

7. Степанцов В.П. Светотехническое оборудование в сельскохозяйственном производстве: Справ. пособие / В.П.Степанцов. – Мн.: Ураджай, 1987. – 216 с.
8. Хабій В.Ю. Українська світлотехнічна галузь – сучасний стан та перспективи /В.Ю. Хабій // Світло Lux. – 2008. – № 6. – С. 8–12.
9. Шарупич В.П. Радиационный режим и светотехническое оборудование теплиц О–VII световых зон СССР / В.П. Шарупич. – Орел: МИИП "Поиск", 1992. – 216 с.
10. Шахпарунянц Г.Р. Основные направления развития российской светотехники / Г.Р. Шахпарунянц // Светотехника . – 2006. – № 6. – С. 11–15.
11. Щур И.З. Основные положения термодинамической методологии повышения эффективности использования электроэнергии в оптических технологиях АПК / И.З. Щур // Питання електрифікації сільського господарства: ювілейний збірник наукових праць. – Харків: ХДТУСГ. –1998. – С. 103–109.
12. Increasing plant productivity by changing the solar spectrum / Novoplansky A., Sachs T., Cohen D., Bar R., Bodenheimer I., Reisfeld R. // Solar Energy Mater. – 1990. – V. 21, No. 1. – P. 17–23.

*Проведен анализ результатов практического применения источников инфракрасного (ИК), ультрафиолетового (УФ) излучения, аэроионизации, освещения и автоматизированных ИК-и УФ-облучательных установок в сельскохозяйственном производстве и определены пути их совершенствования*

***Оптическое излучение, лампы, инфракрасный обогрев, ультрафиолетовое облучение, сельское хозяйство.***

*The analysis of the practical application of sources of infrared (IR), ultraviolet (UV) radiation, aeroionizatsiyi, automated lighting and IR and UV oprominyuvalnyh plants in agricultural production and the ways of their improvement.*

***Optical radiation, lamps, infrared heating, ultraviolet irradiation, agriculture.***

УДК 536.24

## **ТЕПЛООБМІН ВЕРТИКАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ З ПОХИЛИМ ДИСКРЕТНИМ ОРЕБРЕННЯМ В УМОВАХ ПРИРОДНОЇ КОНВЕКЦІЇ**

***В.Г. Горобець, доктор технічних наук***

*Запропоновано нові типи оребренья для плоских поверхонь за умов вільної конвекції. Використання нових типів оребренья суттєво покращує габаритні та вагові характеристики теплообмінного обладнання, що працює в умовах природної конвекції. Розроблено математичну модель та проведено чисельні розрахунки для вертикальних поверхонь з похилим дискретним оребреньям. Отримано локальні та інтегральні характеристики досліджуваних поверхонь. Проведено зіставлен-*

© В.Г. Горобець, 2012

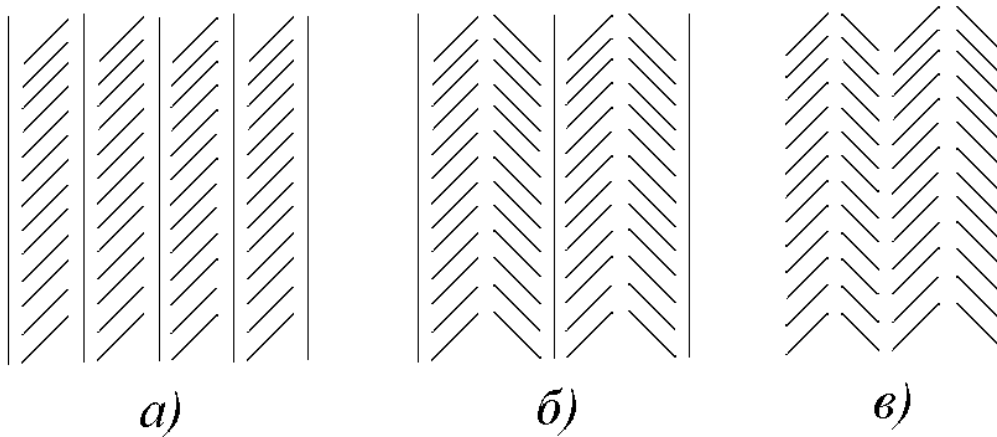
ня отриманих результатів з даними для плоскопаралельного неперервного і дискретного оребренья. Показано, що застосування дискретного похилого оребренья в 1,5–2,5 рази підвищує його теплову ефективність порівняно з неперервним плоскопаралельним оребреньям.

**Похиле дискретне оребренья, вільна конвекція, теплоперенос, тепла ефективність оребренья.**

Використання дискретного оребренья на поверхні, яка має невеликі вертикальні розміри і велику кількість ребер по висоті поверхні, що є основою, дає можливість інтенсифікувати тепловіддачу майже удвічі, якщо порівнювати з безперервним оребреньям [6]. Цей висновок підтвердився в експериментальному дослідженні [4], де вивчено умови теплообміну для вертикальної поверхні із сталевими дискретними ребрами, розташованими в шаховому порядку. При цьому максимальна міра інтенсифікації, отримана в [2], дещо нижча в порівнянні з розрахунковою величиною, отриманою в [1], і становило 1,5–1,7 рази. В той же час, аналіз теплообмінних процесів, проведений для таких систем, показує, що для досить протяжних по вертикалі поверхонь тепловіддача ребер, розташованих у верхній частині системи неефективна в порівнянні з ребрами, розташованими на нижніх ділянках. Це обумовлено істотним прогріванням теплоносія у верхніх областях і незначними температурними напорами між ребрами і зовнішнім теплоносієм. Вказаний фактор знижує тепловіддачу поверхонь з плоскопаралельним оребреньям та не дає можливості проектувати теплообмінне обладнання великих вертикальних розмірів.

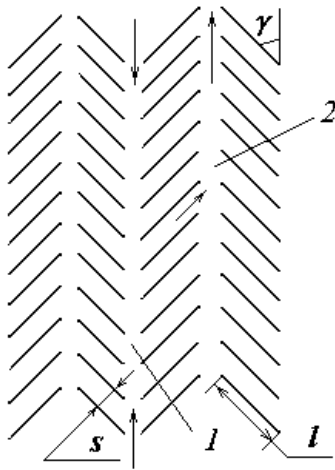
**Мета досліджень** – розробка математичної моделі теплопереносу для нових типів оребренья, які є більш ефективними в порівнянні з існуючими типами оребренья за умов вільної конвекції; отримання локальних та інтегральних теплових характеристик досліджуваного оребренья та їх порівняння з даними для відомих типів оребренья.

**Матеріали та методика досліджень.** Запропоновано нові конструкції вертикальних поверхонь з похилими дискретними ребрами (рис. 1), які дозволяють усунути вказані вище недоліки роботи вертикальних ребер за умов природної конвекції. Далі розроблено математичну модель та проведено чисельне дослідження теплообміну системи похилих ребер, розташованих на вертикальній поверхні, як показано на рис. 2. Кут нахилу ребер відносно вертикалі доцільно вибирати в межах  $0 < \gamma \leq 45^{\circ}$ , оскільки його збільшення призводить до зниження значень коефіцієнта тепловіддачі на поверхні. При такому нахилу ребер до них забезпечується підведення холодного теплоносія по каналах 1, незалежно від їх розташування по висоті системи, і відведення нагрітого теплоносія по каналах 2. При побудові математичної моделі передбачалася ідентичність умов теплообміну для кожного ребра, а теплообмін між нагрітим теплоносієм в каналі 2 і торцевими ділянками ребер, що примикають до цього каналу, вважався незначним. Такі припущення дозволяють виділити окрему комірку, що складається з двох ребер і розглядати умови теплообміну на окремому ребрі незалежно від його розташування по висоті поверхні, що є базовою.



**Рис. 1. Нові конструкції поверхонь з похилими ребрами:**

а – похиле оребрення з перегородками; б – оребрення типу «ялинка» з перегородками; в – оребрення типу «ялинка» без перегородок



**Рис. 2. Схема поверхні з похилим дискретним оребренням**

Розглянемо стаціонарний теплоперенос в одиночному ребрі. У загальному випадку за відсутності внутрішніх джерел тепла він описується рівнянням:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

де  $x, y, z$  – поточні координати;  $T$  – температура ребра. Після усереднення температури по товщині ребра рівняння (1) матиме вигляд:

$$\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z^2} + \frac{1}{\delta_p} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\delta_p/2} - \frac{1}{\delta_p} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=-\delta_p/2} = 0, \quad (2)$$

де  $\delta_p$  – товщина ребра;  $\bar{T} = \frac{1}{\delta_p} \int_{-\delta_p/2}^{\delta_p/2} T dy$  – усереднена по перерізу

температура ребра. Якщо на верхній і нижній поверхнях одиночного ребра значення локальних теплових потоків на границі розділу ребро – теплоносій, відповідно, рівні,

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\delta_p/2} = q_1(x, z), \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=-\delta_p/2} = q_2(x, z), \quad (3)$$

то рівняння (2) можна записати у безрозмірній формі:

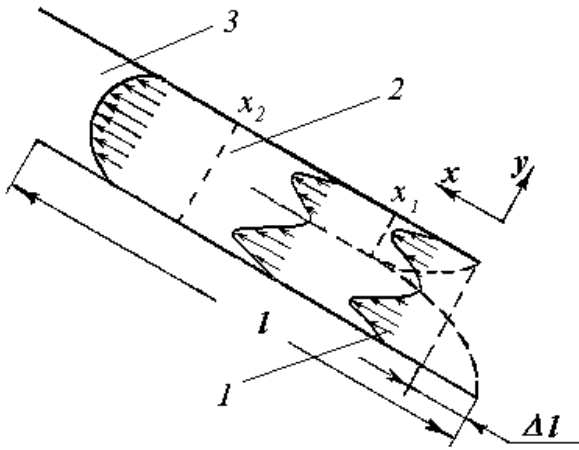
$$\frac{\lambda \delta_p}{h^2} \left[ \left( \frac{h}{l} \right)^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \right] = [q_1(X, Z) + q_2(X, Z)] / (T_0 - T_{g\infty}), \quad (4)$$

де  $X = \frac{x}{l}$ ,  $Z = \frac{z}{h}$ ,  $\theta = \frac{\bar{T} - T_{g\infty}}{T_0 - T_{g\infty}}$  – відповідно безрозмірні координати та

температура ребра;  $l, h$  – довжина і висота ребра;  $T_0, T_{g\infty}$  – температура основи ребра і зовнішнього теплоносія;  $q_1, q_2$  – локальні теплові потоки, що відводяться відповідно з верхньої і нижньої поверхні ребра.

Граничні умови для одиночного ребра з постійною температурою основи, якщо знехтувати тепловими втратами з торців, в безрозмірній формі мають вигляд

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{X=0} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{X=1} = 0, \quad \theta(Z=0) = 1, \quad \frac{\partial \theta}{\partial Z} \Big|_{Z=1} = 0. \quad (5)$$



**Рис. 3. Схема течії між сусідніми ребрами:**

- 1 – область ПШ; 2 – область перехідної течії; 3 – область розвиненої течії

Щоб визначити локальні теплові потоки  $q_1, q_2$ , розглянемо умови течії між двома похилими ребрами (рис. 3). Для розрахунку теплообміну в досліджуваній області використовуємо підхід, викладений в [3, 4]. Відповідно до цього підходу поверхня теплообміну розбивається на ділянки, що мають різні умови течії і теплообміну: 1) ділянка формування пограничного шару (ПШ); 2) область перехідної течії, на якій відбувається зімкнення ПШ, проте ще не настав режим розвиненої течії; 3) область розвиненої течії.

Вирази для густини теплових потоків, що відводяться на верхній і нижній поверхнях ребра, залежать від умов течії на відповідній ділянці ребра  $q_1 = q_{1,i}, q_2 = q_{2,i}$  ( $i = 1, 2, 3$ ; – індекс, що відповідає ділянкам з різними режимами течії).

На першій ділянці ребра при вільноконвективній течії теплоносія формується ламінарний ПШ. У цій області (область 1 на рис. 3) величина  $q_j = q_{j,1}$  обчислюються за формулою [7]:

$$q_{j,1} = \alpha_j^*(X)(T_0 - T_{g\infty}) \theta \left[ \frac{1}{X \theta^{5/3}} \int_0^X \theta^{5/3}(X') dX' \right]^{-1/4}, \quad (6)$$

де індекс  $j = 1, 2$ ; належить, відповідно, до верхньої і нижньої поверхні ребра.

Локальний коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha^*(x, T)$ , що входить у (6), як показують теоретичні та експериментальні дослідження [6], для похилої ізотермічної поверхні визначається за формулою:

$$\alpha^*(x) = c(\text{Pr})\lambda_g(\text{Gr}_x \text{Pr})^{1/4} / x, \quad (7)$$

де  $\text{Gr}_x = g \cos \gamma \beta (T - T_{g\infty}) \frac{x^3}{\nu^2}$  – число Грасгофа;  $\beta, \nu, \lambda_g$  – відповідно коефіцієнт об'ємного розширення, кінематична в'язкість та коефіцієнт теплопровідності зовнішнього теплоносія;  $\gamma$  – кут нахилу ребра відносно вертикалі;  $c(\text{Pr})$  – коефіцієнт, який залежить від числа Прандтля  $\text{Pr}$  зовнішнього теплоносія [5];  $g$  – гравітаційна постійна.

Для області перехідної течії (область 2 на рис. 3) справедливе співвідношення

$$q_{j,2} = \alpha_j^*(X, \theta)(T_0 - T_{g\infty})(\theta - \theta_m) \left[ \frac{1}{X(\theta - \theta_m)^{5/3}} \left( \int_0^{X_{j1}} \theta^5 dX' + \int_{X_{j1}}^X (\theta - \theta_m)^{5/3} dX' \right) \right]^{-1/4}, \quad (8)$$

де  $X_{11} = (x_1 + \Delta l)/l$ ,  $X_{21} = x_1/l$ ,  $\theta_m = \frac{T_{gm} - T_{g\infty}}{T_0 - T_{g\infty}}$ ,  $T_{gm}$  – температура теплоносія в точці змикання ПШ на сусідніх ребрах.

В області розвиненої течії (область 3 на рис. 3) маємо

$$q_{j3} = \alpha_c(T_0 - T_{g\infty})(\theta - \bar{\theta}_g), \quad (9)$$

де  $j=1,2$ ;  $\bar{\theta}_g = \frac{\bar{T}_g - T_{g\infty}}{T_0 - T_{g\infty}}$ ,  $\bar{T}_g = \int_0^1 T_g \tilde{U} dY$  – середньомасова температура теплоносія в міжреберному каналі;  $\tilde{U}(x)$  – швидкість теплоносія в каналі. Методи розрахунку величин  $\alpha_c$ ,  $\theta_m$ ,  $\bar{\theta}_g$  і  $\tilde{U}(x)$  наведено в монографії [3].

Чисельний алгоритм розв'язку рівняння (4) для розробленої математичної моделі викладений у [7]. Розрахунок рівняння (4) проведено з використанням неявної схеми змінних напрямків з позонним розрахунком теплових потоків, що відводяться, на ділянках поверхні ребра з різними умовами течії і теплообміну.

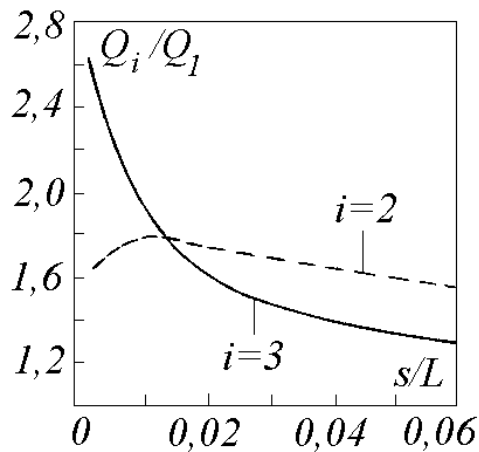
У процесі розрахунку поряд з обчисленням локальних теплових характеристик, таких як температурні розподіли, локальні значення коефіцієнтів тепловіддачі і густини теплових потоків, що відводяться з поверхонь ребра, визначалися також інтегральні характеристики ребра. Такими характеристиками є сумарний тепловий потік, що відводиться ребром  $Q$  з поверхонь 1 і 2.

$$Q = Q_1 + Q_2 = \int_0^l dx \int_0^h dy q_1(x, z) + \int_0^l dx \int_0^h dy q_2(x, z) \quad (10)$$

і теплова ефективність ребра

$$\eta = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{\int_0^1 dX \int_0^1 dZ [q_1(X, Z) + q_2(X, Z)]}{(T_0 - T_{g\infty}) \int_0^1 dX \int_0^1 dZ [\alpha_1(X, Z) + \alpha_2(X, Z)]} \quad (11)$$

**Результати досліджень.** Деякі результати розрахунків наведено на рис. 4–6. Проведено порівняння сумарних теплових потоків, що відводяться вертикальними поверхнями з безперервним плоскопаралельним оребренням, дискретним оребренням з шаховим розташуванням ребер і дискретним похилим оребренням. Порівняння проводилося для однакових ділянок вертикальної основи та однакової площі поверхні оребрення. Як базове вибрано вертикальне плоскопаралельне оребрення.



**Рис. 4.** Порівняння сумарних теплових потоків, що відводяться поверхнями з безперервним і дискретним оребренням різної конфігурації:  $i = 2$  – дискретне оребрення з шаховим розташуванням ребер;  $i = 3$  – дискретне похиле оребрення

Розрахунки проведено для сталевих ребер ( $\lambda = 40 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ ) з розмірами  $h \times l = 50 \times 20 \text{ мм}$  при нахилу ребер  $\gamma = 45^\circ$  (для похилого оребрення) при  $Gr_l = 2,92 \times 10^4$ . На рис. 4 наведено залежності сумарних теплових потоків, що відводяться, представлених у вигляді відношення  $Q_i / Q_1$  ( $i = 2, 3$ ), від вертикальних розмірів основи узятих в безрозмірній формі  $s/L$ , де  $s, L$  – відповідно міжреберна відстань і вертикальні розміри базової поверхні. На цьому рисунку наведено залежності для вертикальних поверхонь з дискретним ребрами при шаховому їх розташуванні  $Q_2 / Q_1$  (крива  $i = 2$ ) і для похилого дискретного оребрення  $Q_3 / Q_1$  (крива  $i = 3$ ), де  $Q_1$  – повний тепловий потік, що відводиться поверхнею з неперервним вертикальним плоскопаралельним оребренням. Порівняння проводилися при значних відстанях  $s$ , коли зімкнення ПШ на сусідніх ребрах відсутнє. Як видно

з рис. 4 для малих значень  $L$  поверхні з дискретним шаховим оребренням мають невелику перевагу перед похилим оребренням. Проте по мірі зростання вертикальних розмірів поверхні  $L$  сумарний тепловий потік, що відводиться системою похилих ребер, може в 2–2,5 раза перевищувати величину потоку, що відводиться від поверхні з безперервним оребренням. Це свідчить про доцільність використання похилого оребрення при конструюванні теплообмінних поверхонь, що мають значні вертикальні розміри.

На рис. 5 наведено розподіли відношення  $\bar{Nu}_i(Z)/\bar{Nu}_i(Z=0)$  по висоті сталевого ребра на нижній ( $i=1$ ) і верхній ( $i=2$ ) поверхнях ребра, де  $\bar{Nu}(Z) = \int_0^1 Nu(X,Z) dX$  – усереднене по координаті  $0x$  значення числа

Нуссельта, а  $\bar{Nu}(Z=0)$  його значення в основі ребра ( $Nu(x,z) = \alpha(x,z)x/\lambda_g$  – локальне число Нуссельта на поверхні ребра, що має координати  $x,z$ ). Наведені розподіли показують характер падіння чисел Нуссельта по висоті ребра.

При конструюванні теплообмінників важливою характеристикою є величина теплового потоку, що відводиться з одиниці об'єму, що займає оребрена поверхня

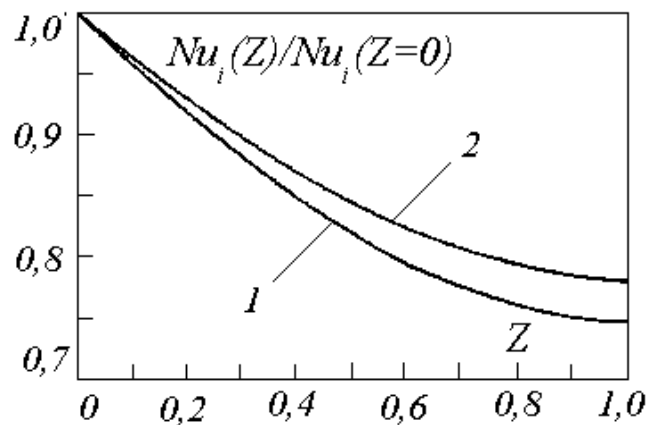


Рис. 5. Зміна числа Нуссельта  $\bar{Nu}_i(Z)/\bar{Nu}_i(Z=0)$  по висоті ребра: 1 – нижня поверхня ребра; 2 – верхня поверхня ребра

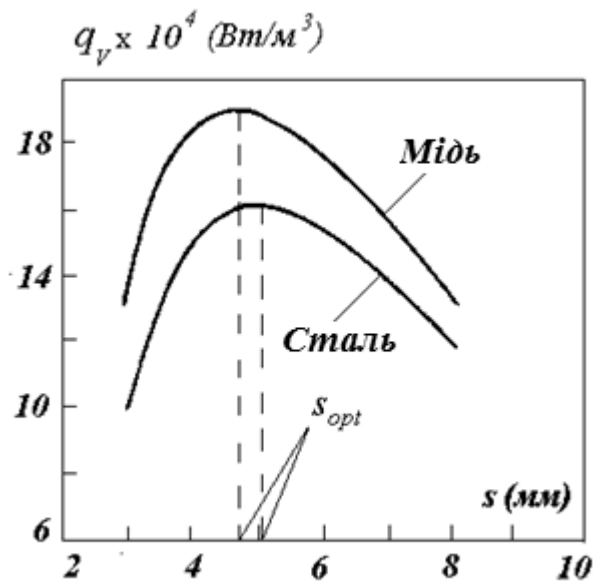


Рис. 6. Оптимальні міжреберні відстані  $s_{opt}$  для сталевих і мідних похилих ребер

$$q_V = \frac{Q}{V} = \frac{1}{s_0} \int_0^1 dX \int_0^1 dZ [q_1(X, Z) + q_2(X, Z)], \quad (12)$$

де  $V = l h s$  – об'єм міжреберної комірки (при малій товщині ребра  $\delta \ll s$ ). Варіюючи величину міжреберної відстані  $s$  визначимо максимальне значення  $q_V$  для мідних і сталевих похилих ребер, що мають кут нахилу  $\gamma = 45^\circ$  і розміри  $h \times l = 50 \times 20$  мм при  $Gr_l = 2,92 \times 10^4$ . Результати розрахунку наведено на рис. 6.

При інших рівних умовах для мідних ребер значення  $s_{opt}$  менші в порівнянні із значеннями для сталевих ребер. Якщо порівняти знайдені оптимальні відстані  $s_{opt}$  з максимальними значеннями товщини ПШ, який формується на окремому ребрі  $\delta_{max} = \delta(x = l)$ , то вказані відстані становлять, приблизно  $s_{opt} = 0,75 \delta_{max}$ . Таким чином, при виборі оптимальної конфігурації похилих ребер міжреберну відстань слід вибирати рівною 3/4 від максимальних значень товщини ПШ на ребрі.

Використовуючи нові типи оребрення можна суттєво зменшити як габаритні розміри, так і масу теплообмінного устаткування, теплообмін якого відбувається за умов вільної конвекції. Це стосується, наприклад, батарей опалення житлових і громадських будівель, калориферів, систем охолодження електронних схем і комп'ютерного обладнання та інших теплообмінних пристроїв.



## Висновки

1. Запропоновано нові типи похилого дискретного оребрення за умов природної конвекції. Розроблено математичну модель теплопереносу, проведено чисельний розрахунок та одержано основні інтегральні і локальні теплові характеристики для досліджуваної оребреної поверхні.

2. Проведено зіставлення похилого дискретного оребрення з вертикальним плоскопаралельним неперервним і дискретним оребренням. Показано, що використання оребрення нового типу в 1,5–2,5 раза інтенсифікує процеси теплопереносу в порівнянні з існуючими аналогами.

3. Базуючись на розробленій моделі теплопереносу визначено оптимальну геометрію поверхні з похилим дискретним оребренням, що дало можливість зменшити габарити і знизити металоємність теплообмінних пристроїв різного призначення.

## Список літератури

1. Горобець В.Г. Вільноконвективний спряжений теплообмін вертикальних поверхонь з неперервним оребренням / В.Г. Горобець, Н.М. Фіалко // Доп. НАН України. – 2002. – №3. – С.91–97.

2. Горобець В.Г. Исследование теплоотдачи новых типов вертикальных поверхностей с дискретным оребрением в условиях свободной конвекции / В.Г. Горобец, // Тр. Второй Российской конф. по теплообмену. – М., 1998. – Т.3. – С.58–60.

3. Горобец В. Г. Теплообмен при обтекании неизотермических развитых поверхностей теплообмена / В. Г. Горобец – К.: «ЦП «Компринт», 2011. – 353 с.

4. Горобец В.Г. Экспериментальное исследование теплоотдачи вертикальных поверхностей с дискретным оребрением при естественной конвекции / В.Г. Горобец, В.В. Трепутнев // Пром. теплотехника. – 1999. – №1. – С.55–60.

5. Джалурия И. Естественная конвекция / И. Джалурия – М.: Мир, 1983. – 200 с.

6. Спэрроу. Интенсификация теплоотдачи свободной конвекцией от вертикальных дискретных пластин / Спэрроу, Пракаш // Теплопередача. – 1980. – №2. – С.34–41.

7. Raithby G.D. A general method of obtaining approximate solution to laminar and turbulent free convection problems / G.D. Raithby, K.G. Hollands // Advances in Heat Transfer. – 1975. – V.11. – Acad. Press. – New York. – P. 265–315.

*Предложены новые типы оребрения для плоских поверхностей для условий свободной конвекции. Использование новых типов оребрения существенно улучшает габаритные и весовые характеристики теплообменного оборудования, используемое в условиях естественной конвекции. Разработана математическая модель и проведены численные расчеты для вертикальных поверхностей с наклонным дискретным оребрением. Получены локальные и интегральные характеристики исследуемых поверхностей. Проведено сопоставление полученных результатов с данными для плоскопараллельного непрерывного и дискретного оребрения. Показано, что применение дискретного наклонного оребрения в 1,5–2,5 раза повышает его тепловую эффективность по сравнению с непрерывным плоскопараллельным оребрением.*

***Наклонное дискретное оребрение, свободная конвекция, теплоперенос, тепловая эффективность оребрения.***

*The new types of fins on the flat surfaces for conditions of free convection are proposed. The using of new types of fins improves overall and mass characteristics of heat-exchange equipments, which are used in the conditions of natural convection. For vertical surfaces with sloping discrete fins a mathematical model is developed and numeral calculations are conducted. Local and integral characteristics of the surfaces with sloping discrete fins are found. Comparison of the found results with data for flat parallel continuous and discrete fins is conducted. It is determined that application of discrete sloping fins in 1,5–2,5 time promotes his thermal efficiency as compared to continuous and discrete vertical parallel fins.*

***Sloping discrete fins, free convection, heat transfer, thermal efficiency of fins.***

УДК 621. 3. 066. 5

## **ВИКОРИСТАННЯ ЕКОЛОГІЧНО-БЕЗПЕЧНИХ І ЕРОЗІЄСТІЙКИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ КОНТАКТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ**

***І. П. Радько, кандидат технічних наук***

*Наведено результати досліджень щодо використання в контакт-деталях на основі срібла малотоксичної добавки оксиду олова замість токсичного оксиду кадмію, який належить до першої групи токсичності.*

***Контакт-деталі, комутаційні апарати, плазма, електрична дуга, енергія, електрична ерозія.***

Нині актуальною проблемою в аграрному виробництві є вдосконалення ремонту комутаційних апаратів та забезпечення екологічно-безпечної їх експлуатації.

Методи відновлення контакт-деталей електричних апаратів, що застосовувалися раніше, не враховували особливостей формування і будови плазмових покриттів.

**Мета досліджень** – підвищення економічної ефективності та експлуатаційної надійності комутаційних апаратів при їх ремонті, використовуючи екологічно-безпечні та ерозієстійкі композиційні матеріали.

**Матеріали та методика досліджень.** Електромеханічні апарати з контактними комутаційними елементами становлять 90 % актуального ринку комутаційних апаратів завдяки вагомим перевагам над апаратами з напівпровідниковими комутаційними елементами (глибина комутації, пе-