

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ СПІВІСНУВАННІ РІЗНИХ РЕЖИМІВ КИПІННЯ НА ОРЕБРЕНІЙ СТІНЦІ

Мариненко В. І., Давиденко Б. В.

Об'єктом дослідження є розрахунково-експериментальна методика визначення та ідентифікації коефіцієнтів тепловіддачі на оребреній стінці за умов співіснування різних режимів кипіння води, що вимушено рухається. Особливістю охолодження оребренених поверхонь при кипінні є те, що кипіння здійснюється на неізотермічній поверхні. В зв'язку з цим на елементах поверхні – «ребро-стінка», в загальному випадку, можуть одночасно співіснувати конвекційний теплообмін, бульбашкове, перехідне та плівкове кипіння. Однією з проблем, що необхідно вирішити, є обґрунтування та розробка нової методики визначення розподілу коефіцієнтів тепловіддачі по поверхні ребра при співіснуванні різних режимів кипіння на оребреній стінці..

В основі більшості методів розрахунку теплообміну на оребренених поверхнях є припущення про те, що коефіцієнт тепловіддачі в заданій точці неізотермічної поверхні є функцією тільки температурного напору між поверхнею та рідиною в цій точці. Для відпрацювання методики розрахункового визначення коефіцієнтів тепловіддачі були проведені експериментальні дослідження теплообміну на оребреній стінці. В основі розрахункової частини методики, що пропонується, лежить чисельний метод визначення температурного поля в системі «ребро-стінка» при постійному підведенні теплоти зі сторони гладкої стінки. Передбачається, що зі сторони обігріву густина теплового потоку – постійна та при даних геометричних розмірах, умовах охолодження та коефіцієнті теплопровідності матеріалу – ребра покращують теплопередачу.

В роботі наведено основні етапи реалізації розрахунково-експериментальної методики. На відміну від більшості відомих методів розв'язання обернених задач, запропонований метод, що ґрунтується на використанні матричної прогонки, дозволяє не застосовувати ітераційний процес для визначення коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях ребер, що забезпечує швидке отримання результату з більш високою точністю.

Ключові слова: оребрена стінка, коефіцієнт тепловіддачі, режими кипіння, елемент поверхні – «ребро-стінка», чисельний метод, визначення температурного поля.

1. Вступ

В теперішній час в техніці все ширше застосовується оребрення поверхонь, що охолоджуються киплячою рідиною. Практика показує, що в цьому випадку тепловий потік, який надходить на поверхню, що несе ребра,

розсіюється оребреною стінкою. Густина теплового потоку, що підводиться, може при цьому суттєво перевищувати першу критичну густину теплового потоку при кипінні на ізотермічній поверхні. Ця обставина робить спосіб охолодження оребрених поверхонь киплячою рідиною перспективним у багатьох галузях техніки.

Особливістю охолодження оребрених поверхонь при кипінні є те, що кипіння здійснюється на неізотермічній поверхні. В зв'язку з цим на елементах поверхні – «ребро-стінка», в загальному випадку, можуть одночасно співіснувати, конвекційний теплообмін, бульбашкове, перехідне та плівкове кипіння. Перша спроба передбачити коефіцієнт тепловіддачі від ребра за умов кипіння води показана в [1]. Методи вирішення задач теплопровідності для ребра за умов кипіння рідини у великому об'ємі в одновимірній постановці представлено в роботах [2–4]. Задача у двовимірній постановці розглядалася в [5, 6]. В основі більшості методів теплового розрахунку оребрених поверхонь лежить припущення про те, що коефіцієнт тепловіддачі α в заданій точці неізотермічної поверхні є функцією тільки різниці між температурою поверхні ребра t_w та температурою насичення t_{sat} . Згідно з [5, 7] залежність коефіцієнта тепловіддачі α від $\vartheta = t_w - t_{sat}$ при кипінні води в міжреберному каналі в умовах великого об'єму має вигляд:

$$\alpha(\vartheta) = \begin{cases} 1169,61 \cdot \vartheta^{1/3} & 0 \leq \vartheta < 5 \text{ К} \\ 80 \cdot \vartheta^2 & 5 \text{ К} \leq \vartheta < 25 \text{ К} \\ 7,8125 \cdot 10^8 \cdot \vartheta^{-3} & 25 \text{ К} \leq \vartheta < 146 \text{ К} \\ 251,033 & \vartheta \geq 146 \text{ К} \end{cases} \quad (1)$$

В теперішній час розв'язання обернених задач теплопровідності широко використовують для визначення коефіцієнтів тепловіддачі та нелінійних теплофізичних характеристик по експериментально визначеній температурі на поверхні або всередині матеріалу [8, 9]. Таким чином, *об'єктом дослідження* обрано розрахунково-експериментальну методика визначення та ідентифікації коефіцієнтів тепловіддачі на оребреній стінці за умов співіснування різних режимів кипіння води, що вимушено рухається. *А мета роботи* полягає в розробці надійного алгоритму визначення коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях ребер за результатами вимірювання температури на поверхні симетрії ребра, який не вимагає застосування методу ітерацій.

2. Методика проведення досліджень

В даній роботі пропонується розрахунково-експериментальна методика визначення та ідентифікації коефіцієнтів тепловіддачі на оребреній стінці за умов співіснування різних режимів кипіння води, що вимушено рухається.

Для відпрацювання методики були проведені експериментальні дослідження теплообміну на оребреній стінці. Схема розташування термопар по висоті ребер показана на рис. 1. Таке розташування термопар зроблено,

виходячи з припущення, що розподіл температур по висоті кожного ребра однаковий при сталому режимі теплообміну. Схема експериментальної установки представлена на рис. 2.

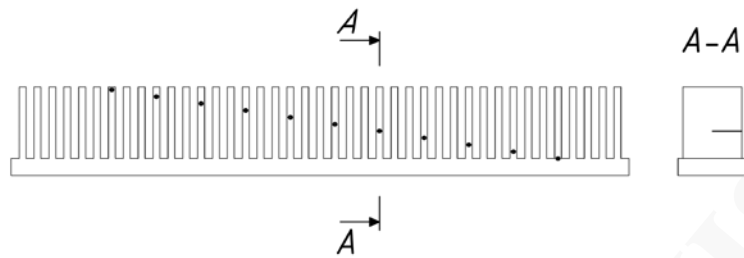


Рис. 1. Схема розташування термопар в орбреній стінці

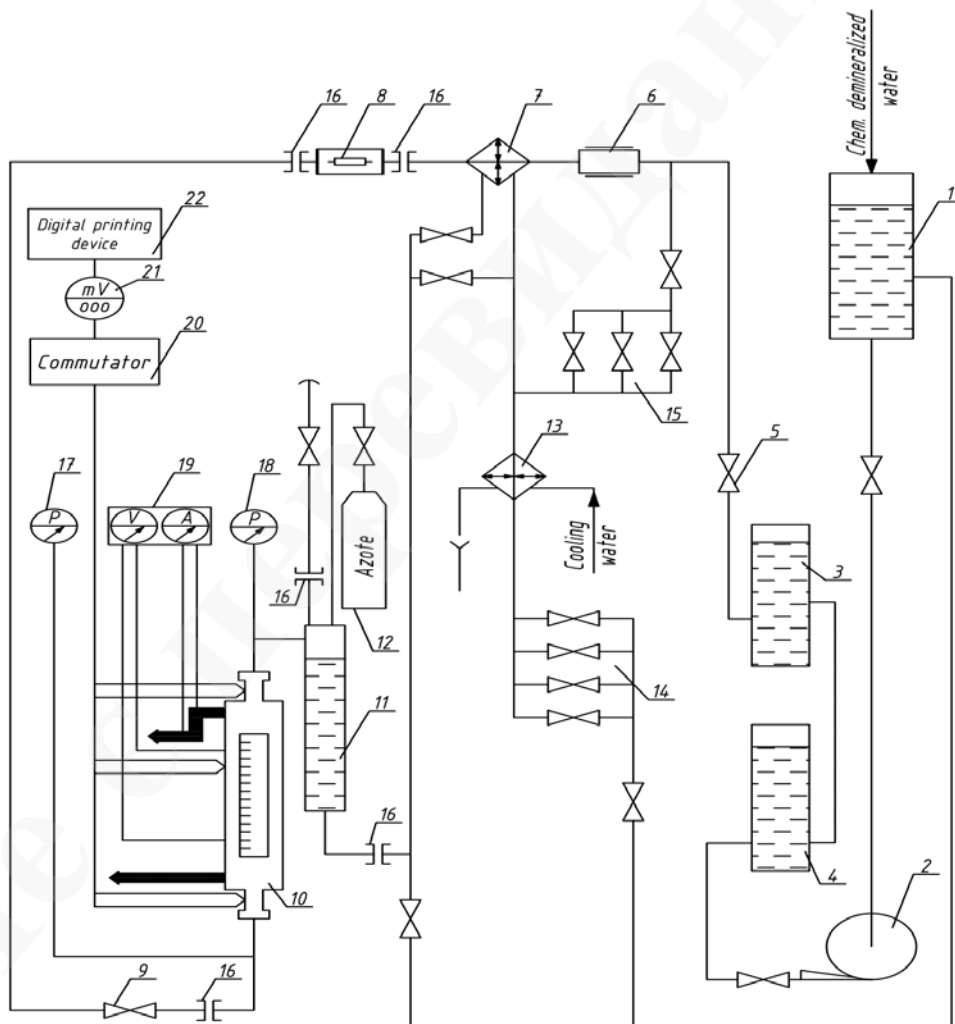


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 – бак для води; 2 – відцентровий насос; 3, 4 – буферні ємності; 5, 9 – дросельний вентиль; 6 – турбінний датчик витрати; 7 – теплообмінник; 8 – електронагрівач; 10 – робоча ділянка; 11 – демпферна ємність; 12 – балон з азотом; 13 – холодильник; 14 – гребінка дрослюючих вентилів; 15 – гребінка регулюючих вентилів; 16 – електроізоляційні фланці; 17, 18 – манометр класу 0,16 (СРСР); 19 – стрілочний мілівольтметр М1108 класу 0,2 (СРСР); 20 – комутатор Ф240/1 (СРСР); 21 – цифровий вольтметр Щ68000 (СРСР); 22 – цифродрукуючий пристрій Щ6800К (СРСР)

В основі розрахункової частини методики, що пропонується, лежить чисельний метод визначення температурного поля в системі «ребро-стінка» при постійному підведенні теплоти зі сторони гладкої стінки, рис. 3.

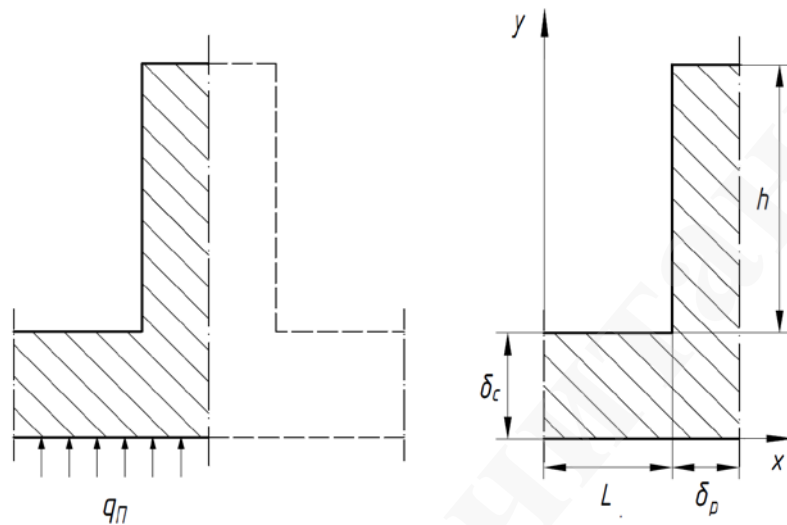


Рис. 3. Елемент оребреної поверхні – «ребро-стінка»

Аналітичний метод визначення температурного поля для середніх коефіцієнтів тепловіддачі на поверхні елементу «ребро-стінка» наведено у роботі [10], а чисельний – у роботі [11].

Розглядається теплопередача через елемент оребреної стінки, рис. 3, розташований між двома перетинами, що нормальні до несучої стінки. Один з перетинів проходить через середину міжреберних каналів, а інший – через середину ребра. Приймається, що вказані перетини є адіабатними поверхнями. Передбачається, що зі сторони обігріву густина теплового потоку – постійна та при даних геометричних розмірах, умовах охолодження та коефіцієнті теплопровідності матеріалу λ ребра покращують теплопередачу.

Температурне поле області, що розглядається, описується рівнянням:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0, \quad (2)$$

з граничними умовами:

$$y = 0; 0 \leq x \leq L + \delta_p : -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q_n, \quad (3)$$

$$y = \delta_c; 0 \leq x \leq L : -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_c (T - T_\infty), \quad (4)$$

$$y = \delta_c + h; L \leq x \leq L + \delta_p : \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

$$x = 0; 0 \leq y \leq \delta_c : \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad (6)$$

$$x = L + \delta_p; 0 \leq y \leq \delta_c + h : \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad (7)$$

$$x = L; \delta_c \leq y \leq \delta_c + h : \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_p (T - T_\infty), \quad (8)$$

де $\alpha_c = \alpha_c(x)$ – розподіл коефіцієнтів тепловіддачі по поверхні стінки;
 $\alpha_p = \alpha_p(y)$ – розподіл коефіцієнтів тепловіддачі вздовж поверхні ребра.

За заданих геометричних розмірах орбреної стінки, відомих значеннях температури теплоносія T_∞ , коефіцієнту теплопровідності λ , густини теплового потоку, що підводиться до стінки q_n та за відомих функціях $\alpha_c(x)$; $\alpha_p(y)$ рівняння (2) з граничними умовами (3)–(8) має єдиний розв'язок, що може бути знайденим чисельним методом. Але у завданні, що розглядається, функція $\alpha_p(y)$ підлягає визначенню. Тому замість умови (8) задається умова:

$$x = L + \delta_p; \delta_c \leq y \leq \delta_c + h : T = T_{exp}(y), \quad (9)$$

де $T_{exp}(y)$ – визначений з експерименту розподіл температури по адіабатичній площині, що проходить через середину ребра.

Таким чином, замість умови тепловіддачі на поверхні ребра (8) задаються дві граничні умови (7) та (9) при $x = L + \delta_p$. При цьому умова (7) відноситься до всієї площини симетрії $0 \leq y \leq \delta_c + h$, а умова (9) – лише до її частини $\delta_c \leq y \leq \delta_c + h$.

Задача в наведеній постановці відноситься до обернених задач теплопровідності. Для її розв'язання застосовується метод скінчених різниць. Для цього в розрахунковій області $0 \leq x \leq L + \delta_p$; $0 \leq y \leq \delta_c + h$ будується рівномірна прямокутна сітка з кроком $h_x = (L + \delta_p) / N$ вздовж осі OX та з кроком $h_y = (\delta_c + h) / M$ вздовж осі OY (M ; N – кількість кроків вздовж осей OY та OX відповідно). В центрах прямокутних елементів сітки розташовуються вузли, до яких відносяться дискретні значення температури $T_{i,j}$. Рівняння теплопровідності (2) апроксимуються скінченими різницями:

$$\frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{h_y^2} + \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{h_x^2} = 0,$$

де i ; j – номери вузла сітки вздовж осей OY та OX відповідно. Після перетворень воно записується у вигляді:

$$T_{i,j+1} + \gamma \cdot T_{i+1,j} + \eta \cdot T_{i,j} + \gamma \cdot T_{i-1,j} + T_{i,j-1} = 0, \quad (10)$$

де $\gamma = h_x^2 / h_y^2$; $\eta = -2(\gamma + 1)$.

Для розв'язання системи рівнянь (10) розрахункову область доцільно розподілити на три характерні ділянки. Ділянка 1 включає ту частину стінки, з якої відбувається тепловіддача до теплоносія. Вона містить вузли сітки з номерами:

$$1 \leq i \leq i_c; 1 \leq j \leq j_c,$$

де i_c – номери граничних вузлів сітки, що знаходяться найближче до зовнішньої поверхні стінки, яка контактує з теплоносієм; j_c – номери вузлів сітки, що відповідають координаті $x = L - h_x / 2$. Ділянка 2 містить вузли сітки, що відносяться до області ребра. Номери вузлів сітки, що містяться на ділянці 2 відповідають значенням: $i_c + 1 \leq i \leq M$; $j_c + 1 \leq j \leq N$. До ділянки 3 відноситься частина стінки, що знаходиться під ребром. Ця ділянка містить вузли з номерами $1 \leq i \leq i_c$; $j_c + 1 \leq j \leq N$.

У відповідності з наведеними позначеннями для граничних вузлів сітки, складається скінчено-різницева апроксимація граничних умов (3)–(7), (9):

$$i = 1; 1 \leq j \leq N: T_{0,j} = T_{1,j} + \frac{q_n h_y}{\lambda}, \quad (11)$$

$$i = i_c; 1 \leq j \leq j_c: -\lambda \frac{T_{i_c+1,j} - T_{i_c,j}}{h_y} = \alpha_{i_c,j} \left(\frac{T_{i_c+1,j} + T_{i_c,j}}{2} - T_\infty \right), \quad (12)$$

$$i = M; j_c + 1 \leq j \leq N: T_{M,j} = T_{M+1,j}, \quad (13)$$

$$j = 1; 1 \leq i \leq i_c: T_{i,0} = T_{i,1}, \quad (14)$$

$$j = N; 1 \leq i \leq M: T_{i,N+1} = T_{i,N}, \quad (15)$$

$$j = N; i_c + 1 \leq i \leq M: \frac{T_{i,N} + T_{i,N+1}}{2} = T_{exp,i}. \quad (16)$$

На поверхні ребра граничні умови не визначені, але умовно на цій поверхні можна прийняти:

$$j = j_c + 1; i_c + 1 \leq i \leq M: \frac{T_{i,j_c} + T_{i,j_c+1}}{2} = T_{w,i}, \quad (17)$$

де $T_{w,i}$ – невідомі дискретні значення температури поверхні ребра, що підлягають визначенню.

Розв'язання системи різницевої рівнянь (10) починається з ділянки 1, що відноситься до ділянки стінки поза ребром. На цій ділянці рівняння (10), що

складені для вузлів з номерами $i=1$, записуються з врахуванням граничних умов (11). Для вузлів з номерами $i=i_c$, $j \leq j_c$ рівняння (10) записується з врахуванням граничних умов (12). На ділянці 1 для деякого кроку сітки j ($1 \leq j \leq j_c$) система рівнянь (10), що складена для $1 \leq i \leq i_c$ записується у векторній формі:

$$\mathbf{T}_{j+1} + B_j \cdot \mathbf{T}_j + \mathbf{T}_{j-1} = \mathbf{F}_j, \quad (1 \leq j \leq j_c), \quad (18)$$

де $\mathbf{T}_j[1:i_c]$ – вектор, складовими якого є сіточні функції $T_{i,j}$ ($1 \leq i \leq i_c$); $B_j[1:i_c, 1:i_c]$ – тридіагональна матриця, що містить коефіцієнти рівнянь (10); $\mathbf{F}_j[1:i_c]$ – вектор, складовими якого є праві частини зазначених рівнянь.

Система векторних рівнянь (18) розв'язується методом матричної прогонки. Для цього складається лінійне співвідношення між сусідніми векторами \mathbf{T}_{j-1} та \mathbf{T}_j . Для ділянки 1 це співвідношення має вигляд:

$$\mathbf{T}_{j-1} = P_{j-1} \cdot \mathbf{T}_j + \mathbf{Q}_{j-1}. \quad (19)$$

Матриці $P_j[1:i_c, 1:i_c]$ та вектори $\mathbf{Q}_j[1:i_c]$ підлягають визначенню з системи векторних рівнянь (18). Для цього вираз (19) підставляється в рівняння (18), що розв'язується відносно \mathbf{T}_j :

$$\mathbf{T}_j = -\left(B_j + P_{j-1}\right)^{-1} \cdot \mathbf{T}_{j+1} + \left(B_j + P_{j-1}\right)^{-1} \cdot \left(\mathbf{F}_j - \mathbf{Q}_{j-1}\right). \quad (20)$$

З порівняння виразів (20) та (19) випливають співвідношення:

$$P_j = -\left(B_j + P_{j-1}\right)^{-1}, \quad (21)$$

$$\mathbf{Q}_j = \left(B_j + P_{j-1}\right)^{-1} \cdot \left(\mathbf{F}_j - \mathbf{Q}_{j-1}\right). \quad (22)$$

Система різницевих рівнянь (10) для ділянок 2 та 3 ($j \geq j_c + 1$) узагальнюється векторним рівнянням:

$$\mathbf{T}_{j+1} + B_j \cdot \mathbf{T}_j + \mathbf{T}_{j-1} = \mathbf{F}_j; \quad (j_c + 1 \leq j \leq M), \quad (23)$$

у якому $B_j[1:M, 1:M]$ – тридіагональна матриця, що містить коефіцієнти відповідних різницевих рівнянь.

Для вузлів з номерами $j=j_c+1$, $i_c+1 \leq i \leq M$, які відносяться до області ребра та знаходяться найближче до його поверхні теплообміну, скінчено-різницеve рівняння теплопровідності (10) доповнюється умовою (17), яка у векторній формі має вигляд:

$$\mathbf{T}_{j_c} = -\mathbf{T}_{j_c+1} + 2\mathbf{T}_w. \quad (24)$$

Вектор \mathbf{T}_w містить невідомі значенням температури на поверхні ребра.

Для вузлів з номерами $j=j_c+1$, $1 \leq i \leq i_c$ лінійне співвідношення між сусідніми векторами \mathbf{T}_{j_c} та \mathbf{T}_{j_c+1} , що застосовується для ділянки 1, має вигляд:

$$\mathbf{T}_{j_c} = P_{j_c} \cdot \mathbf{T}_{j_c+1} + \mathbf{Q}_{j_c}. \quad (25)$$

Матриця $P_{j_c} [1:i_c, 1:i_c]$ та вектор $\mathbf{Q}_{j_c} [1:i_c]$ були визначені при розв'язанні векторного рівняння (18) на ділянці 1. Для узагальнення виразів (24) та (25) для вузлів з номерами $j=j_c+1$; $1 \leq i \leq M$ складається векторне співвідношення:

$$\mathbf{T}_{j_c} = P_{j_c}^* \cdot \mathbf{T}_{j_c+1} + \mathbf{Q}_{j_c}^* + R_{j_c}^* \cdot \mathbf{T}_w^*, \quad (26)$$

в якому матриця $P_{j_c}^* [1:M, 1:M]$ у строках з номерами $1 \leq i \leq i_c$ та стовбцях з номерами $1 \leq i_1 \leq i_c$ містить елементи матриці $P_{j_c} [1:i_c, 1:i_c]$. Вектор $\mathbf{Q}_{j_c}^* [1:M]$ містить елементи вектору \mathbf{Q}_{j_c} для $1 \leq i \leq i_c$. Матриця $R_{j_c}^* [1:M, 1:M]$ містить елементи, що дорівнюють нулю, крім діагональних елементів з номерами $i_c+1 \leq i \leq M$, значення яких дорівнюють $R_{j_c, i, i}^* = 2$. $i_c+1 \leq i \leq M$ елементи вектору $\mathbf{T}_w^* [i_c+1:M]$ відповідають невідомим значенням температури на поверхні ребра.

Приймається, що для $j \geq j_c+2$ співвідношення між векторами \mathbf{T}_{j-1} та \mathbf{T}_j має вигляд, подібний до виразу (26), тобто:

$$\mathbf{T}_{j-1} = P_{j-1} \cdot \mathbf{T}_j + \mathbf{Q}_{j-1} + R_{j-1} \cdot \mathbf{T}_w^*. \quad (27)$$

Підстановка виразу (27) у векторне рівняння (23) приводить до рівняння вигляду $\mathbf{T}_{j+1} + B_j \cdot \mathbf{T}_j + P_{j-1} \cdot \mathbf{T}_j + \mathbf{Q}_{j-1} + R_{j-1} \cdot \mathbf{T}_w^* = \mathbf{F}_j$, з якого визначається вектор \mathbf{T}_j :

$$\mathbf{T}_j = -\left(B_j + P_{j-1}\right)^{-1} \cdot \mathbf{T}_{j+1} + \left(B_j + P_{j-1}\right)^{-1} \cdot \left(\mathbf{F}_j - \mathbf{Q}_{j-1}\right) - \left(B_j + P_{j-1}\right)^{-1} \cdot R_{j-1} \cdot \mathbf{T}_w^*.$$

З останнього виразу випливають наступні рекурентні співвідношення:

$$P_j = -\left(B_j + P_{j-1}\right)^{-1}, \quad (28)$$

$$\mathbf{Q}_j = \left(B_j + P_{j-1}\right)^{-1} \cdot \left(\mathbf{F}_j - \mathbf{Q}_{j-1}\right), \quad (29)$$

$$R_j = -(B_j + P_{j-1})^{-1} \cdot R_{j-1}, \quad (30)$$

для $j_c + 1 \leq j \leq N$.

За наведеними співвідношеннями розраховуються матриці P_j , R_j та вектори Q_j для $j = j_c + 1 \dots N$. Після їх розрахунку, з виразу (27), що складений для $j=N$, визначається вектор T_{N+1} . Для цього використовується гранична умова (15), що у векторній формі має вигляд $T_{N+1} = T_N$. З виразу:

$$T_{N+1} = P_N \cdot T_{N+1} + Q_N + R_N \cdot T_w^*,$$

випливає:

$$T_{N+1} = (E - P_N)^{-1} \cdot Q_N + (E - P_N)^{-1} \cdot R_N \cdot T_w^*,$$

де E – одинична матриця. Останній вираз записується у вигляді:

$$T_{N+1} = Z + D \cdot T_w^*, \quad (31)$$

де $Z = (E - P_N)^{-1} \cdot Q_N$; $D = (E - P_N)^{-1} \cdot R_N$

Складові вектору T_{N+1} з номерами $i_c + 1 \leq i \leq M$ відповідають величинам $T_{\text{exp},i}$, що знайдені з експерименту. Невідомі складові вектору T_{N+1} мають номери $1 \leq i \leq i_c$. Складові вектору T_w^* з номерами $i_c + 1 \leq i \leq M$ – невідомі величини, що підлягають визначенню, а його складові з номерами $1 \leq i \leq i_c$ мають нульові значення. Таким чином, невідомі величини містяться частково у векторі T_{N+1} ($1 \leq i \leq i_c$) та частково у векторі T_w^* ($i_c + 1 \leq i \leq M$).

Після визначення векторів T_{N+1} та T_w^* , за допомогою співвідношення (27) послідовно розраховуються вектори $T_j[1:M]$ для $j = N \dots j_c$. Складові вектору T_{j_c} , що мають номери $1 \leq i \leq i_c$, відповідають значенням температури в вузлах сітки, що належать ділянці стінки 1 та розташовані найближче до границі ділянки 3 (під ребром). З цих значень формується вектор T_{j_c} , що має розмірність $[1:i_c]$. Він застосовується для послідовного розрахунку за виразом (25) векторів T_j (від $j=j_c-1$ до $j=1$), що містять температури у вузлах стінки.

Складові вектору T_{j_c} , що мають номери $i_c + 1 \leq i \leq M$, відповідають значенням температури в додаткових вузлах сітки, що виходять за границі розрахункової області та розташовуються найближче до поверхні теплообміну ребра з боку теплоносія. Ці значення використовуються для визначення коефіцієнту тепловіддачі на поверхні теплообміну ребра. З цією метою вираз

(8), що описує умови тепловіддачі з поверхні ребра до теплоносія, записується у скінчено-різницевій формі:

$$\lambda \frac{T_{i,j_c+1} - T_{i,j_c}}{h_x} = \alpha_{p,i} \left(\frac{T_{i,j_c+1} + T_{i,j_c}}{2} - T_\infty \right),$$

з якого випливає вираз:

$$\alpha_{p,i} = \frac{2\lambda(T_{i,j_c+1} - T_{i,j_c})}{h_x(T_{i,j_c+1} + T_{i,j_c} - 2T_\infty)}. \quad (32)$$

Після розрахунку температур у вузлах сітки, за співвідношенням (32) визначається розподіл коефіцієнтів тепловіддачі по поверхні ребра для $i_c+1 \leq i \leq M$.

3. Результати досліджень та обговорення

З застосуванням наведеного алгоритму визначається розподіл коефіцієнтів тепловіддачі по поверхні ребра, що є елементом мідної оребреної стінки ($\lambda=381$ Вт/(мК)) з геометричними розмірами $L=1,5$ мм; $\delta_p=1,0$ мм; $\delta_c=5,0$ мм; $h=22,0$ мм. Розглядаються випадки густин підведеного до стінки теплового потоку $q_{п}=481,056$ кВт/м² та $q_{п}=601,056$ кВт/м². Розподіли температури по осі ребра, що знайдені з експерименту, наведені у вигляді дискретних точок на рис. 4. Також на даному рисунку наведено апроксимаційні криві розподілу температур по осі ребра $t_{exp}(y)$, що застосовуються для чисельного розв'язання задачі. Коефіцієнт тепловіддачі на поверхні ребра визначається з виразу (32), що містить температуру теплоносія t_∞ . В міжреберному просторі температура рідини, до якої відбувається тепловіддача з поверхні ребра та стінки, може змінюватися від її значення на вході в експериментальну ділянку t_0 до температури насичення t_{sut} . Температура t_0 визначається умовами проведення експерименту, а t_{sut} залежить від розподілу тиску по каналу експериментальної ділянки. Експериментальні дослідження проводилися за умов $t_0=100$ °С. Визначено також, що $t_{sut} \sim 140$ °С. З даних, наведених на рис. 4, випливає, що на осі ребра спостерігаються значення температури як вищі, ніж t_{sut} , так і нижчі, ніж t_{sut} . Тобто кипіння рідини відбувається не на всій поверхні ребра, а лише на тій її частині, температура якої перевищує t_{sut} .

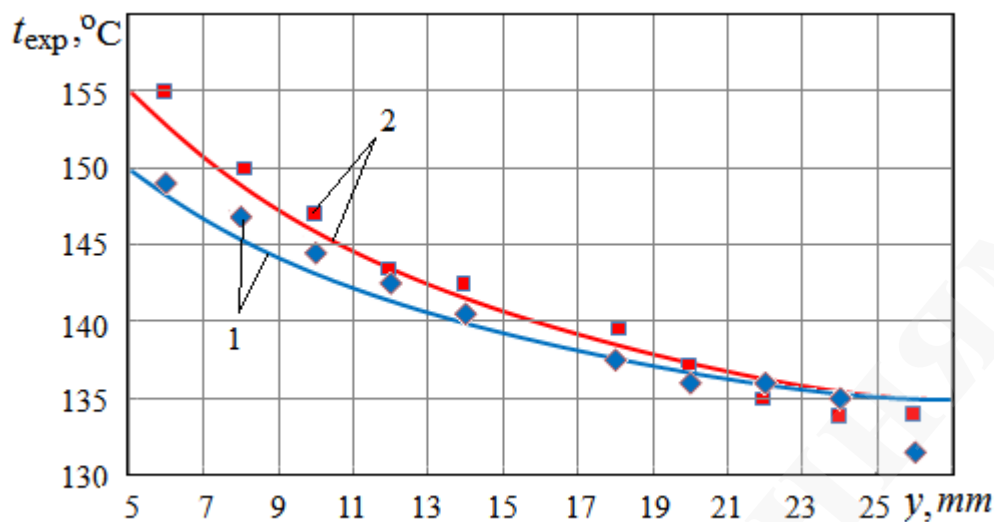


Рис. 4. Розподіл температури по осі ребра: 1 – $q_n=481,056$ кВт/м²; 2 – $q_n=601,056$ кВт/м²; ♦, ■ – експериментальні точки; —; — – апроксимаційні криві

Для визначення коефіцієнту тепловіддачі α приймається, що $t_\infty = t_0 = 100$ °С. Розподіли коефіцієнтів тепловіддачі по поверхні ребра для двох розглянутих випадків густини теплового потоку q_n наведено на рис. 5.

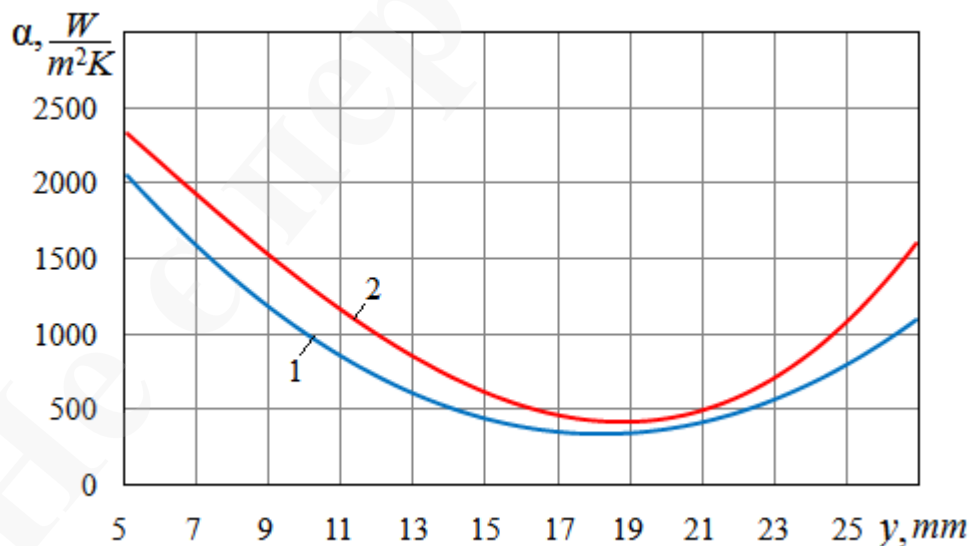


Рис. 5. Розподіл коефіцієнтів тепловіддачі по поверхні ребра: 1 – $q_n=481,056$ кВт/м²; 2 – $q_n=601,056$ кВт/м²

З рис. 5 видно, що максимальні значення коефіцієнтів тепловіддачі відповідають ділянці ребра, що розташована безпосередньо біля поверхні стінки. Вздовж осі ОУ їх величини зменшуються. Після досягнення мінімальних значень коефіцієнти тепловіддачі вздовж поверхні ребра починають зростати. Максимальні значення коефіцієнту тепловіддачі біля основи ребра

($y = \delta_c = 5,0$ мм) складають $\alpha = 2053$ Вт/(м²К) для випадку $q_{п} = 481,056$ кВт/м² та $\alpha = 2330$ Вт/(м²К) для випадку $q_{п} = 601,056$ кВт/м². Їх мінімальні значення для першого випадку становлять $\alpha = 338$ Вт/(м²К) при $y = 18,1$ мм, а для другого випадку – $\alpha = 414$ Вт/(м²К) при $y = 18,7$ мм. При $y = y_{max} = 27$ мм значення коефіцієнтів тепловіддачі зростають до $\alpha = 1095$ Вт/(м²К) у першому випадку та до $\alpha = 1600$ Вт/(м²К) у другому випадку.

Даний характер зміни коефіцієнта тепловіддачі вздовж поверхні ребра пояснюється тим, що на тій ділянці поверхні, де її температура перевищує температуру насичення t_{sut} , відбувається кипіння рідини. При цьому вздовж поверхні ребра величина \mathcal{Q} зменшується. Відповідно до залежностей (1) коефіцієнт тепловіддачі також зменшується. На ділянці поверхні ребра, на якій $t_w < t_{sut}$, кипіння не відбувається та тепловіддача до теплоносія протікає за рахунок вимушеної та природної конвекції. При повздовжньому обтіканні рідиною оребреної поверхні, в міжреберному просторі, що розташований ближче до торцевих поверхонь ребер, утворюється вихрова течія внаслідок відриву зовнішньому потоку від торців. Це сприяє інтенсифікації тепловіддачі на цій ділянці поверхні ребра. Внаслідок цього, після досягнення коефіцієнтами тепловіддачі мінімальних значень, їх величини починають зростати в напрямку осі OY .

4. Висновки

У ході роботи розроблено нову методику визначення розподілу коефіцієнтів тепловіддачі по поверхні ребра при кипінні води на оребреній стінці та алгоритм розв'язання оберненої задачі теплопровідності. Цей алгоритм ґрунтується на використанні метода скінчених різниць та матричної прогонки для розв'язання системи скінчено-різницевих рівнянь. Це можливо застосовувати для визначення розподілу коефіцієнтів тепловіддачі по поверхні ребра за експериментальними даними по розподілу температури вздовж осі ребра. Визначений за запропонованим методом розподіл коефіцієнтів тепловіддачі по поверхні ребра, на якій можливе існування різних режимів кипіння рідини, вказує на нерівномірність цього розподілу. Максимальні значення коефіцієнтів тепловіддачі спостерігаються біля основи ребра, де температура поверхні тепловіддачі t_w найбільш суттєво перевищує температуру насичення t_{sut} . В напрямку осі OY температура поверхні ребра зменшується, що викликає також зменшення коефіцієнту тепловіддачі. Після досягнення мінімальних значень коефіцієнти тепловіддачі в напрямку осі OY починають зростати, що пов'язано з впливом відриву від торцевої поверхні ребра зовнішнього потоку теплоносія та утворення вихрової течії у верхній ділянці міжреберного простору. Для визначення коефіцієнтів тепловіддачі на оребреній поверхні при кипінні рідини недостатньо застосувати лише вирази (1), що враховують тільки величину температурного напору $\mathcal{Q} = t_w - t_{sut}$. Їх значення залежать також від гідродинамічних умов обтікання оребреної поверхні зовнішнім потоком теплоносія.

Література

1. Haley, K. W., Westwater, J. W. (1966). Boiling heat transfer from single fins. *Proceedings of the Third International Heat Transfer Conference AJChE – ASME*, 3, 245–253. doi: <https://doi.org/10.1615/ihtc3.300>
2. Kovalev, S. A., Smirnova, L. F. (1968). O temperaturnom pole rebra, omyvaemogo kipiaschei zhidkosti. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 4 (6), 698–701.
3. Dulkin, I. N., Rakushina, N. I., Roizen, L. I., Fastovskii, V. G. (1970). Teploobmen pri kipenii vody i freona-113 na neizotermicheskoi poverkhnosti. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 19 (4), 637–645.
4. Rubin, I. R., Dulkin, I. N., Roizen, L. I. (1978). Teploobmen pri kipenii zhidkosti na poverkhnosti koltseвого rebra postoiannoї tolschiny. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 16 (2), 365–369.
5. Roizen, L. I., Evteev, B. N., Dulkin, I. N. (1970). Raschet teploperedachi v priamougolnom rebre. *Elektronnaia tekhnika. Seriia I. Elektronika SVCH*, 7, 81–84.
6. Kern, D., Kraus, A. (1977). *Razvitye poverkhnosti teploobmena*. Moscow: Energiia, 464.
7. Bosyi, V. V., Marynenko, V. I. (1996). *Modeliuvannia teplovykh rezhymiv reber pry riznykh umovakh teploobminu*. Kyiv: Ministerstvo osvity Ukrainy, 116.
8. Zverev, V. G., Nazarenko, V. A., Panko, S. V., Teploukhov, A. V. (2010). Opredelenie parametrov konvektivnogo teploobmena po izmereniiam temperatury materiala. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 48 (5), 779–784.
9. Formalev, V. F., Kolesnik, S. A. (2013). A methodology for solving inverse coefficient problems of determining nonlinear thermophysical characteristics of anisotropic bodies. *High Temperature*, 51 (6), 875–883. doi: <http://doi.org/10.7868/s0040364413050062>
10. Marynenko, V. I., Davydenko, B. V. (2002). Metodyka vyznachennia koefitsiienta teploviddachi na orebrenii stintsii. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, 1, 40–44.
11. Marinenko, V. I., Davydenko, B. V. (2002). Opredelenie koefitsiienta teplootdachi na orebrennoi stenke. *Energetika i elektrotekhnika*, 3, 40–42.