

ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 536.24

О.В. Баранюк, Є.М. Письменний,
О.В. Семеняко

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПОТОКУ В МІЖРЕБЕРНИХ КАНАЛАХ ПОВЕРХОНЬ З ПЛАСТИНЧАСТО-РОЗРІЗНИМ ОРЕБРЕННЯМ МЕТОДАМИ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Вступ

Забезпечення оптимальних режимів охолодження елементів радіоелектронної апаратури, персональних комп'ютерів (ПК) та інших теплонавантажених частин електронного устаткування вимагає нових рішень для вдосконалення систем охолодження. Одним із перспективних напрямків вирішення цього питання є використання тепловідвідних поверхонь з високою теплоаеродинамічною ефективністю, до яких можна віднести поверхні з розрізним оребрнням [1–3]. Питання інтенсифікації теплообміну при конструюванні розвинутих поверхонь нерозривно пов'язані з вивченням процесів турбулентного переносу теплоти та імпульсу.

На сьогодні накопичено великий досвід з вивчення закономірностей турбулентної течії в каналах прямокутного перерізу [4–6]. Але ще мало праць присвячено дослідженню структури потоку в міжреберних напіввідкритих каналах пластинчасто-ребристих поверхонь, а також у каналах із розрізними стінками. У зв'язку з цим в НТУУ “КПІ” виконані експериментальні дослідження закономірностей конвективного теплообміну поверхонь з пластинчасто-розрізним оребрнням, впливу глибини розрізки на інтенсивність теплообміну, а також на визначення структури потоку в центральній площині міжреберних каналів [7]. Встановлено, що розрізка поверхні ребра на “пелюстки” при відносній глибині розрізки $h_p/h = 0,4; 0,6; 0,8$ сприяє інтенсифікації теплообміну в 1,16–1,25 раза порівняно з пластинчасто-ребристою поверхнею без розрізки. Максимальна інтенсивність теплообміну спостерігається при глибині розрізки $h_p/h = 0,6$. Аеродинамічний опір у цьому випадку збільшується всього на 10–35%. Встановлено наявність кореляції між рівнем збудженості потоку та глибиною розрізки ребер, а також екстремальний характер цієї залежності. Так, для ребер з відотною глибиною розрізки $h_p/h = 0; 0,4; 0,8$ інтенсивність пульсацій становить $\overline{w'}/\overline{w} = 4,2\%; 5,5\%; 5,3\%$, відповідно, тоді як при $h_p/h = 0,6$ інтенсивність пульсацій досягає 7,3%.

Але існуючі традиційні методи експериментальних досліджень не дають можливості отримати поглиблену картину механізму інтенсифікації процесів переносу. Вирішити цю проблему певною мірою можна числовим моделюванням на основі сучасних програмних комплексів.

Постановка задачі

Дана стаття ставить за мету поглибити уявлення про вплив глибини розрізки на конвективний теплообмін та структуру потоку в напіввідкритих каналах розвинутих поверхонь, характерних для елементів охолодження ПК, методами числового моделювання, вивчити вплив інших геометричних параметрів розрізки.

Методика досліджень і конструкція моделі поверхні

Методика досліджень. При дослідженнях ставилася задача розрахувати тривимірний рух в'язкої рідини, що омиває розрізні ребра дослідної поверхні в поздовжньому напрямку.

Дослідна поверхня складається з плоскої мідної основи розмірами $L \times L = 70 \times 70$ мм завтовшки 3 мм, до якої припаяні пластинчасті ребра висотою $h = 35$ мм з кроком $t = 6,9$ мм, розрізані у верхній частині на окремі “пелюстки” прямокутної форми. Досліджувалися три відносні глибини розрізки: $h_p/h = 0,4; 0,6; 0,8$. Докладний опис тепловідвідних поверхонь і умов, в яких проводили дослідження, міститься в [1].

На рис. 1 зображено дослідну теплообмінну поверхню, що розміщена в плоскопаралельному каналі аеродинамічної труби. Тонкими осьовими лініями виділено дослідний елемент поверхні, стрілками показано напрямок повітряного потоку.

Елемент вибирався таким, щоб змоделювати гідродинамічну картину течії рідини в напіввідкритих каналах прямокутної форми, які утворені ребрами і основою теплообмінної поверхні. З цієї метою було вибрано середнє за шириною радіатора ребро, що за формою і конфігурацією відповідає натурному і розміщене на плоскій основі шириною, яка дорівнює кроку ребер.

Завдяки симетричності картин течії в поперечному перерізі міжреберних каналів область течії біля виділеного ребра обмежувалися двома площинами, що знаходяться на відстані на півкроку від осі ребра, а також поверхнями основи ребра (знизу) і стінки аеродинамічної труби (зверху). Взаємний вплив пограничних шарів, що розвиваються на поверхнях ребер, враховувався симетричними граничними умовами [8].

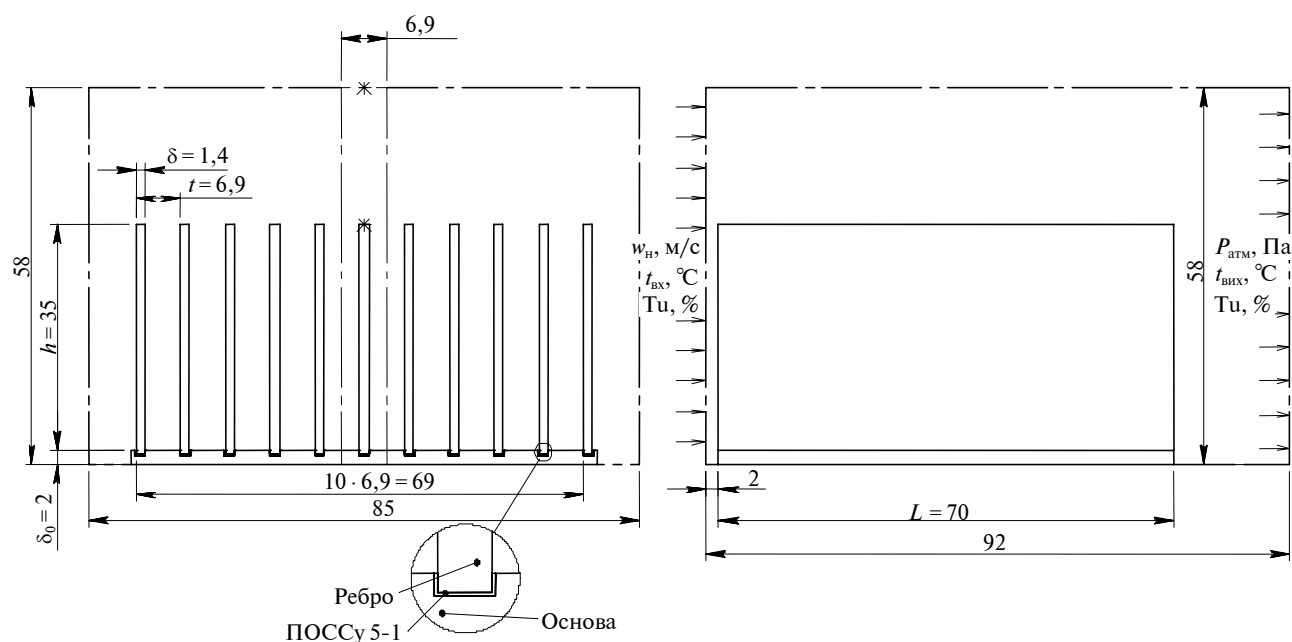


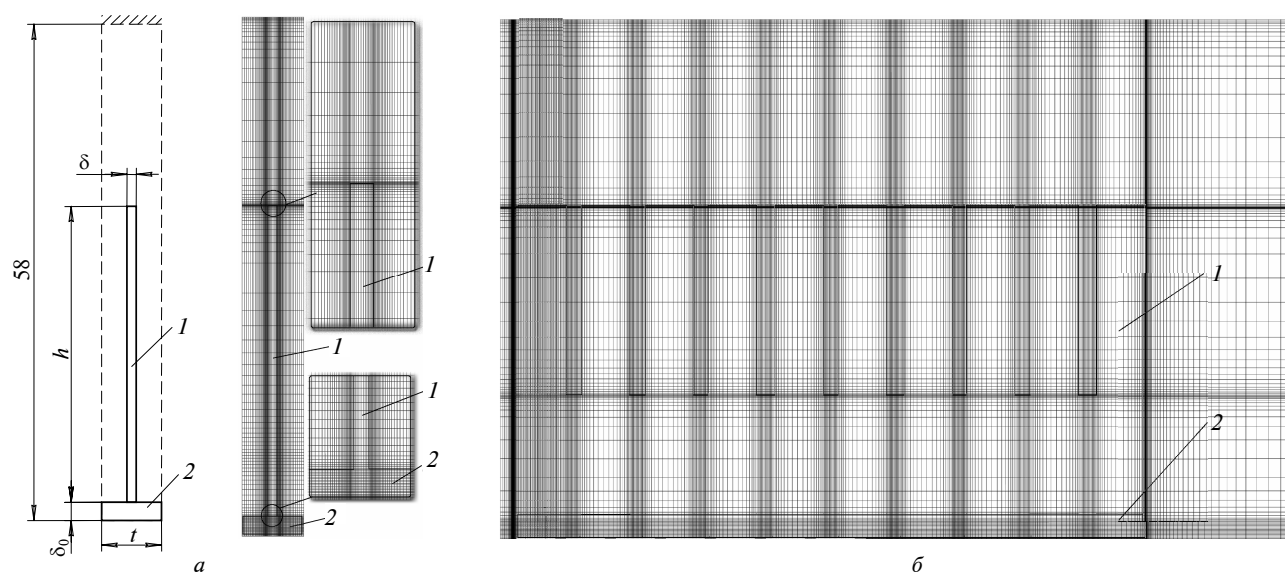
Рис. 1. Область розв'язання задачі

Розрахункова модель. У даній статті розробка розрахункової моделі ґрунтувалася на побудові геометричної моделі розрахункової області, дискретизація якої проходила у відповідності з уявленнями про вплив характеристик сітки скінченних елементів на стійкість та збіжність розв'язків, задання граничних умов [9]. Розрахункова область покривалася нерівномірною, зі згущенням до стінок основи і ребер елемента нагрівання прямокутною сіткою. Мінімальний та максимальний кроки при цьому становили $5 \cdot 10^{-5}$ і $1 \cdot 10^{-4}$ м. У поздовжньому напрямку розрахункова сітка складається з двох декартових сіток: рівномірної – з кроком $5 \cdot 10^{-5}$ м, розміщеної поблизу передньої

кромки ребра, і нерівномірної – із згущенням до торців ребра.

При моделюванні каверни, утвореної розрізкою, використовувалась декартова сітка, яка в поздовжньому напрямку згущалася до стінок каверни, а в поперечному розбивалася на рівномірні інтервали з кроком $1 \cdot 10^{-4}$ м. Тривимірна розрахункова сітка при $h_p/h = 0,6$ показана на рис. 2.

При моделюванні використовувалися така система координат, що і при проведенні експериментальних теплових досліджень. Додатний напрямок осі Ox відповідає поздовжньому омиванню поверхні ребра повітряним потоком, вісь Oy направлена від дна каналу вздовж висоти

Рис. 2. Розрахункова сітка: а – вид спереду; б – вид збоку: 1 – розрізне ребро при $h_p/h = 0,6$; 2 – основа

ребра, а додатний напрямок осі OZ вибирається по нормалі до площини рисунку.

Вибраний алгоритм розв'язання базується на неявному скінченнооб'ємному методі розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса, замкнених за допомогою моделі турбулентності Ментера, оскільки, як показали дослідження авторів [10, 11], ця модель є найбільш прийнятною для розрахунку відривних течій. Ініціалізація розв'язання проведена в абсолютній системі координат за умовами входу в канал.

Теплофізичні властивості повітря задавалися у вигляді поліноміальних функцій температури. Модель враховувала наявність прошарку олов'яно-свинцевого припою, завдяки якому ребро було припаяне до основи.

Теплофізичні властивості твердих тіл задавалися постійними. Стінки, які обмежують канал зверху та знизу, вважалися адіабатними. За визначальний розмір брався еквівалентний діаметр d_e теплообмінної поверхні.

Гідродинамічні початкові умови формувалися таким чином:

- на вході в канал задавалася температура $t_{вх}$; повний тиск повітряного потоку p_0 розраховувався на основі залежності

$$p_0 = p_s + \frac{1}{2}\rho|w_h|^2,$$

де p_s – статичний тиск; w_h – швидкість набігаючого повітряного потоку;

- інтенсивність турбулентних пульсацій бралися такою: $\sqrt{w'^2}/w = 4\%$, що характерно для аеродинамічної труби, на якій проводили дослідження теплообміну і аеродинаміки натурних теплообмінних поверхонь;

- на виході з каналу задавалися так звані “м'які” граничні умови (умова продовження розв'язання) [9].

Результати досліджень та їх аналіз

Достовірність числових експериментів визначалася порівнянням дослідних і розрахункових даних. З цією метою результати числових досліджень порівнювалися з результатами праці [7], де експериментальні дані давалися у вигляді:

- відносних швидкостей по висоті ребра $w/w_h = f(y/h)$ при фіксованих значеннях $x/L = \text{const}$;

- відносних швидкостей по довжині ребра $w/w_h = f(x/h)$ при фіксованих значеннях $y/h = \text{const}$;

- відносних осереднених (по висоті ребра) швидкостей вздовж довжини ребра $\bar{w}/w_h = f(x/L)$.

Нерозрізне ребро. Спочатку моделювалася течія на суцільному нерозрізному ребрі. Було обчислено розподіл швидкостей потоку в центральній площині міжреберного каналу в різних перерізах по висоті і довжині ребра при двох значеннях швидкості набігаючого потоку: 1-й режим – $w_h = 10 \text{ м/с}$, 2-й режим – $w_h = 5 \text{ м/с}$. Нижче проведено детальний аналіз результатів співставлення розрахункових і дослідних даних для 1-го режиму.

Зроблені в праці [7] висновки підтверджуються схемами течії, що відображають особливості розвитку пограничного шару на поверхні ребра і основи. Так, по довжині ребра (рис. 3) поблизу передньої гострої кромки спостерігається прискорення потоку, що є наслідком підтиснення потоку через утворення відривних пазирів на поверхні ребра і основи. Аналіз рис. 3 свідчить, що розподіл швидкості має максимум у перерізі $x/L \approx 0,1$ і мінімум при $x/L \approx 0,21$. Вказану зміну швидкості можна пояснити про-

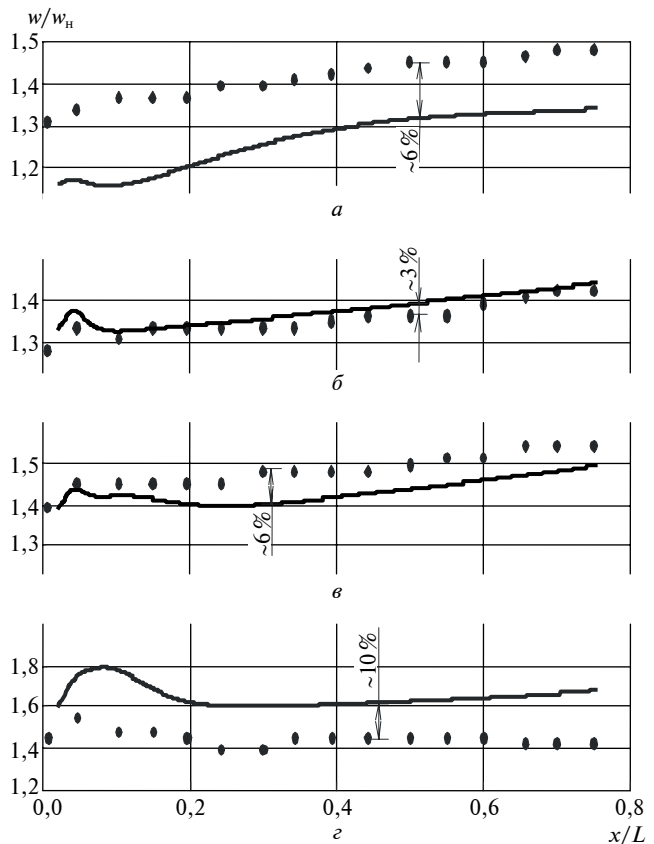


Рис. 3. Розподіл відносної швидкості по довжині нерозрізного ребра: а – $y/h = 0,99$; б – $y/h = 0,50$; в – $y/h = 0,25$; з – $y/h = 0,14$

явом так званого дифузотно-конфузотного ефекту, коли внаслідок утворення відривного пузиря виникає спочатку звуження перерізу, що веде до прискорення потоку з наступним розширенням, яке призводить до зменшення швидкості. В інших перерізах по довжині ребра швидкість потоку монотонно збільшується, що пов'язано зі збільшенням товщини пограничного шару.

Як видно з рис. 3, розрахункові дані добре узгоджуються з експериментальними. Так, при $x/L > 0,2$ і $y/h = 0,14$ відхилення не перевищує 10%. В інших перерізах при $0,25 < y/h \leq 0,83$ відхилення не перевищує $\pm 8\%$, причому відхилення дослідних даних від розрахункових у центрі каналу ($y/h = 0,5$) по довжині ребра становить 3%.

Динаміку зростання пограничних шарів на поверхні ребра в перерізі $y/h = 0,5$ ілюструє рис. 4, який підтверджує, що поблизу передньої гострої кромки утворюється відривний пузир довжиною 4–5 мм. Довжина зони відриву і розташування точки при'єднання добре узгоджуються з експериментальними працями [12, 13].

Біля торця ребра при $y/h = 0,99$ поблизу входу картина течії інша: внаслідок впливу потоку, що рухається над ребром, слабшає вплив відриву на передній кромці, що призводить до згладження максимуму, і течія носить монотонно прискорений характер.

Числовий експеримент підтвердив виявлену експериментальним шляхом асиметричність профілів швидкості поблизу входу в міжреберний канал (рис. 5) і поступове вирівнювання профілю швидкості під час просування потоку вглиб міжреберного каналу від основи в бік відкритого торця ребра.

Наведений на рис. 6 розподіл відносної осередненої по висоті ребра швидкості також добре

узгоджується з експериментальними даними: відхилення результатів експерименту і розрахунку в цьому випадку становить лише 0,5% при $w_n = 10$ м/с.

На рис. 7, а зображено результати обчислень ізотх по висоті ребра в прямокутному каналі, утвореному основою і ребрами розвинутої теплообмінної поверхні. З аналізу праць [4–6] відомо, що в кутах утримуються порівняно високі швидкості. Причина цього полягає в існуванні в прямих каналах з некруглим поперечним перерізом вторинних течій, що безперервно переносять імпульс з ядра течії в кути і тим самим викликають там збільшення швидкості [5, 6]. Для порівняння на рис. 7, б зображено ізотхи для прямокутного поперечного перерізу [6].

Картина обчислених ізотх в якісному відношенні не суперечить результатам праць інших авторів [4–6], тому можна стверджувати, що побудована числова модель течії на елементі теплообмінної поверхні з нерозрізними ребрами є працездатною, загальні принципи її побудови можуть бути використані для розробки складніших моделей.

Розрізне ребро. Формування профілю швидкості в каналах, утворених ребрами, розрізаними не по всій висоті, проходить в умовах росту пограничного шару на всій довжині нерозрізної частини ребра і його деформації в місці розрізки з наступним відновленням процесу його розвитку за розрізкою. Можна зробити припущення, що потік "прослизає" над розрізкою без збільшення товщини пограничного шару, а потім пограничний шар знову починає розвиватися по довжині "пелюстки" до місця наступної розрізки. Схему течії на розрізному ребрі можна простежити, аналізуючи рис. 8.

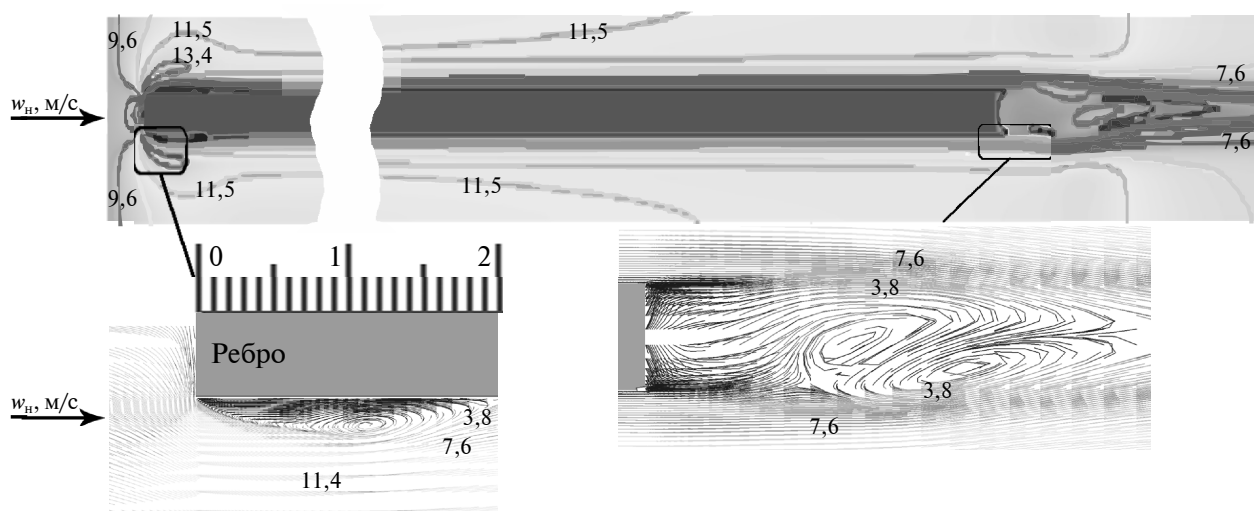


Рис. 4. Схема розподілу ізотх по довжині нерозрізного ребра

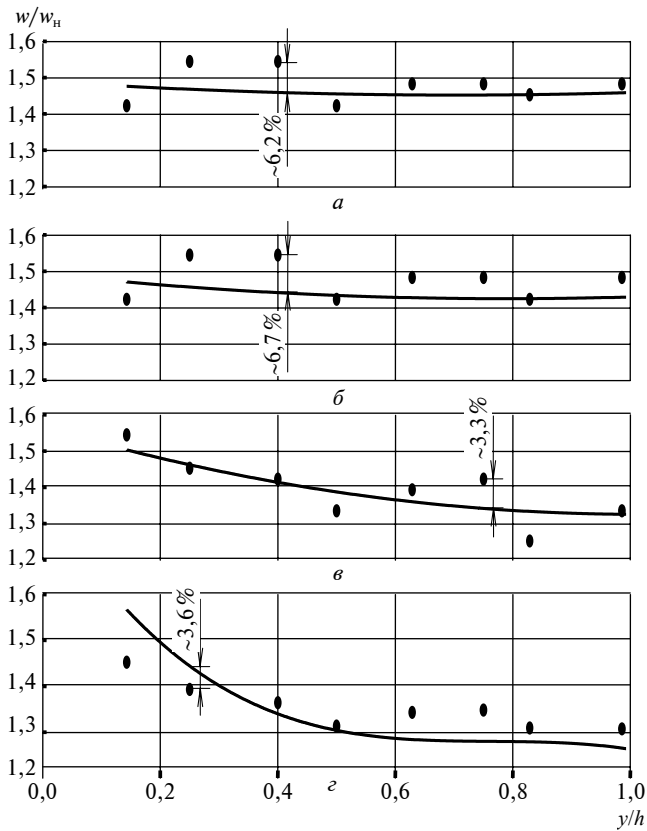


Рис. 5. Розподіл відносної швидкості по висоті нерозрізного ребра: а – $x/L = 0,75$; б – $x/L = 0,7$; в – $x/L = 0,0046$; г – $x/L = 0,0007$

На першій “пелюстці” утворюється відривний пузир, висота якого приблизно в два рази менше, ніж для випадку з нерозрізними ребрами. Цим можна пояснити той факт, що для розрізних ребер не спостерігається того значного

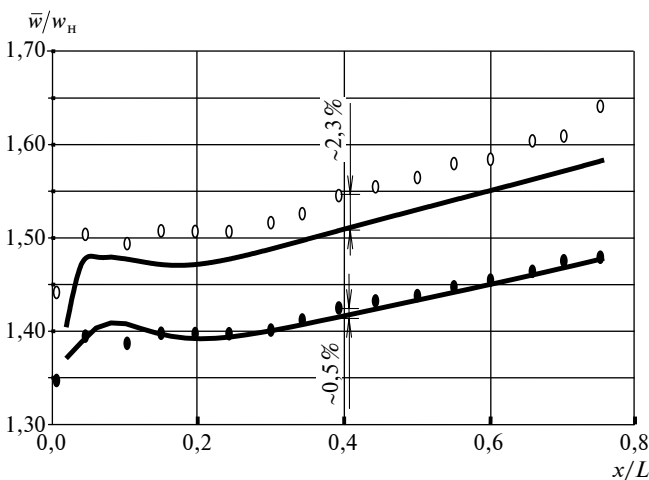


Рис. 6. Розподіл відносної осередненої по висоті ребра швидкості $\bar{w}/w_H$ вздовж нерозрізного ребра: ● – $w_H = 10$ м/с; ○ – $w_H = 5$ м/с; — — числовий розрахунок

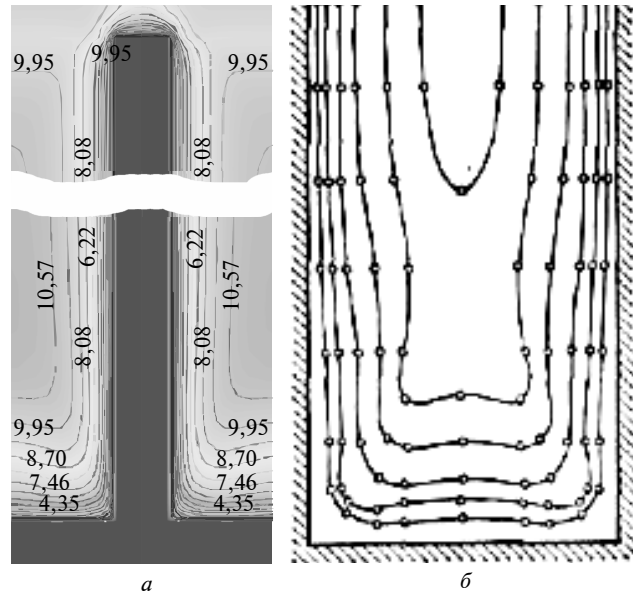


Рис. 7. Картина ізотех у кутах перетину основи і ребер дослідної поверхні (а) і (б) в каналі з прямокутним поперечним перерізом [6]

прискорення потоку в перерізах поблизу входу в міжреберний канал, як для нерозрізних ребер. Порівняння відривних пазирів, що утворюються на поверхні ребра поблизу передньої гострої кромки, показано на рис. 9.

При переміщенні потоку в каналі з розрізними стінками в місці розриву поверхні утворюються два симетричних вихори, які піджимаються основним потоком. Також видно, що перетікання речовини з одного міжреберного каналу в інший у місцях розрізки відсутні. Аналогічна картина течії спостерігається в усіх кавернах вздовж по потоку. В цілому по довжині усього розрізного ребра має місце стоншення пограничного шару порівняно з випадком течії вздовж ребер без розрізки, чим зокрема пояснюється зменшення висоти відривного пазиря біля передньої кромки ребра.

Аналіз розподілу швидкості по довжині міжреберного каналу з розрізними стінками поблизу передньої кромки ребра ($x/L = 0,007$ і $0,046$) при $h_p/h = 0,4; 0,6; 0,8$ та фіксованих значеннях y/h показав, що відхилення розрахункових даних від дослідних становить 8%. Так, як і для випадку з нерозрізними ребрами, поблизу передньої кромки ребра спостерігається характерне прискорення потоку, викликане утворенням відривних пазирів на поверхні основи та ребер, причому необхідно зауважити, що мінімальне значення швидкості спостерігається при $x/L = 0,1$. Отримані результати підтверджуються даними рис. 10–12.

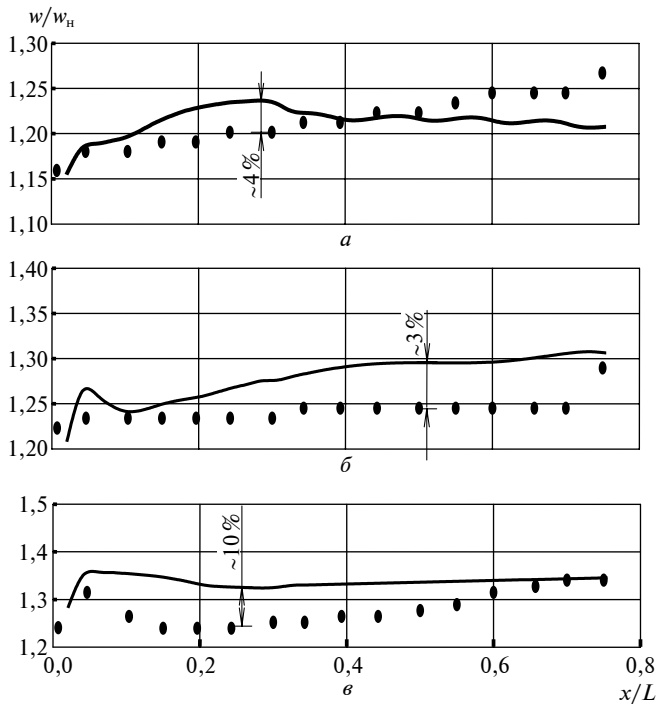


Рис. 11. Розподіл відносних швидкостей по довжині розрізного ребра з $h_p/h = 0,6$: а – $y/h = 0,99$; б – $y/h = 0,50$; в – $y/h = 0,14$

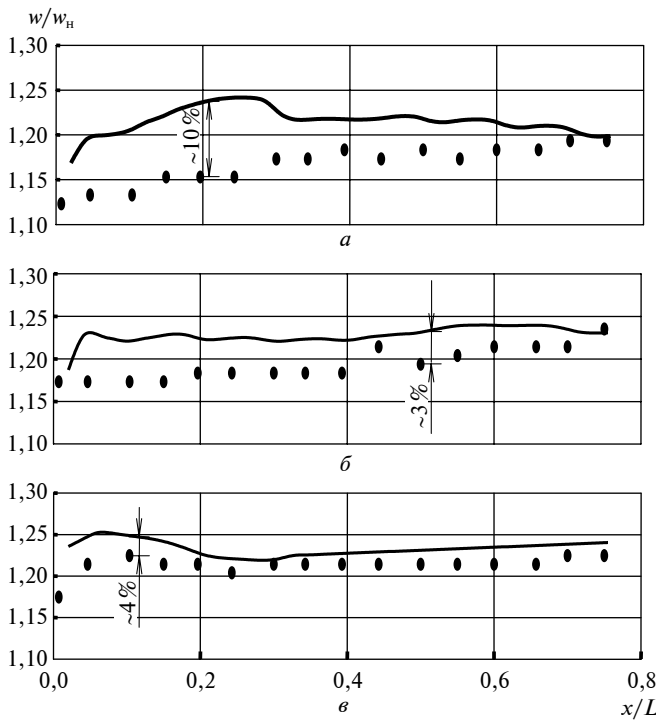


Рис. 12. Розподіл відносних швидкостей по довжині розрізного ребра з $h_p/h = 0,8$: а – $y/h = 0,99$; б – $y/h = 0,50$; в – $y/h = 0,14$

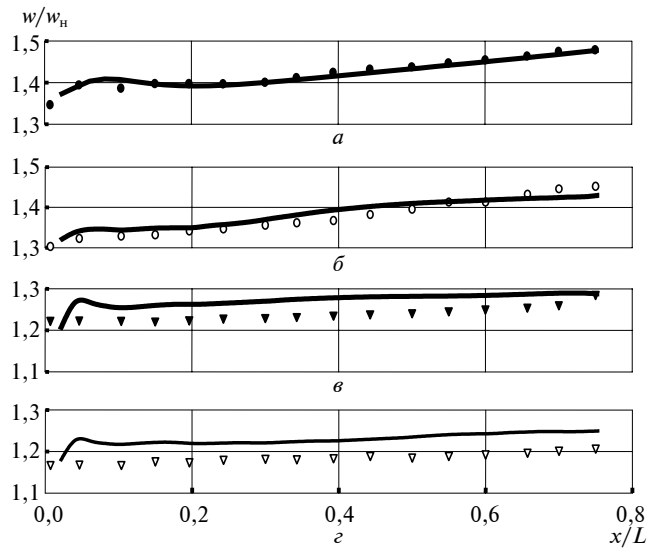


Рис. 13. Порівняння дослідних і розрахункових значень відносної осередненої по висоті ребра швидкості $\bar{w}/w_H$ для h_p/h по довжині ребра: а – $h_p/h = 0$; б – $h_p/h = 0,4$; в – $h_p/h = 0,6$; г – $h_p/h = 0,8$

Висновки

Результати досліджень розподілів швидкості в осьовій площині по довжині міжреберних каналів теплообмінних поверхонь із пластинчасто-розрізним оребренням, отриманих за допомогою числового моделювання, підтвердили висновки [2] про те, що розрізка ребра приводить до ряду аеродинамічних ефектів і сприяє інтенсифікації теплообміну. Числове моделювання дає змогу проаналізувати особливості таких аеродинамічних ефектів, як формування локальних відривів потоку на входних кромках ребер, розвиток пограничного шару на поверхнях “пелюсток” і суцільній частині розрізного ребра, деформацію пограничного шару в місці розрізки ребер та вихроутворення в прямокутних кавернах. З аналізу цих ефектів можна зробити такі висновки:

- в міжреберних каналах, сформованих суцільними нерозрізними ребрами, в центральній площині потік прискорюється під впливом пограничних шарів, що виникають на поверхнях ребер і основи теплообмінної поверхні;
- аналіз картин ліній течії по довжині ребра свідчить, що розрізка призводить до зменшення товщини пограничного шару, який розвивається на всій поверхні ребра в міру просування потоку вглиб міжреберного каналу;
- зі збільшенням відносної глибини розрізки h_p/h відносна швидкість w/w_i зменшується; для $h_p/h = 0,4, 0,6, 0,8$ в усіх перерізах по висоті ребра w/w_i змінюються в межах 1,35–1,45, 1,2–1,35 і 1,15–1,3, відповідно.

Результати числового моделювання підтверджуються результатами експериментальних дослід-

жень, що свідчить про працездатність застосованої числової моделі. Отже, подальші дослідження, спрямовані на визначення впливу на процеси переносу таких параметрів розрізної поверх-

ні, як ширина "пелюсток", товщина ребра і кут повороту "пелюсток" відносно набігаючого потоку, можуть бути проведені за допомогою числового моделювання.

А.В. Баранюк, Е.Н. Письменный, А.В. Семеняко

ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В МЕЖРЕБЕРНЫХ КАНАЛАХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПЛАСТИНЧАТО-РАЗРЕЗНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приведены результаты численных расчетов структуры потока в полуоткрытых каналах, образованных разрезными ребрами. Численные данные с достаточной точностью подтверждаются опытными данными. Показано, что разрезка ребра приводит к возникновению аэродинамических эффектов различной природы, что способствуют интенсификации теплообмена.

O.V. Baranyuk, Ye.M. Pysmennyi, O.V. Semenyako

RESEARCH OF STREAM STRUCTURE IN THE INTERCOSTALS DUCTING FROM THE SURFACES WITH PLATE-CUTTED FINNING OF NUMERICAL DESIGN METHODS

The paper under study presents the results of numerical calculations of stream structure in the half-open ducting, formed by split ribs. Through experiments performed, the numeral data is confirmed with sufficiently high accuracy. Moreover, we demonstrate that rib cutting causes the aerodynamic effects of different nature, promoting heat exchange intensifications.

1. Письменный Е.Н., Бурлей В.Д., Терех А.М., Бурлей В.Д., Руденко А.И. Влияние разрезки, поворотов и отгибки ребер на теплоаэродинамические характеристики поверхностей теплообмена // Промышл. теплотехника. — 2003. — 25, № 1. — С. 10–16.
2. Письменный Е.Н., Бурлей В.Д., Терех А.М., Баранюк А.В., Цвященко Е.В. Теплообмен плоских пластинчатых поверхностей с разрезным оребрением при вынужденной конвекции // Там же. — 2005. — 27, № 4. — С. 11–16.
3. Письменный Е.Н., Рогачев В.А., Терех А.М., Баранюк А.В., Бурлей В.Д. Теплоаэродинамическая эффективность новых теплоотводящих поверхностей с пластинчато-разрезным оребрением // Энергетика: економіка, технології, екологія. — 2007. — № 1. — С. 16–21.
4. Ибрагимов М.Х., Субботин В.Н., Бобков В.П., Сабелев Г.Н., Таранов Г.С. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. — М.: Атомиздат, 1978. — 296 с.
5. Павловський В.Г. Особливості гідродинаміки і теплообміну в некруглих каналах. — Харків: НТУ "ХПІ", 2006. — 104 с.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1969. — 742 с.
7. Письменный Е.Н., Эпик Э.Я., Баранюк А.В., Терех А.М., Бурлей В.Д. Структура потока в полуоткрытых плоских каналах с разрезными стенками элементов охлаждения РЭА // Промышл. теплотехника. — 2006. — 28, № 4. — С. 11–16.
8. Zhigang Li, Xiulan Huai, Yujia Tao, Huanzhuo Chen Effect of thermal property variations on the liquid flow and heat transfer in microchannel heat sinks // Applied Thermal Engineering. — 2007. — 27. — P. 2803–2814.
9. Диев М.Д., Железнякова А.Л. Компьютерное моделирование теплообмена и гидродинамики при течении воздуха в каналах с гофрами различной формы // Пробл. газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тр. XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, Санкт-Петербург, 21–25 мая 2007. — М.: Изд. дом МЭИ, 2007. — Т. 2. — С. 358–361.
10. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. — СПб.: Судостроение, 2005. — 390 с.
11. Богатко Т.В., Терехов В.И. Численное исследование интенсификации теплообмена при турбулентном обтекании одиночных диафрагм различной формы в трубе // Пробл. газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тр. XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, Санкт-Петербург, 21–25 мая 2007. — М.: Изд. дом МЭИ, 2007. — Т. 2. — С. 420–423.
12. Эпик Э.Я. Проблемы прогнозирования и расчета верхнего теплового ламинарно-турбулентного перехода (проблемный доклад) // Тр. V Минского междунар. форума по тепло- и массообмену, 24–28 мая 2004. — Минск, 2004. — С. 10–15.
13. Dyban E.P., Epik E.Ya., Yushina L.E. Heat transfer on the surface of longitudinally streamlined bodies in the presence of closed separation and external flow turbulization // Heat Transfer Conf. — Brighton, UK, 1994. — 3. — P. 25–30.