 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

За формулою (3.31) знаходимо коефіцієнт тепловіддачі на внутрішньої поверхні труби  $\alpha_1$ :

$$\alpha_q / \alpha_w = 21332 / 9855 = 2,16 > 2, \text{ відповідно, } \alpha_1 = \alpha_q = 21332 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Визначаємо третє наближення до густини теплового потоку на внутрішньої поверхні труби:

$$q = \frac{T_p - T_L}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{2\lambda_M} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{F_1}{\alpha_{пр} F_{p,c}}} = \frac{510 - 190}{\frac{1}{21332} + \frac{0,018}{2 \cdot 38} \cdot \ln\left(\frac{0,020}{0,018}\right) + \frac{0,05089}{24,62 \cdot 1,549}} = 2,274 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Це значення відрізняється від значення на попередньої ітерації на 0,07%, що менш ніж на 1%, тому знаходимо температуру внутрішньої стінки каналу як

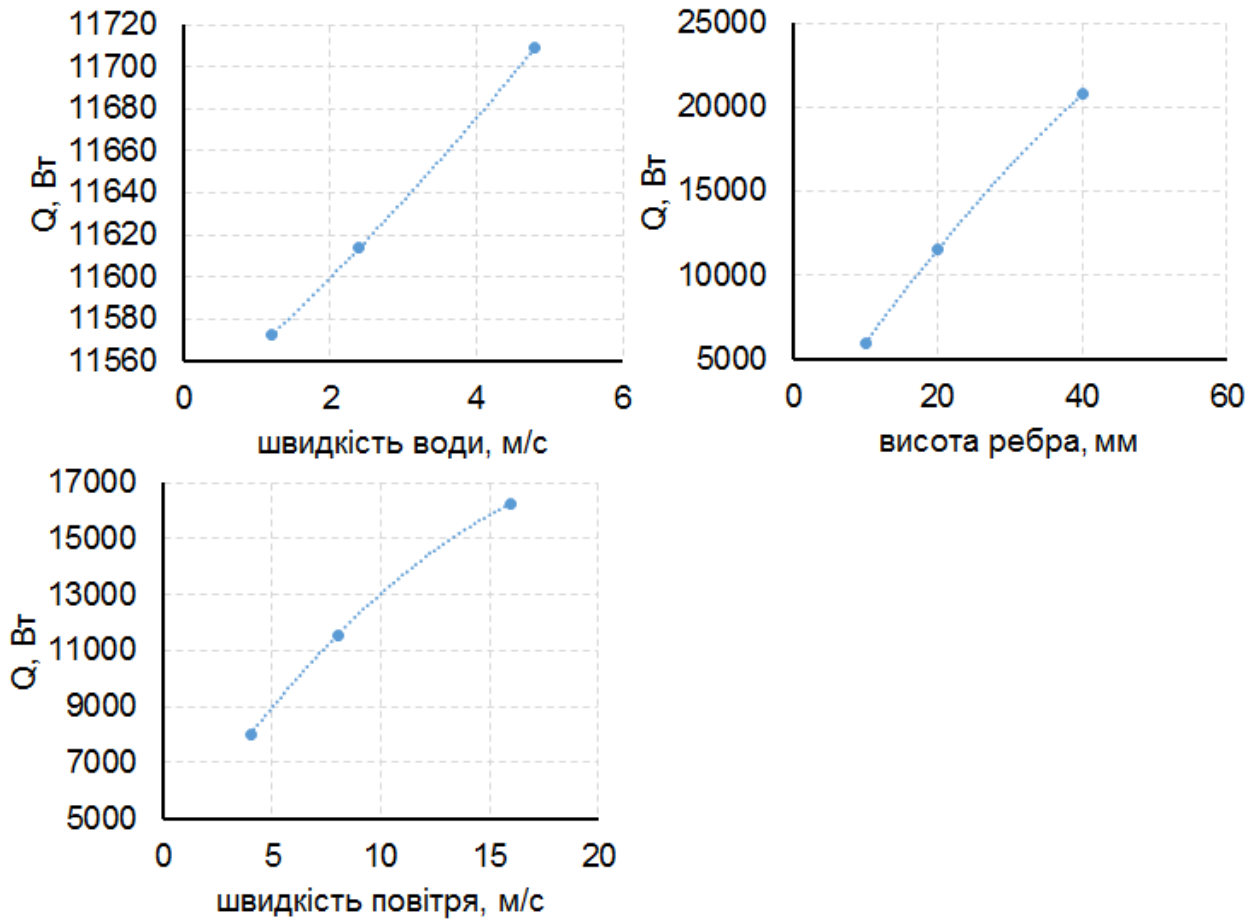


Рисунок 6.1 Результати розрахунків

$$T_c = T_L + \frac{q}{\alpha_1} = 190 + \frac{2,274 \cdot 10^5}{21332} = 200,7 \text{ К.}$$

Якщо значення  $T_c$  відрізняється від значення на попередньої ітерації менш ніж на  $1^\circ\text{C}$ , тому приймаємо це значення.

За формулою (3.25) знаходимо тепловий потік:

$$Q = \frac{T_p - T_L}{\frac{1}{\alpha_1 F_1} + \frac{d_1}{2\lambda_M F_1} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{\alpha_{пр} F_{p,c}}} =$$

$$= \frac{510 - 190}{\frac{1}{21332 \cdot 0,0509} + \frac{0,018}{2 \cdot 38 \cdot 0,0509} \cdot \ln\left(\frac{0,020}{0,018}\right) + \frac{1}{24,62 \cdot 1,549}} = 11572 \text{ Вт.}$$



Повторюємо розрахунки при інших вихідних даних. Результати розрахунків зведемо у табл. 6.1 та наведемо на рисунку 6.1.

Таблиця 6.1. Результати розрахунків

h	$W_2$	$W_1$	Q
мм	м/с	м/с	Вт
20	1.2	8	11572
20	2.4	8	11614
20	4.8	8	11709
10	1.2	8	5943
20	1.2	8	11572
40	1.2	8	20779
20	1.2	4	8008
20	1.2	8	11572
20	1.2	16	16255

### Додаток А. Фізичні властивості води на лінії насичення

T, C	p, бар	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\beta \cdot 10^4$ , K <sup>-1</sup>	$C_p$ , кДж/(кг*К)	$\mu$ , мкПа*с	$\lambda$ , Вт/(м*К)	$\sigma$ , Н*м
0.01	0.0061165	999.79	-0.63	4.2199	1791.2	0.561	0.075646
10	0.01229	999.65	0.7	4.1955	1305.6	0.58	0.07422
20	0.023408	998.16	1.82	4.1844	1001.4	0.5984	0.072735
30	0.042494	995.6	3.21	4.1801	797.19	0.6155	0.071193
40	0.073889	992.17	3.87	4.1796	652.85	0.6306	0.069595
50	0.12358	987.99	4.49	4.1816	546.74	0.6436	0.067942
60	0.19956	983.16	5.11	4.1851	466.31	0.6544	0.066237
70	0.31214	977.73	5.7	4.1902	403.82	0.6631	0.064479
80	0.47434	971.76	6.32	4.1969	354.29	0.67	0.062671
90	0.70208	965.29	6.95	4.2053	314.36	0.6753	0.060814
100	1.0145	958.34	7.52	4.2157	281.71	0.6791	0.05891
110	1.4343	950.94	8.08	4.2283	254.67	0.6817	0.05696
120	1.9874	943.1	8.64	4.2435	232.03	0.6832	0.054966
130	2.7036	934.83	9.19	4.2615	212.88	0.6837	0.05293
140	3.6164	926.13	9.72	4.2826	196.53	0.6833	0.050854
150	4.7629	917	10.3	4.3071	182.45	0.682	0.048739
160	6.1839	907.44	10.7	4.3354	170.23	0.68	0.046589
170	7.9238	897.44	11.3	4.3679	159.54	0.6771	0.044404
180	10.03	886.99	12.6	4.405	150.13	0.6733	0.042188
190	12.555	876.06	13.3	4.4474	141.77	0.6688	0.039943
200	15.553	864.65	14.1	4.4959	134.31	0.6633	0.037672
210	19.081	852.71	14.8	4.5513	127.6	0.657	0.035378
220	23.2	840.21	14.8	4.6147	121.51	0.6496	0.033064
230	27.976	827.11	15.9	4.6876	115.96	0.6413	0.030734
240	33.475	813.35	16.8	4.772	110.85	0.6318	0.028391
250	39.768	798.88	18.1	4.8702	106.11	0.6212	0.026041
260	46.93	783.61	19.7	4.9857	101.68	0.6092	0.023687
270	55.038	767.44	21.6	5.1232	97.493	0.5959	0.021334
280	64.176	750.26	23.7	5.2891	93.502	0.5811	0.018991
290	74.429	731.89	26.2	5.4933	89.653	0.5649	0.016662
300	85.891	712.12	29.2	5.7507	85.892	0.5474	0.014357
310	98.664	690.65	32.9	6.0852	82.164	0.5287	0.012087
320	112.86	667.07	38.2	6.5379	78.404	0.5092	0.009862
330	128.6	640.75	43.3	7.1871	74.531	0.4891	0.007701
340	146.03	610.64	53.4	8.2093	70.427	0.4685	0.005624
350	165.31	574.67	66.8	10.119	65.872	0.4474	0.003664
360	186.68	527.54	109	15.013	60.323	0.4257	0.001876
370	210.46	451.31	264	45.276	52.057	0.4251	0.000387

**Додаток Б. Фізичні властивості повітря при  $p = 1$  бар**

<b>T, C</b>	<b><math>v</math>, м<sup>3</sup>/кг</b>	<b><math>\lambda</math>, Вт/(м*К)</b>	<b><math>\mu</math>, мкПа*с</b>	<b><math>C_p</math>, кДж/(кг*К)</b>	<b>Pr</b>
0	0.7838	0.02408	17.20	1008.6	0.7205
10	0.8125	0.02487	17.69	1008.7	0.7177
20	0.8413	0.02564	18.17	1008.9	0.7151
30	0.8701	0.02638	18.65	1009.2	0.7135
40	0.8989	0.02710	19.11	1009.6	0.7122
50	0.9276	0.02781	19.57	1010.1	0.7109
60	0.9564	0.02852	20.03	1010.6	0.7097
70	0.9852	0.02922	20.47	1011.2	0.7087
80	1.0139	0.02991	20.91	1011.9	0.7077
90	1.0426	0.03059	21.35	1012.7	0.7068
100	1.0713	0.03127	21.78	1013.6	0.7059
110	1.1000	0.03194	22.20	1014.6	0.7051
120	1.1287	0.03261	22.62	1015.6	0.7044
130	1.1575	0.03328	23.03	1016.7	0.7037
140	1.1862	0.03394	23.44	1017.9	0.7031
150	1.2149	0.03459	23.84	1019.2	0.7025
160	1.2437	0.03524	24.24	1020.6	0.7020
170	1.2724	0.03589	24.64	1022.0	0.7015
180	1.3011	0.03654	25.03	1023.5	0.7010
190	1.3299	0.03718	25.41	1025.1	0.7007
200	1.3586	0.03781	25.79	1026.8	0.7003
210	1.3873	0.03845	26.17	1028.5	0.7000
220	1.4161	0.03908	26.54	1030.3	0.6997
230	1.4448	0.03971	26.91	1032.1	0.6995
240	1.4735	0.04033	27.27	1034.0	0.6993
250	1.5022	0.04095	27.64	1036.0	0.6992
260	1.5309	0.04157	27.99	1038.0	0.6991
270	1.5597	0.04218	28.35	1040.1	0.6990
280	1.5884	0.04279	28.70	1042.2	0.6989
290	1.6171	0.04340	29.05	1044.3	0.6989
300	1.6458	0.04401	29.39	1046.5	0.6989
310	1.6745	0.04461	29.73	1048.7	0.6990
320	1.7032	0.04521	30.07	1051.0	0.6990
330	1.7320	0.04584	30.41	1053.2	0.6986
340	1.7607	0.04638	30.74	1055.5	0.6996
350	1.7894	0.04692	31.07	1057.8	0.7005
360	1.8181	0.04747	31.40	1060.2	0.7012
370	1.8468	0.04802	31.72	1062.5	0.7018
380	1.8755	0.04858	32.04	1064.9	0.7023
390	1.9042	0.04915	32.36	1067.3	0.7027

400	1.9330	0.04972	32.68	1069.6	0.7030
410	1.9617	0.05029	32.99	1072.0	0.7033
420	1.9904	0.05086	33.30	1074.4	0.7035
430	2.0191	0.05144	33.61	1076.8	0.7036
440	2.0478	0.05201	33.92	1079.2	0.7037
450	2.0765	0.05259	34.22	1081.6	0.7039
460	2.1052	0.05316	34.52	1084.0	0.7040
470	2.1340	0.05373	34.82	1086.3	0.7040
480	2.1627	0.05431	35.12	1088.7	0.7041
490	2.1914	0.05487	35.42	1091.1	0.7042
500	2.2201	0.05544	35.71	1093.4	0.7043
510	2.2488	0.05601	36.00	1095.7	0.7044
520	2.2775	0.05657	36.29	1098.1	0.7045
530	2.3062	0.05713	36.58	1100.4	0.7046
540	2.3349	0.05768	36.87	1102.7	0.7047
550	2.3636	0.05824	37.15	1104.9	0.7048
560	2.3924	0.05879	37.43	1107.2	0.7050
570	2.4211	0.05933	37.71	1109.4	0.7052
580	2.4498	0.05987	37.99	1111.7	0.7054
590	2.4785	0.06041	38.27	1113.9	0.7056
600	2.5072	0.06094	38.54	1116.0	0.7058

## Бібліографічний список

1. Порядок оформления учебных и научно-исследовательских документов / В.Н. Павленко, А.С. Набатов, И.М. Тараненко. – Учеб. пособие. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 65 с.
2. ДСТУ 3008:2015 Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с.
3. Краткий курс теплопередачи: учеб. для вузов / М.А. Михеев, И.М. Михеева - М.; Л.:Госэнергоиздат,1977. - 345 с.
4. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. - М., Энергоиздат, 1981. – 486 с.
5. Теплообмен поперечно-оребрённых труб / В.Ф. Юдин. – Л.: Машиностроение, 1982. – 189 с.
6. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 419 с.
7. Бухмиров В.В. Расчет коэффициента теплоотдачи (справочник). – Иваново, 2007.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць і скорочень .....	3
Вступ .....	8
1. Склад і зміст курсової роботи .....	9
2. Оформлення курсової роботи .....	9
3. Основні залежності та розрахункові формули.....	12
3.1. Теплопровідність через циліндричну стінку.....	12
3.2. Теплопровідність в ребрі постійного перетину .....	12
3.3. Теплопередача через ребрену стінку.....	14
3.4. Теплопередача через ребрену трубу.....	15
3.5. Розрахунок тепловіддачі при бульбачковому кипінні в умовах вимушеної конвекції в трубах .....	17
4. Вихідні дані для розрахункової роботи .....	20
5. Алгоритм виконання розрахунків.....	21
6. Приклад виконання розрахункової роботи.....	22
6.1. Вихідні дані .....	22
6.2. Завдання.....	23
6.3. Рішення.....	23
Додаток А. Фізичні властивості води на лінії насичення .....	28
Додаток Б. Фізичні властивості повітря при $p = 1$ бар .....	29
Бібліографічний список .....	31
Зміст .....	32

**Єпіфанов Костянтин Сергійович**

**РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ  
ЧЕРЕЗ ОРЕБРЕНУ ТРУБУ**

Методичні вказівки до виконання курсової роботи до дисципліни «Тепломасообмін»

**Св. план**

**Підписано у печать**

**Формат 60x84 1/16. Бум. офс. №2. Офс. печ.**

**Усл. печ. л. 1,8. Уч.-ізд. л. 1,8. Т. 100 екз. Замовлення .**

**Ціна вільна**

---

**Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського**

**«Харківський авіаційний інститут»**

**61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17**

**<http://www.khai.edu>**

**Видавничий центр "ХАІ"**

**61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17**

**[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)**