

А. В. БАРАНИЮК, В. А. РОГАЧОВ, А. М. ТЕРЕХ, А. И. РУДЕНКО

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА И АЭРОДИНАМИКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПЛАСТИНЧАТО-РАЗРЕЗНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

АННОТАЦИЯ Представлены результаты CFD-моделирования теплообмена и аэродинамического сопротивления пластинчато-ребристых поверхностей с разрезными ребрами в условиях вынужденной конвекции. Получены данные численного расчета средней теплоотдачи и аэродинамического сопротивления теплоотводящих поверхностей. Доказано, что разрезка повышает интенсивность теплообмена в 1,16–1,25 раза при одновременном росте аэродинамического сопротивления в 1,25–1,35 раза по сравнению с пластинчато-ребристой поверхностью без разрезки. Показана приемлемая сходимость результатов опытных и численных исследований.

Ключевые слова: численное моделирование, вынужденная конвекция, теплообмен, аэродинамическое сопротивление пластинчато-ребристая поверхность, разрезка ребра.

A. BARANYUK, V. ROGACHOV, A. TEREKH, A. RUDENKO

NUMERICAL SIMULATION OF THE CONVECTIVE HEAT EXCHANGE AND AERODYNAMICS OF THE SURFACES WITH THE LAMELLAR-SPLIT RIBBING

ABSTRACT Providing optimal modes for the cooling of the elements of radio-electronic equipment (REE), personal computers (PC) and other heat-stressed elements of electronic equipment is a vital problem the solution of which will provide their reliable functioning. Different methods are used for the solution of this problem, but the method of forced air cooling still remains to be the simplest, cheapest and easy-to-use. To increase the air cooling efficiency of the elements of REE and PC we use at the present time extended heat removal surfaces in the form of a flat base with plate ribs and needle-pin ribs fixed to it that increasingly fail to meet the requirements of a maximum heat removal and temperature drop on the heat-stressed element. Therefore, the researchers and the designers have to solve an important problem to increase the thermal efficiency of heat exchange of such small-size surfaces. This scientific paper describes the method of the intensification of heat emission due to the partial splitting of lamellar ribs along their height. This would allow us to create conditions for the initiation of separation of the boundary layer on the flat surface of the ribs, decrease the layer thickness and turbulize the flow passing over the ribbed surface. The research was done using the CFD models of lamellar-ribbed surfaces with split ribs to provide the forced convection. The numerical computation data of the average heat emission and aerodynamic resistance have been obtained.

Key words: numerical simulation, forced convection, heat exchange, aerodynamic resistance, lamellar-ribbed surface and the rib splitting.

Введение

В современных условиях повышения плотности компоновки элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и персональных компьютеров (ПК), увеличения их миниатюризации и степени интеграции, применяемых в них элементов, вопросы обеспечения оптимальных тепловых режимов изделий электронной техники с помощью систем охлаждения, а также методы их расчетов приобретают особую актуальность. Например, вследствие роста производительности и быстродействия ПК, уровень тепловых нагрузок на автономные элементы может достигать (100...150 Вт). Если 10-ть лет назад для обеспечения комфортного режима работы вычислительной техники достаточно было пассивных радиаторов, то сегодня требуются уже полноценные охлаждающие устройства с крупногабаритным радиатором и мощным вентилятором [1]. При этом необходимо отметить, что для решения этой проблемы уже разработаны системы с жидкостным или испарительным охлаждением [2, 3], но большинство пользователей отдает предпочтение самому простому, дешевому и удобному в эксплуатации воздушному охлаждению.

Современное теплоотводящее устройство работает в условиях ограниченности пространства, непосредственно у процессора и отводит от высокотемпературной площадки достаточно большой тепловой поток, порядка 10 Вт/см² и выше. Для решения этой задачи часто используют тепловые трубы, отводящие теплоту от теплонагруженного элемента, однако, остается проблема эффективного охлаждения зоны конденсации такой тепловой трубы. Большинство производителей комплектуют теплонагруженные элементы достаточно громоздкими радиаторами, имеющими, во многих случаях, малоэффективную поверхность теплообмена.

Одним из перспективных способов интенсификации теплообмена, за счет изменения конструкции теплоотводящего ребра радиатора, является создание на нем зон отрыва, дополнительного вихреобразования в пристенном слое, образование на ребре нескольких начальных участков и связанных с ними уменьшения толщины пограничного слоя и, как следствие, турбулизации в целом воздушного потока, омывающего ребристую поверхность и увеличение интенсивности теплообмена. Указанные условия могут возникать на ребре, например, в результате его гофрировки, перфориро-

© А. В. Баранюк, В. А. Рогачов, А. М. Терех, А. И. Руденко, 2017

вания [3–5], разрежки на короткие участки [6–10].

В литературе довольно широко освещены вопросы влияния изменения формы ребер на теплоаэродинамические характеристики теплоотводящих поверхностей. Например, по данным работ [3–9], разрезка вершин кольцевых ребер трубы позволяет увеличить интенсивность теплоотдачи на (12–36) %, однако, при этом наблюдается опережающий рост аэродинамического сопротивления по сравнению с ростом интенсивности теплообмена, что в целом заметно снижает суммарную теплоаэродинамическую эффективность всей поверхности.

Работы, посвященные экспериментальному исследованию теплоаэродинамических характеристик поверхностей с пластинчато-разрезным ребрением, позволили показать влияние разрезки ребер на процессы теплообмена и аэродинамики [1–5].

Смоделировать и описать физические процессы, происходящие на поверхности с пластинчато-разрезным ребрением можно современными численными методами, не прибегая к дорогостоящему и сложному физическому эксперименту.

Цель работы

Цель работы – разработать численную модель теплообмена и аэродинамики теплоотводящей поверхности в виде плоского основания с пластинчато-разрезными ребрами в условиях омывания ее воздушным потоком. Провести верификацию численной модели с экспериментальными данными.

Постановка задачи

Изучить, проанализировать и систематизировать данные модели. К ним относятся: температурные поля на основании и ребрах поверхности, детальные картины течения в пристеночном слое у корня ребра, в местах разрезки у вершин ребер. Используя численную модель, определить уровень интенсивности теплообмена и аэродинамическое сопротивление при условиях вынужденной конвекции в диапазонах чисел $Re = (2–11) \cdot 10^3$ и тепловых нагрузок $Q = 50 \dots 150$ Вт. Установить влияние относительной глубины разрезки ребра h_p/h на интенсивность теплообмена и аэродинамическое сопротивление и определить оптимальное значение h_p/h .

Исследуемая поверхность состоит из плоского медного основания размерами $L \times L = 70 \times 70$ мм толщиной 2,5 мм, к которому припаяны пластинчатые ребра высотой $h = 35$ мм с шагом $t = 6,9$ мм, разрезанные у их вершин на «лепестки» прямоугольной формы. Глубина разрезки изменялась в пределах $h_p/h = 0,4 \dots 0,8$. Ширина разрезки u равна толщине ребра $\delta = 1,4$ мм. Шири-

на «лепестков» ребер b составляла 5,7 мм [9].

На рис. 1 показана расчетная область теплоотводящей поверхности, размещенной в канале аэродинамической трубы сечением 58×85 мм. Тонкими осевыми линиями выделен исследуемый элемент поверхности, стрелками показано направление воздушного потока и подводимый к основанию тепловой поток.

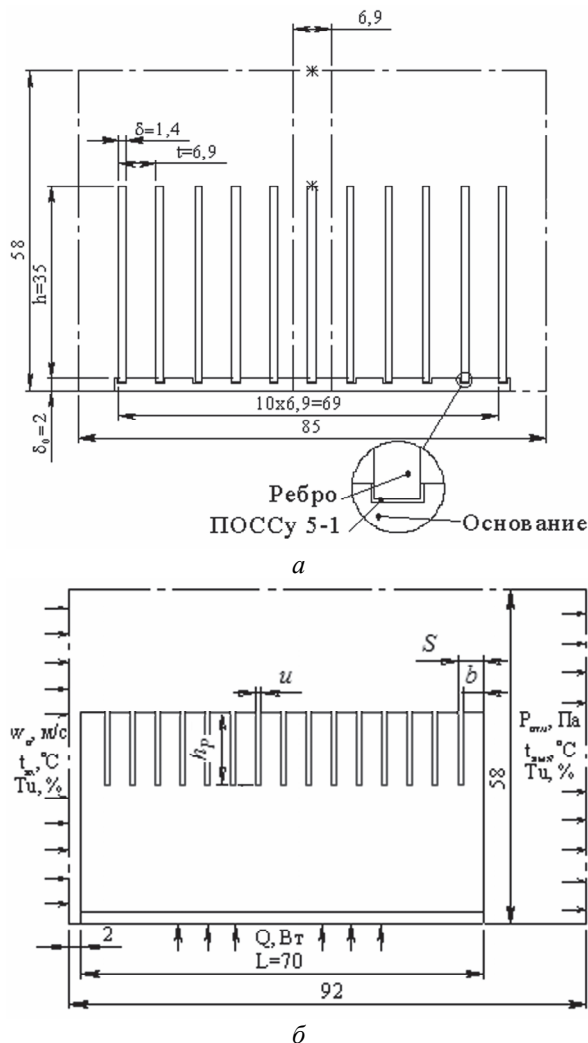


Рис. 1 – Исследуемая поверхность и расчетная область:
а – фронтальный вид; б – вид сбоку

Ввиду симметричности картины течения в поперечном сечении межреберных каналов область течения около выделенного ребра ограничивалась двумя плоскостями, находящимися на расстоянии полушага от оси ребра, а также поверхностями основания ребра (снизу) и стенки аэродинамической трубы (сверху). Взаимное влияние пограничных слоев, развивающихся на поверхностях ребер, образующих полуоткрытый канал, учитывалось симметричными граничными условиями [8].

Модель течения основывалась на построении геометрической модели расчетной области и

дискретизации ее в соответствии с представлениями о влиянии характеристики сетки конечных элементов на устойчивость и сходимость решения, задании граничных условий. Расчетная область покрывалась неравномерной, со сгущением к стенкам основания и ребер прямоугольной сеткой. Минимальный и максимальный шаги при этом составляли $5 \cdot 10^{-5}$ и $1 \cdot 10^{-4}$ м. В продольном направлении расчетная сетка состоит из двух декартовых сеток: равномерной густой с минимальным

шагом $5 \cdot 10^{-5}$ м, расположенной вблизи передней кромки ребра, и неравномерной со сгущением в окрестности торцов ребра.

При моделировании «каверны», образованной разрезкой ребер, использовалась неравномерная декартовая сетка, сгущающаяся в продольном направлении к стенкам «каверны». В поперечном – она разбивалась на равномерные интервалы шагом $1 \cdot 10^{-4}$ м. Трехмерная расчетная сетка для разрезного ребра с $h_p/h = 0,6$ представлена рис. 2.

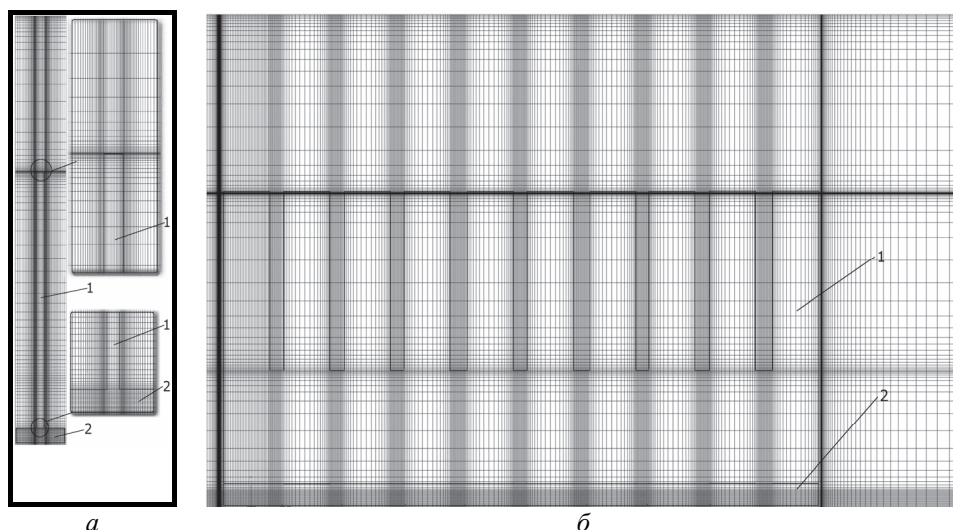


Рис. 2 – Расчетная сетка: а – вид спереди; б – вид сбоку; 1 – разрезное ребро при $h_p/h = 0,6$; 2 – основание

Выбранный алгоритм решения основывался на неявном конечно-объемном методе решения уравнений Навье-Стокса, замкнутых с помощью модели турбулентности Ментера, так как именно эта модель, является наиболее приемлемой для расчета отрывных течений [6, 7]. Инициализация решения проведена в абсолютной системе координат по условиям входа в канал.

Теплофизические свойства воздуха задавались в виде полиномиальных функций температуры. Модель учитывала наличие прослойки оловянно-свинцового припоя типа ПОССу 5-1, посредством которого ребра были припаяны к основанию. Теплофизические свойства твердых тел задавались постоянными. За определяющий размер принимался эквивалентный диаметр d_s проходного сечения канала.

Граничные условия формировались следующим образом:

- на входе в канал задавалась температура $t_{вх}$, полное давление воздушного потока p_0

$$p_0 = p_s + \frac{1}{2} \rho |w_n|^2, \quad (1)$$

где p_s – статическое давление; w_n – скорость набегающего воздушного потока;

- интенсивность турбулентных пульсаций

$\sqrt{w'^2}/w = 4\%$ характерная, для аэродинамической трубы в которой проведены исследования [9, 10];

- на выходе из канала – так называемые, «мягкие» граничные условия (условие продолжения решения) [8].

При задании тепловых граничных условий учитывалась плотность теплового потока, подводимая к основанию ребер

$$q = \frac{Q - Q_n}{zL}, \quad (2)$$

где Q – тепловой поток, подводимый к основанию модели; Q_n – потери; z – количество ребер модели; t – шаг между ребрами; L – длина основания.

Средний коэффициент конвективной теплоотдачи

$$\alpha = \frac{Q}{\Delta t_n F_n}, \quad (3)$$

где F_n – полная площадь теплоотдающей поверхности, $\Delta t_n = t - t_{нв}$ – среднеповерхностный температурный напор по отношению к омывающему потоку; $t_{нв}$ – средняя температура потока воздуха омывающего поверхность, определяемая балансовым методом

$$t_{пв} = t_{в} + \frac{Q}{2Gc_p}, \quad (4)$$

где $t_{в}$ – температура воздуха на входе; Q – количество подводимой к поверхности теплоты; G – расход воздуха в рабочем участке; c_p – теплоемкость воздуха.

Среднеповерхностная температура оценивалась путем осреднения значений температур, рассчитанных в центре каждой ячейки расчетной области.

Приведенный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{пр} = \frac{Q}{(\bar{t}_{осн} - t_{п})F_{п}}, \quad (5)$$

где $\bar{t}_{осн}$ – температура основания поверхности.

Аэродинамическое сопротивление поверхности определялось по разности абсолютных давлений ΔP между входом и выходом потока из моделируемого рабочего участка (рис. 1б). По значениям ΔP и фиксированной скорости набегающего потока рассчитывались числа Эйлера.

Результаты исследований и их анализ

Результат визуализации температурных полей основания и ребер с $h_p/h = 0,6$ представлен на рис. 3. На рисунке нанесены местоположение термопар (№ 1...9) и значения температур, полученные в эксперименте [9] (обозначение черным цветом) и расчетные значения в тех координатах, полученные при численном моделировании (обозначение красным цветом).

На рис. 4 приведен результат верификации экспериментальных и численных данных в виде графиков зависимости средних температур основания и ребер при $h_p/h = 0,6$ и $h_p/h = 0$ для скорости набегающего потока $w_n = 4,4$ м/с и различных тепловых нагрузках.

Средние температуры для всей теплоотдающей поверхности ($t_{ср.пов} \sim 31...45$ °С) и основания ($t_{осн} \sim 36...51$ °С) минимальны при $h_p/h = 0,6$. Отклонение опытных и расчетных значений температур находятся в пределах 2–7 % для разных Q .

Распределение температуры на неразрезной части поверхности ребра носит следующий характер:

- в области контакта основания и ребра, изотермы имеют некоторый излом, вследствие наличия между медным основанием и медным ребром прослойки тугоплавкого припоя с существенно более низкой теплопроводностью.

- на поверхности неразрезного ребра наблюдается однородное распределение температуры. Однако, по мере удаления от основания ребра температура монотонно уменьшается, как по длине, так и по высоте ребра. Темп уменьшения температуры зависит от скорости омывания и количества теплоты, подведенной к основанию ребра.

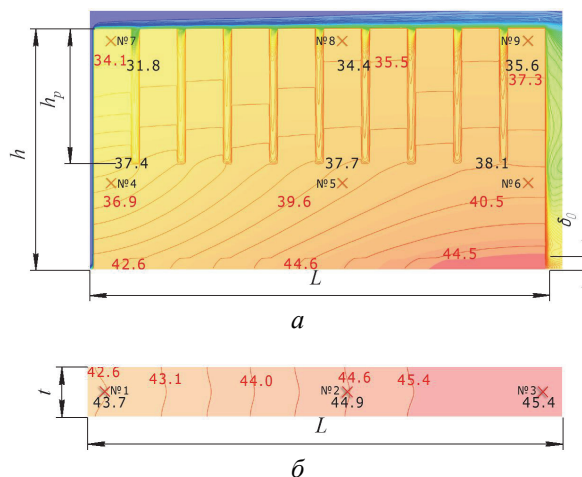


Рис. 3 – Температурное поле поверхности с $h_p/h = 0,6$ при $w_n = 4,4$ м/с, $t_{вх} = 19$ °С и $Q = 90$ Вт: а – распределение температур на поверхности ребра; б – распределение температур на поверхности основания

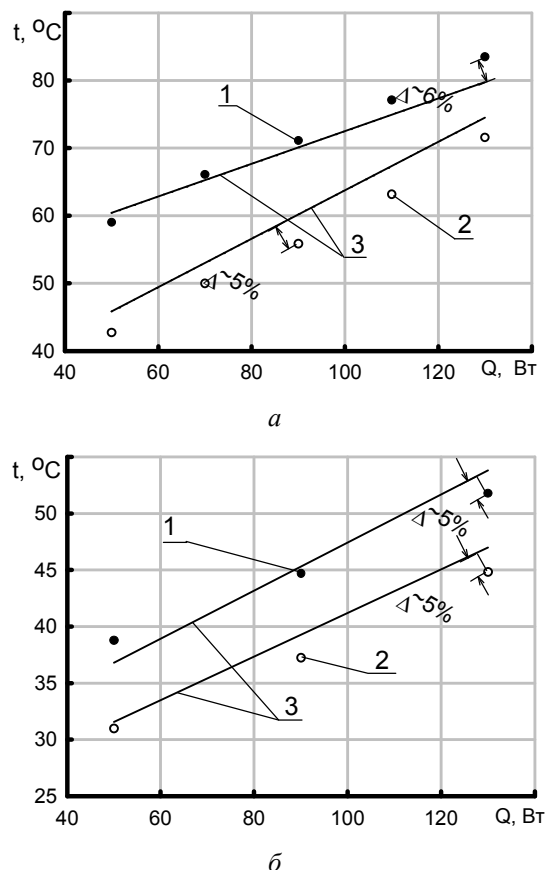


Рис. 4 – Зависимость средней температуры поверхности и основания от тепловой нагрузки при $w_n = 4,4$ м/с, $t_{вх} = 19$ °С: а – при $h_p/h = 0$; б – $h_p/h = 0,6$; 1 – $t_{осн}$; 2 – $t_{ср.пов}$; 3 – расчет

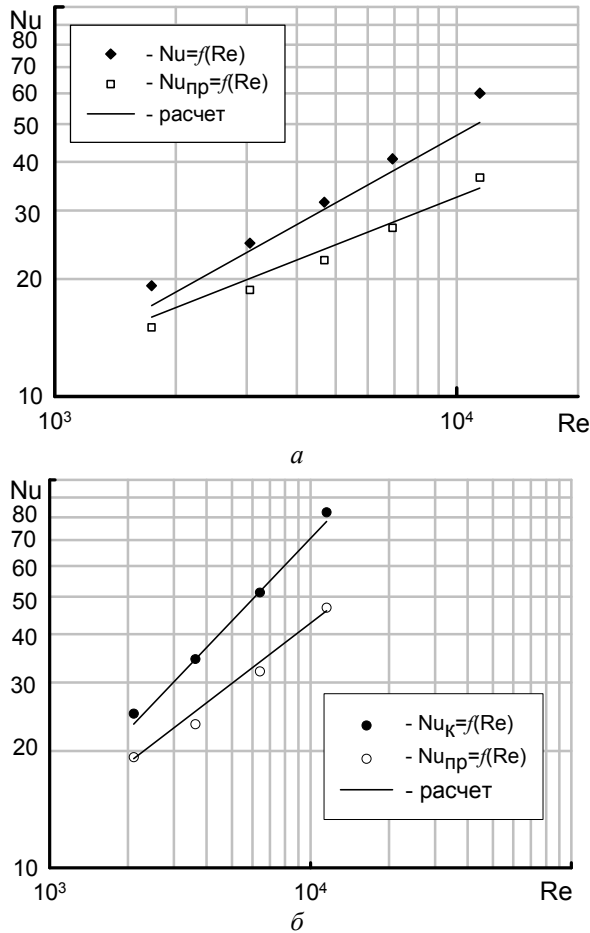


Рис. 5 – Верификация численной модели ребра без разрезки: а – при $h_p/h = 0$; б – при $h_p/h = 0,6$.

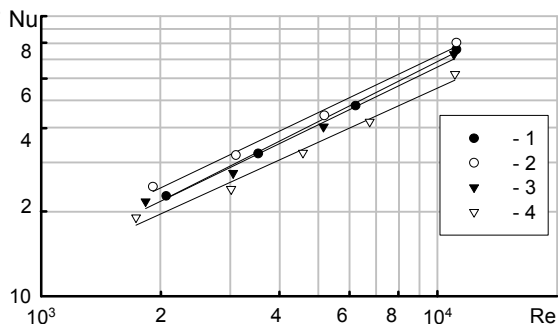


Рис. 6 – Результаты исследования теплообмена поверхностей с пластинчато-разрезным оребрением: 1 – $h_p/h = 0,4$; 2 – $h_p/h = 0,6$; 3 – $h_p/h = 0,8$; 4 – $h_p/h = 0$

По сравнению с неразрезным ребром температурное поле разрезного ребра (рис. 4б) имеет ряд особенностей. Характер распределения температур по толщине основания на неразрезной части ребра качественно сохранился таким же, как и на неразрезном ребре. Анализ же температурных полей на разрезных частях ребер свидетельствует о том, что:

- температурное поле каждого «лепестка» однородно, изменение температуры происходит

только по его высоте;

- разрезка ребра на «лепестки» создает условия для развития более тонкого пограничного слоя на каждом отдельном «лепестке»;

- увеличение глубины разрезки до $h_p/h = 0,6$ позволяет уменьшить температуру ребра, а дальнейшее ее увеличение приводит к ухудшению процесса теплоотвода.

Верификация данных численной модели по средним числам Нуссельта конвективного Nu и приведенного Nu_{пр} для неразрезных и разрезных ребер представлена на рис. 5.

Сравнительный анализ расчетных и опытных данных показал наличие максимума интенсивности теплообмена для поверхности с $h_p/h = 0,6$. Сравнение данных на рис. 5 показывает расхождение между опытными и расчетными значениями в пределах 2–10 %.

На рис. 6 приведены данные по влиянию параметра h_p/h на конвективный теплообмен исследуемых поверхностей. Точками на графиках обозначены экспериментальные данные, а линиями – расчетные.

Из рис. 6 следует, что разрезка ребер повышает интенсивность теплообмена во всем диапазоне изменения чисел Рейнольдса. Наибольшей интенсивностью теплообмена обладает поверхность с $h_p/h = 0,6$, а наименьшей с $h_p/h = 0$, т.е. поверхность со сплошными пластинчатыми ребрами без разрезки.

На рис. 7 представлены данные по исследованию аэродинамического сопротивления поверхностей с пластинчато-разрезным оребрением и влиянию на него относительной глубины разрезки h_p/h .

Рис. 7 свидетельствует о том, что численная модель в среднем на 12–17 % завышает данные по аэродинамическому сопротивлению. Анализ результатов показывает, что увеличение глубины разрезки приводит к росту сопротивления на 12 % при $h_p/h = 0,4$ и на 32 % при $h_p/h = 0,8$.

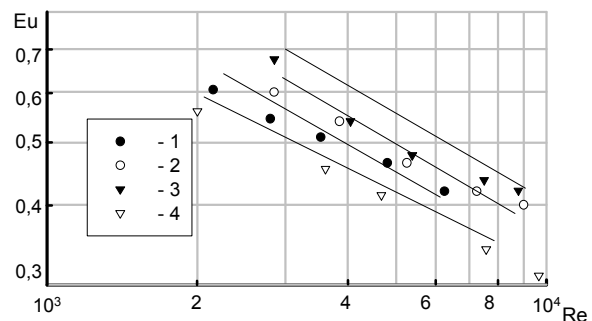


Рис. 7 – Результаты исследования теплообмена поверхностей с пластинчато-разрезным оребрением: 1 – $h_p/h = 0,4$; 2 – $h_p/h = 0,6$; 3 – $h_p/h = 0,8$; 4 – $h_p/h = 0$

Выводы

Численные исследования теплоаэродинамических характеристик поверхностей с пластинчато-разрезным оребрением показали, что:

- в условиях вынужденной конвекции пластинчато-ребристых поверхностей в диапазонах чисел $Re = (2-11) \cdot 10^3$ и относительной глубины разрезки ребер $h_p/h = 0,4-0,8$, разрезка повышает интенсивность теплообмена в 1,16–1,25 раза и аэродинамическое сопротивление в 1,25–1,35 раза по сравнению с пластинчато-ребристой поверхностью без разрезки;

- наибольшая интенсификация теплообмена достигается при относительной глубине разрезки пластинчатого ребра $h_p/h = 0,6$;

- пайка ребер к основанию увеличивает контактное термическое сопротивление между ними, а следовательно приводит к уменьшению эффективности теплосброса оребренной поверхности в целом, поэтому целесообразно использовать такие технологии, которые обеспечивают идеальный контакт, например, изготовление поверхности с помощью экструзии.

Список літератури

- 1 **Чернышев, А. А.** Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники / **А. А. Чернышев.** – Москва : Энергия, 1989. – 216 с.
- 2 **Пархоменко, Г. А.** Водные процедуры. Достоинство и недостатки водяных систем охлаждения / **Г. А. Пархоменко** // Мой компьютер. – 2004. – № 9. – С. 17–19.
- 3 **Мигай, В. К.** Теплообмен в поперечно-обтекаемых пучках труб с оребрением лепесткового типа / **В. К. Мигай, П. Г. Быстров, В. В. Федотов** // Тяжелое машиностроение. – 1992. – № 7. – С. 8–10.
- 4 **Eckels, P. W.** Heat Transfer and Pressure Drop Performance of Finned Tube Bundles / **P. W. Eckels, T. J. Rabas** // *Journ. of Heat Transfer.* – 1985. – Vol. 107. – P. 205–213.
- 5 **Таранян, И. Г.** Исследование влияния параметров оребрения на теплоотдачу и сопротивление шахматных пучков труб с поперечными гладкими и интегральными ребрами / **И. Г. Таранян, Ф. М. Иохведов, В. Б. Кунтыш** // Теплофизика высоких температур. – 1972. – Т. 10, №5. – С. 1049–1054.
- 6 **Sparrow, E. M.** Crossflow Heat Transfer for Tubes with Periodically Interrupted Annular Fins / **E. M. Sparrow, T. A. Myrum** // *Int. Jour. of Heat and Mass Transfer.* – 1985. – Vol. 28, No. 2. – P. 509–512.
- 7 **Кунтыш, Б. В.** Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения / **Б. В. Кунтыш, А. Н. Бессонный.** – Санкт-Петербург : Недра, 1996. – 508 с.
- 8 **Быстров, Ю. А.** Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / **Ю. А. Быстров, С. А. Исаев, Н. А. Кудрявцев, А. И. Леонтьев.** – Санкт-Петербург : Судостроение, 2005. – 392 с.
- 9 **Письменный, Е. Н.** Теплообмен плоских пластинчатых поверхностей с разрезным оребрением при вынужденной конвекции / **Е. Н. Письменный, В. Д. Бурлей, А. М. Терех, В. А. Рогачов, А. В. Баранюк** // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 27, № 4. – С. 11–16.
- 10 **Баранюк, А. В.** Аэродинамическое сопротивление пластинчатых поверхностей с разрезным оребрением при вынужденной конвекции / **А. В. Баранюк, Е. Н. Письменный, А. М. Терех, В. А. Рогачов, В. Д. Бурлей** // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 4. – С. 29–34.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Chernyshev, A. A.** (1989), *Obespechenye teplovykh rezhimov izdeliy elektronnoy tekhniki* [Provision of thermal modes of electronic products], Energy, Moscow, Russian.
- 2 **Parkhomenko, G. A.** (2004), "Vodnye protsedury. Dostoinstvo y nedostatky vodyanykh system okhlazhdeniya" [Water procedures. Advantages and disadvantages of water cooling systems], *My Computer*, No. 9, pp. 17–19.
- 3 **Migay, V. K., Bystrov, P. G., and Fedotov, V. V.** (1992), "Teploobmen v poperechno-obtekaemykh puchkakh trub s orebrenyem lepestkovoogo tipa" [Heat transfer in transversely streamlined tube bundles with a fin type finning], *Mashinostroenie severe* [Heavy Engineering], No. 7, pp. 8–10.
- 4 **Eckels, P. W., and Rabas, T. J.** (1985), "Heat Transfer and Pressure Drop Performance of Finned Tube Bundles", *Journ. of Heat Transfer*, Vol. 107, pp. 205–213.
- 5 **Taranyan, Y. H., Yokhvedov, F. M. and Kuntys, V. B.** (1972), "Yssledovanye vlyyanaya parametrov orebreniya na teplootdachu y soprotivlyeniye shakmatnykh puchkov trub s poperechnymy hladkymy y ynternalnymy rebramy" [Investigation of the influence of finning parameters on the heat transfer and resistance of chess bundles of tubes with transverse smooth and integral fins], *Teplofizyka vysokikh temperatur* [Thermal physics of high temperatures], Vol. 10, No. 5, pp. 1049–1054.
- 6 **Sparrow, E. M. and Myrum, T. A.** (1985), "Cross flow Heat Transfer for Tubes with Periodically Interrupted Annular Fins", *Int. Jour. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, No. 2, P. 509–512.
- 7 **Kuntys, B. V. and Bessonny, A. N.** (1996), *Osnovy rascheta y proektyrovaniya teploobmennikov vozdušno-ohlazhdeniya* [Basics of calculation and design of air cooling coils], Nedra, Saint-Petersburg, Russian.
- 8 **Bystrov, Y. A., Isaev, S. A., Kudryavtsev, N. A. and Leontiev, A. I.** (2005), *Numerical simulation of heat transfer enhancement in the vortex bags pipes Sudostroenie*, Saint-Petersburg, Russian.
- 9 **Pis'mennyi, E. N., Burley, V. D., Terekh, A. M., Rogachev, V. A., and Baranyuk, A. V.** (2005), "Teploobmen ploskykh plastynchatykh poverkhnostey s razreznym orebrenyem pry vynuzhdennoy konvektsyy" [Heat exchange of flat plate surfaces with cut-off fins in forced convection], *Industrial Heat Engineering*, Vol. 27, No. 4, pp. 11–16.
- 10 **Baranyuk, A. V., Pis'mennyi, E. N., Terekh, A. M., Rogachev, V. A., and Burley, V. D.** (2006), "Teploobmen ploskykh plastynchatykh poverkhnostey s razreznym orebrenyem pry vynuzhdennoy konvektsyy"

[Aerodynamic resistance of plate surfaces with cut-off fins in forced convection]", *Industrial Heat Engineering*, Vol. 28, No. 4, pp. 29–34.

Сведения об авторах (About authors)

Баранюк Александр Владимирович – кандидат технических наук, старший преподаватель, Кафедра атомных электрических станций и инженерной теплофизики, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; г. Киев, Украина; e-mail: aleksandrW@i.ua, ORCID 0000-0001-6008-6465.

Baranyuk Alexandr – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Lecturer. Department of nuclear power plants and engineering thermophysics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine.

Рогачов Валерий Андреевич – кандидат технических наук, доцент, Кафедра атомных электрических станций и инженерной теплофизики, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; г. Киев, Украина; e-mail: valeriy_rogachov@ukr.net, ORCID 0000-0001-5489-874X.

Rogachov Valeriy – Candidate of Technical Sciences, associate professor. Department of nuclear power plants and engineering thermophysics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine.

Терех Александр Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Кафедра атомных электрических станций и инженерной теплофизики, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; г. Киев, Украина; e-mail: terem57@meta.ua, ORCID 0000-0002-1320-8594.

Terekh Alexander – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Research. Department of nuclear power plants and engineering thermophysics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine.

Руденко Александр Игоревич – кандидат технических наук, доцент. Кафедра экономики и предпринимательства. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; г. Киев, Украина; e-mail: a_rudenko55@mail.ru, ORCID 0000-0002-8541-9710.

Rudenko Alexander – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), associate professor. Department of economy and enterprise. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Баранюк, А. В. Численное моделирование конвективного теплообмена и аэродинамики поверхностей с пластинчато-разрезным оребрением / **А. В. Баранюк, В. А. Рогачов, А. М. Терех, А. И. Руденко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 64–70. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.10.

Please cite this article as:

Baranyuk, A., Rogachov, V., Terekh, A. and Rudenko, A. (2017), "Numerical Simulation of the Convective Heat Exchange and Aerodynamics of the Surfaces with the Lamellar-Split Ribbing", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 9(1231), pp. 64–70, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.10.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Баранюк, О. В. Числове моделювання конвективного теплообміну і аеродинаміки поверхонь з пластинчато-розрізним оребренням / **О. В. Баранюк, В. А. Рогачов, О. М. Терех, О. І. Руденко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 64–70. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.10.

АНОТАЦІЯ Представлені результати CFD-моделювання теплообміну та аеродинамічного опору пластинчато-ребристих поверхонь з розрізними ребрами в умовах вимушеної конвекції. Отримані дані розрахунку середньої тепловіддачі та аеродинамічного опору тепловідвідної поверхні. Доведено, що розрізання торцевих частин ребер збільшує інтенсивність теплообміну в 1,16–1,25 рази при одночасному зростанні аеродинамічного опору в 1,25–1,35 рази порівняно з пластинчато-ребристою поверхнею без розрізання. Показана прийнятна збіжність результатів дослідних і числових досліджень.

Ключові слова: числове моделювання, вимушена конвекція, теплообмін, аеродинамічний опір, пластинчато-ребриста поверхня, розрізання ребра

Поступила (received) 08.02.2017