

УДК 536.24

Є.М. Письменний, Е.Я. Епік,
О.В. Баранюк**СТРУКТУРА ПОТОКУ І ТЕПЛООБМІН У
КАНАЛАХ ТЕПЛОВІДВОДІВ ПРИ РОЗРІЗАН-
НІ РЕБЕР І ЇХ ПОВОРОТАХ****Вступ**

У даний час стрімкі темпи розвитку електронно-обчислювальної техніки, радіоелектронної апаратури (РЕА) і персональних комп'ютерів (ПК) ставлять на перше місце питання забезпечення їх надійної роботи. При вирішенні цієї проблеми застосовуються різноманітні методи охолодження, серед яких одним із найбільш простих, дешевих і надійних в експлуатації є примусове повітряне охолодження.

Охолодження малогабаритних елементів РЕА і ПК вимагає використання нових перспективних поверхонь, теплова ефективність яких досягається не тільки за рахунок розвитку самих поверхонь, але і завдяки організації турбулізуючих ефектів різної природи.

У зв'язку з цим в НТУУ "КПІ" були проведені дослідження з інтенсифікації теплообміну в радіаторах із плоскими ребрами дією на структуру потоку за рахунок розрізання ребер на "пелюстки" і подальшого повороту розрізних частин ребер щодо набігаючого потоку на кути 30 і 45° [1–3]. У працях [1–3] показано, що в умовах вимушеної конвекції при поворотах "пелюсток" інтенсифікація теплообміну може досягати 65 % порівняно з пластинчастим оребренням. При цьому було обґрунтовано існування оптимальної глибини розрізання ребер $h_p/h = 0,6$, при якій спостерігається максимальне зростання тепловіддачі (до 25 % при такому ж зростанні втрат на тертя). Праця [3] свідчить, що за відсутності повороту "пелюсток" спостерігається збільшення інтенсивності теплообміну, що пов'язане з перебудовою течії при розрізанні і турбулізацією потоку. Цілком очевидно, що поворот "пелюсток" сприяє не тільки вихроутворенню в потоці, але і появі тангенціальної швидкості, яка викликає додаткову інтенсифікацію теплообміну порівняно з розрізною поверхнею без повороту "пелюсток". Якісний вплив підгинання ребра аналогічний дії на потік "вінглетів" – плоских елементів,

що встановлюються із зазором на робочій поверхні під різними кутами [4].

Нижче наведено результати експериментальних досліджень з вимірювання турбулентних характеристик потоку (осереднених у часі швидкостей і середньоквадратичних пульсацій швидкості) в напіввідкритих міжреберних каналах з поворотом "пелюсток" при оптимальній глибині розрізки, а також результати дослідження конвективного теплообміну у вказаних умовах.

Постановка задачі

Метою дослідження є вивчення структури потоку і теплообміну в напіввідкритих міжреберних каналах з розрізанням та поворотом отриманих "пелюсток" відносно набігаючого повітряного потоку. Ці дослідження необхідні для створення нових ефективних радіаторів, характерних для елементів охолодження ПК.

Особливості методики проведення досліджень

Робоча ділянка експериментальної установки є каналом довжиною 961 мм і висотою 71 мм, на бічних стінках якого вмонтовуються рухомі профільовані вставки з плавними входом і виходом. Така конструкція дає можливість варіювати розмірами поперечного перерізу каналу залежно від вибраних габаритних розмірів досліджуваних моделей і забезпечує рівномірний розподіл швидкості набігаючого потоку w_n по всьому перерізі робочої ділянки перед моделлю.

Для вимірювання турбулентних характеристик потоку (осереднених у часі швидкостей і середньоквадратичних пульсацій швидкості) використовувалася прецизійна термоанемометрична система ДІСА 55М з датчиком типу 55P11 ДІСА, вольфрамова нитка якого мала діаметр 5 мкм при довжині 1,2 мм. Датчик встановлювався в стандартну державку типу Н21 ДІСА. Методика вимірювань детально описана в [5].

Для зменшення аеродинамічного впливу на течію в напіввідкритому міжреберному каналі державка датчика розміщувалась вздовж по потоку. При установці моделі таке розміщення державки забезпечувало перпендикулярність нитки датчика набігаючому потоку і паралельність розрізці ребра. Таким чином, нитка реагувала на сумарну збуреність, що створюється при течії в міжреберному каналі і в місці розрізки.

На рис. 1 наведено конструкцію і вказано основні геометричні розміри моделей.

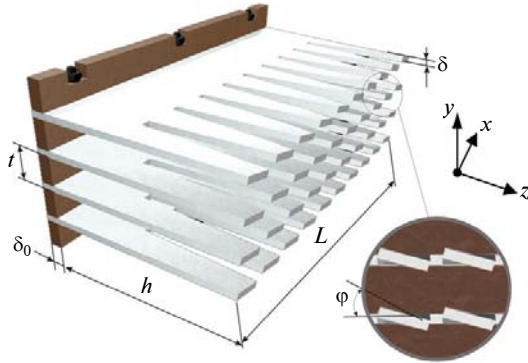


Рис. 1. Дослідна поверхня

Досліджувані поверхні склалися з плоскої основи товщиною $\delta_0 = 5$ мм і чотирьох ребер товщиною $\delta = 2$ мм, висотою $h = 70$ мм і довжиною $L = 140$ мм, розмішених з кроком $t = 14$ мм. Особливість досліджуваних поверхонь полягала в тому, що торцеві частини ребер розрізались на відносну глибину $h_p/h = 0,6$, а потім поверталися на кут $\varphi = 10, 20$ і 30° відносно набігаючого потоку.

Відносна глибина розрізки $h_p/h = 0,6$ моделей була фіксованою, оскільки згідно з експериментальними дослідженнями [3, 5] поверхні, ребра яких розрізались на вказану глибину, мають найбільшу інтенсивність теплообміну.

Результати вимірювань подані у вигляді таких розподілів:

- відносних швидкостей по висоті каналу $w/w_H = f(z/h)$ у фіксованих перерізах $x/L = \text{const}$;
- відносних осереднених (по висоті ребра) швидкостей вздовж ребра $\overline{w}/w_H = f(z/h)$;
- середньоквадратичних пульсацій швидкості по висоті ребра $\sqrt{w'^2}/w_H = f(z/h)$ у фіксованих перерізах $x/L = \text{const}$;
- осереднених (по висоті ребра) пульсацій швидкості по довжині ребра $\overline{\sqrt{w'^2}}/w_H = f(z/h)$.

Осереднення по висоті ребра проводилося таким чином:

$$\overline{w}/w_H = \sum w/w_H / n, \quad (1)$$

$$\overline{\sqrt{w'^2}}/w_H = \frac{\sum \sqrt{w'^2}/w_H}{n}, \quad (2)$$

де w і w' – відповідно усереднена в часі швидкість і середньоквадратична пульсація швидкості; n – кількість вимірювань по висоті ребра.

На підставі розподілів (2) було оцінено сумарну збуреність потоку, характерну для даного типу оребрення, яку можна розглядати як аналог ступеня турбулентності:

$$Tu = \frac{\sum \sqrt{w'^2}/w_H}{m}, \quad (3)$$

де m – кількість вимірювань по довжині ребра.

Експерименти по дослідженню турбулентних характеристик потоку проводилися в центральній площині міжреберного каналу в різних перерізах по висоті і довжині ребра при фіксованій швидкості набігаючого потоку $w_H \approx 10$ м/с.

Результати досліджень та їх аналіз

Розподіл швидкостей потоку. Розподіл відносної усередненої в часі швидкості по висоті міжреберного каналу наведено на рис. 2, а, б.

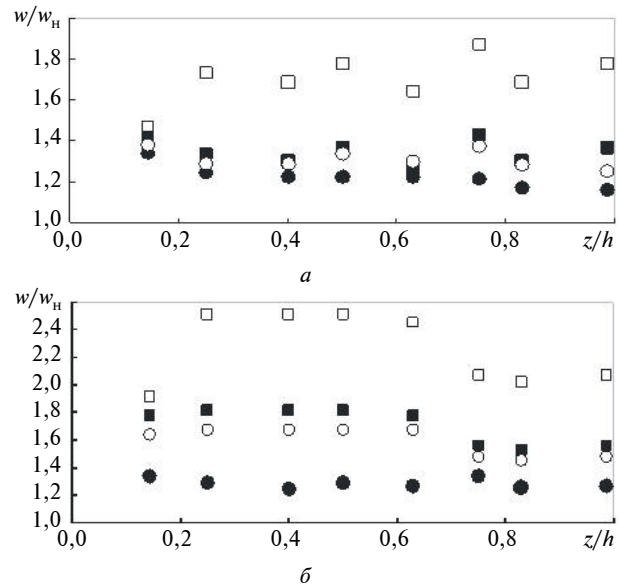


Рис. 2. Розподіл відносної швидкості по висоті ребра на вході (а) в міжреберний канал ($x/L = 0,007$) і на виході (б) з нього ($x/L = 0,75$): ● – $\varphi = 0^\circ$; ○ – $\varphi = 10^\circ$; ■ – $\varphi = 20^\circ$; □ – $\varphi = 30^\circ$

Аналізуючи наведені на рис. 2, а дані, можна констатувати, що поблизу передньої кромки “пелюстки” відносна швидкість потоку w/w_H в діапазоні зміни кута φ від 0 до 20° знаходиться в межах 1,2–1,4. Для випадку максимального

повороту “пелюсток” ($\varphi = 30^\circ$) характер розподілу міняється, про що свідчать збільшення значень w/w_H від 1,65 до 1,85. Таким чином, основна перебудова течії має місце при зміні кута φ від 20 до 30° .

Аналіз розподілів швидкостей поблизу виходу з каналу (рис. 2, б) показує, що для всіх досліджуваних кутів φ в перерізі $z/h = 0,63$ відношення w/w_H є мінімальним і практично зберігається на всій розрізній частині ребра. Цей факт можна пов'язати з наявністю взаємодії потоків у гладкому каналі, утвореному нерозрізною частиною ребра, і в напіввідкритому каналі, утвореному розгорненими на кут φ щодо потоку “пелюстками”.

Незважаючи на якісну подібність профілів швидкості спостерігаються також і істотні кількісні відмінності; так, наприклад, при $\varphi = 10^\circ$ і $z/h = 0,63$ відношення $w/w_H \approx 1,65$, тоді як при $\varphi = 30^\circ$ і $z/h = 0,63$ w/w_H воно досягає 2,5. Це свідчить про збільшення прискорення потоку при підгинанні “пелюсток” перш за все у зв'язку із зростанням захарашення каналу. При $z/h > 0,63$ значення w/w_H зменшуються до 1,6 і 2 при $\varphi = 10$ і 30° , відповідно. В обох областях ($z/h < 0,63$ і $z/h > 0,63$) характер розподілів зберігається рівномірним, проте при $\varphi = 30^\circ$ і $z/h = 0,143$ відносна швидкість зменшується до $w/w_H \approx 1,95$, оскільки інтенсивне вихроутворення в кутах уповільнює течію.

Розподіли осередненої по висоті ребра відносної швидкості (рис. 3) мають монотонно зростаючий характер і свідчать про загальну тенденцію до зімкнення приграничних шарів, що розвиваються на поверхнях ребер. Максимальні значення w/w_H мають місце при $\varphi = 30^\circ$ за рахунок підтискання потоку відігнутими “пелюстками”.

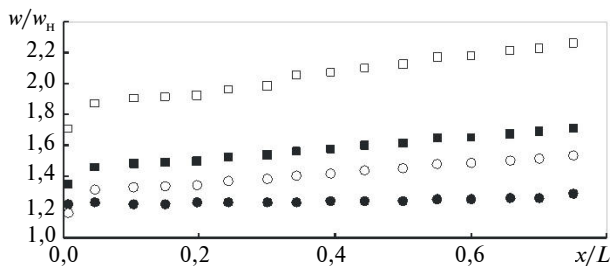


Рис. 3. Зміна осередненої по висоті ребра відносної швидкості вздовж ребра: ● – $\varphi = 0^\circ$; ○ – $\varphi = 10^\circ$; ■ – $\varphi = 20^\circ$; □ – $\varphi = 30^\circ$

Розподіл пульсацій швидкості. Аналіз експериментальних даних (рис. 4, а, б) свідчить про те, що розподіл пульсацій швидкості по висоті ребра з розрізкою і поворотом “пелюсток” має немонотонний характер – у всіх досліджених випадках виникають як максимуми, так і мінімуми пульсацій швидкості. Параметром, що розшаровує, служить кут повороту “пелюсток”.

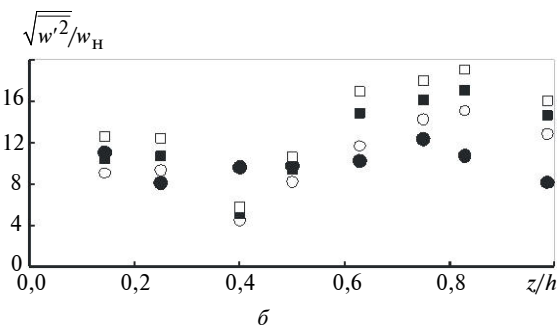
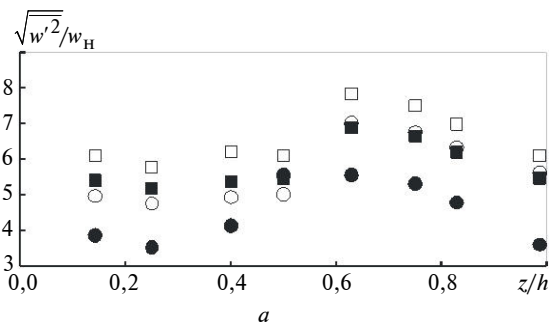


Рис. 4. Розподіл пульсацій швидкості вздовж ребра на вході (а) в міжреберний канал ($x/L = 0,007$) і на виході (б) з нього ($x/L = 0,75$): ● – $\varphi = 0^\circ$; ○ – $\varphi = 10^\circ$; ■ – $\varphi = 20^\circ$; □ – $\varphi = 30^\circ$

Місцеположення максимуму пульсацій швидкості поблизу входу (рис. 4, а) для всіх кутів повороту “пелюсток” збігається з мінімумом відносної швидкості w/w_H і відповідає перерізу $z/h = 0,63$. Максимальний рівень пульсацій (до 8 %) відповідає куту повороту $\varphi = 30^\circ$. Мінімум пульсацій швидкості розташовується в перерізі $z/h = 0,25$, що спостерігається також у випадку без повороту “пелюсток”.

На виході з каналу максимум і мінімум пульсацій зміщуються до відкритого торця ребра. Так, згідно з рис. 4, б мінімум пульсацій швидкості (4,8–5 %) зміщується в переріз $z/h = 0,4$, а максимум (8,7–15,8 %) – в переріз $z/h = 0,82$.

Подібний розподіл пульсацій швидкості, на нашу думку, викликаний впливом вихрових

структур, що розвиваються в кутах між основою і ребрами. В міру просування потоку вглиб каналу область, зайнята цими вихровими структурами, збільшуватиметься, що зрештою приведе до зсуву екстремумів у розподілі пульсацій швидкості.

На рис. 5 наведено результати розподілу пульсацій швидкості вздовж ребра, осереднених по його висоті.

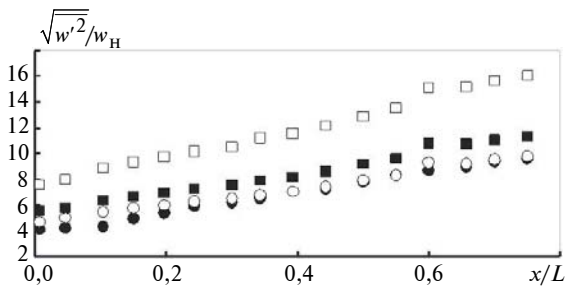


Рис. 5. Зміна осереднених по висоті ребра пульсацій швидкості вздовж ребра: ● – $\varphi = 0^\circ$; ○ – $\varphi = 10^\circ$; ■ – $\varphi = 20^\circ$; □ – $\varphi = 30^\circ$

Аналіз дослідних даних свідчить, що по довжині каналу пульсації швидкості монотонно зростають для всіх розглянутих випадків. За відсутності повороту “пелюсток” по довжині ребра спостерігається зростання пульсацій від 4 до 10 %. Поворот “пелюсток” на кут $\varphi = 10^\circ$ призводить до незначного збільшення пульсацій швидкості. Помірне зростання пульсацій швидкості по довжині (5,5–11,5 %) має місце при $\varphi = 20^\circ$. Проте при $\varphi = 30^\circ$ спостерігаються значні зміни пульсацій швидкості по довжині (до 8,16 %).

Інтенсифікація теплообміну. Для оцінки впливу кута повороту “пелюсток” на інтенсивність теплообміну при постійній відносній глибині розрізання використано експериментальні дані [2], на основі яких було запропоновано залежність

$$Nu = 0,12 Re^{0,75} \Psi^{-0,3} f(h_p/h) f(\varphi), \quad (4)$$

де Ψ – коефіцієнт оребрення.

Розрахунок інтенсифікації теплообміну проводився на основі даних для випадку оптимального розрізання ребра при $\varphi = 0^\circ$ і сталому коефіцієнті оребрення ($\Psi = \text{const}$, $f(h_p/h) = 1,245$ при $h_p/h = 0,6$):

$$Nu_0 = 0,015 \Psi^{-0,3} Re^{0,75}. \quad (5)$$

Таким чином, маємо

$$Nu/Nu_0 = f(\varphi). \quad (6)$$

На основі вимірювань пульсацій швидкості в центральній області каналу при проведенні подальшого осереднення по його висоті і довжині було оцінено сумарний турбулізуючий ефект у вигляді виразу (3) як аналог ступеня турбулентності Tu . Вплив кута повороту “пелюсток” був пов’язаний із змінами відносної турбулентності Tu/Tu_0 , де значення Tu_0 відповідає випадку $h_p/h = 0,6$ при $\varphi = 0^\circ$ ($Tu_0 = 6,8 \%$). Інтенсифікацію теплообміну можна записати у вигляді

$$Nu/Nu_0 = (Tu/Tu_0)^{0,24}. \quad (7)$$

За допомогою наведених на рис. 6 даних можна зробити висновок про те, що при кутах повороту “пелюсток” до 20° зростання теплообміну (до 6 %) супроводжується збільшенням турбулентності в 1,23 раза, тоді як при $\varphi = 30^\circ$ турбулентність потоку зростає в 1,7 раза при інтенсифікації теплообміну на 13,6 %.

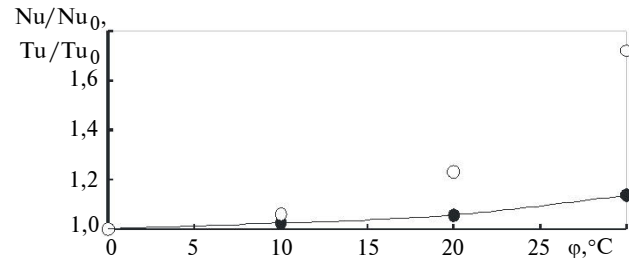


Рис. 6. Залежність інтенсифікації теплообміну і зростання турбулентності від відносної глибини розрізання ребер: ● – $Nu/Nu_0 = f(\varphi)$; ○ – $Tu/Tu_0 = f(\varphi)$; ----- – розрахунок за формулою (7)

Необхідно зазначити, що подальше збільшення турбулізації потоку поворотом “пелюсток” на кути понад 30° призводить до посилення аеродинамічних ефектів і зростання опору в три рази при зростанні інтенсифікації теплообміну на 50 %. Таким чином, з погляду на теплоаеродинамічну ефективність підгинання “пелюсток” доцільне за відсутності жорстких вимог до витрат потужності на прокачування теплоносія.

Висновки

Аналіз структури потоку і теплообміну в напіввідкритому міжреберному каналі розвине-

них поверхонь із розрізними підігнутими ребрами показав, що:

- поворот розрізних ребер у діапазоні кутів $\varphi = 0-30^\circ$ призводить до збільшення ступеня турбулентності Tu від 6,8 до 11,7 %, тобто в 1,72 раза;
- із збільшенням кута повороту “пелюсток” у вказаному діапазоні зміни φ теплообмін зростає на 13,6 % за рахунок додаткової турбулізації потоку;
- запропоноване рівняння подібності (7) свідчить про пряму кореляцію між інтенсифі-

кацією теплообміну і зростанням сумарної збуреності потоку.

Розрізання і поворот розрізних частин ребер є перспективним засобом інтенсифікації теплообміну та методом підвищення теплової ефективності систем охолодження елементів РЕА й ПК, в складі яких застосовується така оребрена поверхня.

Для визначення впливу інших параметрів розрізання – ширини “пелюсток” і товщини ребра – на інтенсифікацію теплообміну необхідно проводити подальші дослідження.

Е.Н. Письменный, Э.Я. Эпик, А.В. Баранюк

СТРУКТУРА ПОТОКА И ТЕПЛООБМЕН В КАНАЛАХ ТЕПЛОТВОДОВ ПРИ РАЗРЕЗАНИИ РЕБЕР И ИХ ПОВОРОТАХ

Приведены результаты экспериментального исследования структуры потока (распределений осредненных во времени скоростей и их пульсаций) и теплообмена в межреберных полукрытых каналах при оптимальной глубине разрезки ($h_p/h = 0,6$) и повороте разрезных частей ребер на угол $\varphi = 10-30^\circ$. Обоснована прямая корреляция интенсификации теплообмена и роста суммарной возмущенности потока.

E.M. Pysmennyu, E.Ya. Epik, O.V. Baranyuk

STRUCTURE OF FLOW AND HEAT EXCHANGE IN CHANNELS OF HEATSINKERS AT CUTTING OF FINNS AND THEIR TURNS

This paper highlights the research results of the flow structure (distributors of time-averaged velocities and their fluctuations) and heat exchange for the interfin half-open channels at the optimum depth of cutting ($h_p/h = 0,6$) and the turn of cut parts of ribs on $\varphi = 10...30^\circ$ angle. Moreover, we substantiate the direct correlation of heat exchange intensification and the growth of total flow disturbances of stream.

1. Письменный Е.Н., Бурлей В.Д., Терех А.М. и др. Влияние разрезки, поворотов и отгибки ребер на теплоаэродинамические характеристики поверхностей теплообмена // Промышленная теплотехника. – 2003. – 25, № 1. – С. 10–16.
2. Письменный Е.Н., Бурлей В.Д., Терех А.М. и др. Теплообмен плоских пластинчатых поверхностей с разрезным оребрением при вынужденной конвекции // Там же. – 2005. – 27, № 4. – С. 11–16.
3. Письменный Е.Н., Эпик Э.Я., Баранюк А.В. и др. Структура потока в полукрытых плоских каналах с разрезными стенками элементов охлаждения РЭА // Там же. – 2007. – 28, № 4. – С. 11–16.
4. Kotcioglu I., Ayhan T., Olgun H., Ayhan B. Heat transfer and flow structure in a rectangular channel with wing-type vortex generator // Tr. J. of Engineering and Environmental Science. – 1988. – 22. – P. 185–195.
5. Дыбан Е.П., Эпик Э.Я. Теплообмен и гидродинамика турбулизированных потоков. – К.: Наук. думка, 1985. – 294 с.

Рекомендована Радою
теплоенергетичного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
6 вересня 2010 року