

ТЕПЛОВА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕБЕР РІЗНОГО ТИПУ ЗА НАЯВНОСТІ ПОКРИТТІВ НА ТЕПЛООБМІННІЙ ПОВЕРХНІ

*В. Г. Горобець, доктор технічних наук
e-mail: nni.elektrik@gmail.com*

Анотація. *Наведено методику розрахунку процесів теплопереносу для ребер різного типу (повздожніх ребер, кільцевих ребер і шипів) за наявності на їх поверхні захисних або забруднюючих покриттів. Знайдено температурні розподіли й теплову ефективність ребер та проаналізовано вплив геометричної форми ребер на їх теплові характеристики.*

Ключові слова: *ребро, покриття, розподіл температур, теплова ефективність*

В процесі експлуатації ребрених теплообмінників на розвиненій поверхні можуть утворюватися забруднюючі відкладення, які знижують ефективність теплообмінних апаратів. Під час роботи теплообмінників у хімічно агресивних середовищах теплообмінна поверхня може бути захищена від руйнування шаром захисного покриття. Здебільшого, забруднюючі відкладення або захисні покриття мають малу термічну провідність. Вплив відкладень (покриттів) в інженерних методах теплового розрахунку враховують як додатковий термічний опір на розвиненій поверхні [1].

Такий підхід, як правило, базується на експлуатаційних дослідженнях і спостереженнях процесів забруднення ребреної поверхні, що супроводжується погіршенням теплової ефективності теплообмінників. Такий підхід дає змогу врахувати вплив відкладень при визначенні загальної площі теплообмінної поверхні і габаритів теплообмінника під час його конструювання, але унеможлиблює детальне вивчення впливу відкладень на умови теплопереносу в розвиненій поверхні з покриттям і зробити правильний вибір оптимальних розмірів ребрення.

Проведені рядом авторів дослідження умов теплопереносу для композитних ребер свідчать [2–10], що наявність малотеплопровідного відкладення або покриття на розвиненій поверхні призводить до істотної перебудови температурних полів, які можуть мати суттєві відмінності від температурних розподілів для поверхні з ребрами без покриття. З цієї причини, оптимальні розміри ребер із покриттями можуть відрізнятися від аналогічних розмірів, обчислених для «чистих» ребер.

Таким чином, уявляється необхідним розроблення методики розрахунку ребер із покриттям, проведення детального дослідження впливу відкладень (покриттів) на перенос теплоти в цих ребрах та визначення теплової ефективності композитних ребер.

Мета досліджень – розробка методики розрахунку ребер із покриттям, дослідження температурних розподілів і теплової ефективності композитних ребер різного типу.

Матеріали та методика досліджень. У статті проведено розрахунок температурних полів і визначено теплову ефективність для трьох типів оребрення за наявності на їх поверхні рівномірних покриттів (відкладень), а саме: для повздовжніх ребер, поперечних ребер і шипів.

Стационарний теплоперенос у ребрі з рівномірним покриттям (рис. 1) при двовимірній постановці описується рівнянням

$$\Delta T_i = 0, \quad (1)$$

де x, y – координати;

T – температура, індекс $i = 1, 2$; позначає відповідно, ребро і покриття;

Δ – оператор Лапласа, який для різних типів ребер, відповідно, має наступний вигляд: для повздовжнього ребра – $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$, для

круглого ребра – $\Delta = \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left(x \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$, для круглого шипа –

$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left(y \frac{\partial}{\partial y} \right)$, а осі координат Ox і Oy спрямовані відповідно по висоті й товщині ребра (рис. 1).

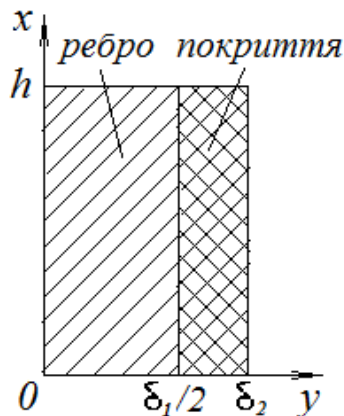


Рис. 1. Розрахункова схема ребра з покриттям

Якщо припустити, що покриття на торцях відсутнє, тепловіддачею з торцевих поверхонь можна знехтувати, температура основи ребра вважається постійною і рівною T_0 , температура зовнішнього середовища рівна $T_{g\infty}$, то граничні умови для рівнянь (1) мають вигляд

$$T_i(x = x_1) = T_0, \left. \frac{\partial T_i}{\partial x} \right|_{x=x_2} = 0, i = 1,2; \left. \frac{\partial T_1}{\partial y} \right|_{y=0} = 0,$$

$$T_1(x, y = \delta_1/2) = T_2(x, y = \delta_1/2),$$

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial y} \right|_{y=\delta_1/2} = \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial y} \right|_{y=\delta_1/2}, \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial y} \right|_{y=\delta_1/2+\delta_2} = \alpha(T_2 - T_{g\infty}), \quad (2)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності;

α – коефіцієнт тепловіддачі на поверхні композитного ребра, причому для поздовжнього ребра і циліндричного шипа $x_1 = 0, x_2 = h$, а для круглого ребра координати x_1 і $x_2 = x_1 + h$ позначають, відповідно, радіус несучої циліндричної поверхні і зовнішній радіус кільцевого ребра.

Для порівняльної оцінки ефективності ребер використовують коефіцієнт теплової ефективності ребра

$$\eta = \frac{Q}{Q_{\max}}, \quad (3)$$

де $Q = 2\alpha \int_0^h [T_2(x, y = \delta_1/2 + \delta_2) - T_{g\infty}] dx$ – повний тепловий потік, що відводиться ребром;

$Q_{\max} = 2\alpha(T_0 - T_{g\infty})h$ – деяке максимальне його значення, коли на поверхні композитного ребра температура покладається рівною температурі біля його основи $T_2(x, y = \delta_1/2 + \delta_2) = T_0$.

Розв'язки системи параболічних рівнянь (1) з граничними умовами (2) отримані методом кінцевих інтегральних перетворень [11]. Температурні поля і тепла ефективність різного типу ребер з покриттям, після введення безрозмірних змінних, отримані в наступній формі.

Для поздовжнього ребра з покриттям:

$$\theta_1(X, Y) = \sum_{n=0}^{\infty} [2C_{1n} \operatorname{ch}(\mu_n Y) + H_n] \sin(\mu_n X) / M_n, \quad (4)$$

$$\theta_2(X, Y) = \sum_{n=0}^{\infty} [C_{2n} \exp(\mu_n Y) + D_{2n} \exp(-\mu_n Y) + H_n] \sin(\mu_n X) / M_n, \quad (5)$$

$$\eta = \sum_{n=0}^{\infty} [C_{2n} \exp(\mu_n Y_2) + D_{2n} \exp(-\mu_n Y_2) + H_n] / \mu_n M_n, \quad (6)$$

де $X = x/h, Y = y/h, Y_1 = \delta_1/2h, Y_2 = (\delta_1 + 2\delta_2)/2h,$
 $\theta_1 = (T_1 - T_{g\infty})/(T_0 - T_{g\infty}); \theta_2 = (T_2 - T_{g\infty})/(T_0 - T_{g\infty}), C_{2n} = P_n F_n \exp(-\mu_n Y_1),$
 $D_{2n} = P_n \exp(-\mu_n Y_1) / L_n;$

$C_{1n} = -C_{2n}[\text{ch}(\mu_n Y_1) + \text{sh}(\mu_n Y_1) \text{Bi}_2 / \text{Bi}_1]^{-1}$, $P_n = M_n / (1 + \mu_n / \text{Bi}_2)$;
 $F_n = [\text{th}(\mu_n Y_1) \text{Bi}_2 / \text{Bi}_1 + 1] / [\text{th}(\mu_n Y_1) \text{Bi}_2 / \text{Bi}_1 - 1]$;
 $L_n = \exp[-\mu_n (Y_2 - Y_1)] (1 - \mu_n / \text{Bi}_2) / (1 + \mu_n / \text{Bi}_2) - \exp[\mu_n (Y_2 - Y_1)] F_n$;
 $H_n = -1 / \mu_n M_n$, $M_n^2 = [1 - \sin(2\mu_n) / 2\mu_n] / 2$, $\text{Bi}_i = \alpha h / \lambda_i$, $i = 1, 2$;
 $\mu_n = \pi(n + 1/2)$ – власні числа, отримані при розв'язку задачі Штурма-Ліувілля для рівняння (1).

Для кільцевого ребра з покриттям

$$\theta_1(X, Y) = \sum_{n=0}^{\infty} K(\mu_n, X) [2C_{1n} \text{ch}(\mu_n Y) + H_n] \quad (7)$$

$$\theta_2(X, Y) = \sum_{n=0}^{\infty} K_n(\mu_n, X) [C_{2n} \exp(\mu_n Y) + D_{2n} \exp(-\mu_n Y) + H_n] \quad (8)$$

$$\eta = \frac{4X_1}{X_2^2 - X_1^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2} \left\{ \left[\frac{\mu_n S_n + \exp[2\mu_n (Y_2 - Y_1)]}{\text{Bi}_2 S_n - \exp[2\mu_n (Y_2 - Y_1)]} - 1 \right]^{-1} + 1 \right\} \times$$

$$\times \left\{ X_2^2 \left[\frac{Y_0(\mu_n X_2) I_0(\mu_n X_1) - Y_0(\mu_n X_1) I_0(\mu_n X_2)}{Y_0(\mu_n X_1) I_0(\mu_n X_1) - Y_0(\mu_n X_1) I_0(\mu_n X_1)} \right]^2 - X_1^2 \right\}^{-1} \quad (9)$$

де $X_1 = x_1 / h$, $X_2 = x_2 / h$;

$$K_n = B_n [Y_0(\mu_n X) - I_0(\mu_n X) Y_0(\mu_n X_1) / I_0(\mu_n X_1)];$$

$$C_{2n} = H_n \exp[\mu_n (Y_2 - 2Y_1)] [(1 + \mu_n / \text{Bi}_2) \times$$

$$\times \exp[2\mu_n (Y_2 - Y_1)] / (1 - \frac{\mu_n}{\text{Bi}_2} - S_n)^{-1} / (1 - \frac{\mu_n}{\text{Bi}_2});$$

$$D_{2n} = -C_{2n} S_n \exp(2\mu_n Y_1), \quad C_{1n} = C_{2n} (1 - S_n \exp(\mu_n Y_1));$$

$$S_n = [\text{Bi}_2 \text{th}(\mu_n Y_1) - 1] / [\text{Bi}_2 \text{th}(\mu_n Y_1) - 1];$$

$$H_n = -B_n X_1 [Y_1(\mu_n X_1) - I_1(\mu_n X_1) Y_0(\mu_n X_1) / I_0(\mu_n X_1)] / \mu_n;$$

$$B_n = \left\{ \frac{X_2^2}{2} [I_0(\mu_n X_1) - Y_0(\mu_n X_1)]^2 + \frac{1}{2\mu_n} \left[Y_1(\mu_n X_1) - \frac{I_1(\mu_n X_1) Y_0(\mu_n X_1)}{I_0(\mu_n X_1)} \right] \right\}^{-1/2},$$

а власні числа визначаються в результаті розв'язку задачі Штурма-Ліувілля для рівнянь (1) з характеристичного рівняння

$$Y_1(\mu_n X_2) I_0(\mu_n X_1) - Y_0(\mu_n X_1) I_1(\mu_n X_2) = 0. \quad (10)$$

Для циліндричного шипа з покриттям:

$$\theta_i(X, Y) = \sum_{n=0}^{\infty} [C_{in} I_0(\mu_n Y) + D_{in} K_0(\mu_n Y) + H_n] \sin(\mu_n X) / \mu_n M_n, \quad i=1,2; \quad (11)$$

$$\eta = \sum_{n=0}^{\infty} [C_{2n} I_0(\mu_n Y_2) + D_{2n} K_0(\mu_n Y_2) + H_n] / \mu_n M_n, \quad (12)$$

$$\text{де } C_{1m} = \frac{F(\mu_n, Y_2) [S_1(\mu_n, Y_1) I_0(\mu_m Y_1) - K_0(\mu_n Y_1)]}{I_0(\mu_n X_1) [S_1(\mu_m, Y_1) + S_2(\mu_n, Y_1)]}, \quad D_{1n} = 0;$$

$$C_{2m} = \frac{F(\mu_n, Y_2) S_1(\mu_n, Y_1)}{S_1(\mu_m, Y_1) + S_2(\mu_n, Y_1)}, \quad D_{2m} = \frac{F(\mu_n, Y_2)}{S_1(\mu_m, Y_1) + S_2(\mu_n, Y_1)};$$

$$S_1(\mu_n, Y_1) = \frac{K(\mu_n Y_1) I_0(\mu_m Y_1) - Bi_2 K_0(\mu_n Y_1) I_0(\mu_m Y_1) / Bi_1}{(Bi_2 / Bi_1 - 1) I_0(\mu_n Y_1) I_1(\mu_m, Y_2)};$$

$$S_2(\mu_n, Y_2) = \frac{Bi_2 K_0(\mu_n Y_2) - \mu_n K_1(\mu_n Y_2)}{Bi_2 I_0(\mu_n Y_2) + \mu_n I_1(\mu_m, Y_2)};$$

$$F(\mu_n, Y_2) = \frac{H_n Bi_2}{\mu_n [Bi_2 I_0(\mu_n Y_2) + \mu_n I_1(\mu_m, Y_2)]};$$

$H_n = -1 / \mu_n M_n$, $M_n^2 = [1 - \sin(2\mu_n) / 2\mu_n] / 2$, $\mu_n = \pi(n + 1/2)$ – власні числа, $I_j(\mu_n Y), K_j(\mu_n Y)$, $j = 0, 1$; – модифіковані Функції Бесселя j -го порядку, відповідно, першого і другого роду.

У табл. 1 наведено розрахункові значення коефіцієнта ефективності для повздовжніх ребер за наявності на їх поверхні покриття при різних геометричних і теплофізичних характеристиках покриття, де параметр $\psi_{Bi} = Bi_1 / Bi_2$ враховує співвідношення між теплофізичними властивостями ребра і покриття.

1. Теплова ефективність повздовжніх ребер із рівномірним покриттям, знайдених при двовимірній постановці задачі

	$Bi_2 = \frac{\alpha h}{\lambda_2}$	η	$Bi_2 = \frac{\alpha h}{\lambda_2}$	η	$Bi_2 = \frac{\alpha h}{\lambda_2}$	η
	$Y_1 = 0,1; Y_2 = 0,12;$		$Y_1 = 1,0; Y_2 = 1,2;$		$Y_1 = 5,0; Y_2 = 6,0;$	
$\psi_{Bi} = 0,0025$	25	0,68	2,5	0,797	0,5	0,83
	100	0,355	10	0,506	2	0,574
	300	0,157	30	0,257	6	0,326
	1000	0,0536	100	0,0954	20	0,142
	2000	0,0276	200	0,05	40	0,081
	3500	0,016	350	0,0296	70	0,051
	5000	0,0112	500	0,021	100	0,038

Аналіз отриманих результатів свідчить, що, при зменшенні коефіцієнта теплопровідності матеріалу покриття, теплова ефективність

композитних ребер знижується, що викликає необхідність вибирати оптимальні геометричні розміри ребер залежно від теплофізичних і геометричних характеристик покриттів, причому ці розміри можуть істотно відрізнятись від оптимальних розмірів для «чистих» ребер.

Вплив покриттів на теплові характеристики ребер різного типу за інших рівних умов буде залежати від геометрії ребер. На рис. 2 наведено залежності величини $\eta_{coat} / \eta_{clin}$, яка представляє відношення значень ефективності ребер різного типу за наявності покриття η_{coat} і за його відсутності η_{clin} , тобто для «чистих» ребер. Розрахункові дані отримані при різних значення числа Bi_2 для покриття і заданому значенні параметрів $\psi_{Bi} = 0,04$, $X_2 / X_1 = 1,5$ (для кільцевого ребра). Як випливає з рис. 2, покриття з малою тепловою провідністю за інших рівних умов має найбільший вплив на величину теплової ефективності η для кільцевих ребер, а найменший – для повздовжніх ребер.

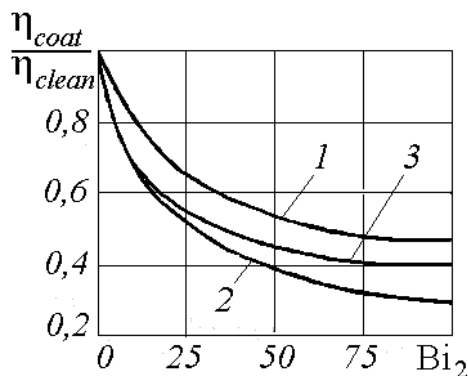


Рис. 2. Залежність $\eta_{coat} / \eta_{clin}$ від числа Біо покриття Bi_2 для ребер різного типу при $\psi_{Bi} = 0,04$:

1 – повздовжнє ребро; 2 – кільцеве ребро; 3 – циліндричний шип

Висновки

1. Отримано двовимірні розв'язки задач теплопереносу та визначено теплову ефективність повздовжніх ребер, кільцевих ребер і круглих шипів за наявності рівномірного покриття на їх поверхні.

2. Визначено вплив форми ребер на теплову ефективність ребер із покриттям і проведено порівняння результатів розрахунку для ребер із покриттями і «чистих» ребер.

Список літератури

1. Керн Д. Развитие поверхности теплообмена / Д. Керн, А. Краус. – М. : Энергия, 1977. – 452 с.
2. Barker J.J. The efficiency of the composite fins / J.J. Barker // Nucl. Sci. Eng. – 1958.– V. 3.– P. 300–312.
3. Feijoo I. Heat transfer in the composite solids with heat generations / I. Feijoo, H.T. Davis, D. Ramkrishna // J. Heat Transfer. – 1979.– V. 101.– P. 137–143.

4. Huang S.C. Heat conduction in unsteady, periodic, and steady state in laminated composites / S.C. Huang, Y.P. Chang // J. Heat Transfer. – 1980. – V. 102. – P. 742–748.

5. Горобец В. Г. Влияние отложений прямоугольного профиля на тепловую эффективность продольного ребра / В. Г. Горобец, Н. В. Зозуля, В. С. Новиков // Инженерно-физический журнал. – 1982. – Т. 42, № 6. – С. 820–824.

6. Chu H. Transient response of a composite straight fin / H. Chu, C. Weng, C. Chen // J. Heat Transfer. – 1983. – V. 105. – P. 307–311.

7. Ghoshdastidar P.S. Transient heat transfer from a straight composite fin; f numerical solution by ADI / P.S. Ghoshdastidar, A. Mukhopadhyay // Int. Comm. Heat Mass Transfer. – 1989. – V. 19. – P. 257.

8. Mokheimer E.M.A. Analytical and numerical solution along with PC spread-sheets modeling for a composite fin / E/M/A/ Mokheimer, M.A. Antar, J. Farooqi, S.M. Zurair // Heat Mass Transfer. – 1997. – V. 32. – P. 229–238.

9. Lalot S. Fin efficiency of annular fins made of two materials / S. Lalot, C. Tournier, V. Jensen // Int. Journ. Heat Mass Transfer. – 1999. – V. 42, N18. – P. 3461–3468.

10. Xia Y. An exact solution to steady heat condition in a two-dimensional slab on a one-dimensional fin: application to frosted heat exchangers / Y. Xia, A.M. Jacobi // Int. J. Heat Mass Transfer – 2004. – V. 47. – P. 3317–3326.

11. Кошляков И. С. Уравнения в частных производных математической физики / И.С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов – М. : Высшая школа, 1970. – 707 с.



В. Г. Горобец

Аннотация. *Приведена методика расчета процессов теплопереноса для ребер различного типа (продольных ребер, кольцевых ребер и шипов) при наличии на их поверхности защитных или загрязняющих покрытий. Найдены температурные распределения и тепловая эффективность ребер и проанализировано влияние геометрической формы ребер на их тепловые характеристики.*

Ключевые слова: *ребро, покрытие, распределение температур, тепловая эффективность*

THERMAL EFFICIENCY OF FINS DIFFERENT TYPE WITH COATING ON HEAT TRANSFER SURFACES

V. Gorobets

Annotation. *The paper shows the method of calculating heat transfer processes for different types of fins (longitudinal fins, circular fins and ribs) in the presence of their protective surface coatings or contaminants. It is found the temperature distributions and thermal efficiency of fins and the influence of geometry of fins on their thermal characteristics.*

Key words: *fin, coating, temperature distribution, thermal efficiency*