

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В МЕЖРЕБЕРНЫХ КАНАЛАХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПЛАСТИНЧАТО-РАЗРЕЗНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

### Введение

Одним из главных факторов, влияющих на надежное функционирование радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и персональных компьютеров (ПК), является обеспечение допустимых тепловых режимов работы теплонагруженных элементов электронной техники. В условиях усложнения аппаратуры, ее миниатюризации и интеграции применяемых элементов вопросы обеспечения необходимых тепловых режимов, а также методы их расчетов приобретают особую актуальность.

Тепловой режим работы изделий электронной техники определяется двумя факторами: количеством теплоты, которое выделяет теплонагруженный элемент, и условиями охлаждения. Повышенная температура эксплуатации изделий электронной техники не только ухудшает их основные параметры, но и является основной причиной отказов и выхода их из строя.

Для решения этой проблемы используются различные методы охлаждения элементов РЭА, однако самым простым, дешевым и удобным в эксплуатации является воздушное охлаждение. Следует отметить, что эффективность такого метода все же невелика по сравнению, например, с жидкостным или испарительным охлаждением [1, 2]. Для увеличения эффективности воздушного охлаждения элементов РЭА и ПК на практике широко используют развитые теплообменные поверхности. В настоящее время используются традиционные конструкции развитых поверхностей – пластинчатые, игольчато-штырьевые, петельно-проволочные и др., которые все меньше и меньше отвечают требованиям, предъявляемым к современным системам охлаждения. Следовательно, разрабатываемые новые типы оребрения должны обеспечивать эффективный отвод избыточной теплоты при минимальной массе и стоимости материала, из которого изготовлена теплообменная поверхность, а также обладать высокой технологичностью и удобством эксплуатации. Поэтому исследователи и конструкторы стремятся использовать различные методы интенсификации теплообмена в таких малогабаритных развитых поверхностях.

Одним из перспективных способов увеличения интенсивности теплообмена является создание условий для возникновения отрыва пограничного слоя на плоской поверхности ребра, уменьшения его толщины и турбулизации воздушного потока, омывающего оребренную поверхность, и дополнительного вихреобразования в пристеночном слое вследствие нанесения на исходную гладкую поверхность теплоотдачи искусственных турбулизаторов. Указанные условия возникают на ребре в результате гофрировки ребер, перфорирования [3-5], разрезки на короткие участки с отогнутыми в противоположные стороны краями [6-10] и т. п.

В литературе довольно широко освещены вопросы влияния изменения формы ребер на теплоаэродинамические характеристики теплоотдающих поверхностей. По данным работ [3-9], разрезка на короткие участки вершин кольцевых ребер трубы позволяет увеличить интенсивность теплоотдачи на 12...36 %. При этом рост аэродинамического сопротивления заметно опережает рост внешней теплоотдачи, что в целом заметно снижает теплоаэродинамическую эффективность поверхности.

Принимая во внимание вышесказанное, для увеличения интенсивности малогабаритной теплообменной поверхности с плоским основанием и установленными на нем гладкими пластинчатыми ребрами поверхность прямоугольных ребер разрезалась по высоте ребра на равные участки. Разрезка ребра приводит к образованию в его верхней части системы прямоугольных участков размером  $h_p \times b \times \delta$ , последовательно расположенных по потоку и отделенных друг от друга узким зазором шириной, равной толщине ребра  $u = \delta$ , называемых „лепестками”. Такая конструктивная форма ребра не уменьшает теплоотдающей поверхности, способствует срыву потока с кромок каждого „лепестка” и не дает возможности нарастать пограничному слою по всей длине ребра. Наличие прерываний пограничного слоя, срывов и присоединений потока турбулизует его, что, в конечном счете, приводит к интенсификации

теплообмена. Работы, посвященные экспериментальному исследованию теплоаэродинамических характеристик поверхностей с пластинчато-разрезным оребрением [11-14], позволили раскрыть механизм интенсификации теплообмена и показали, что разрезка ребер является эффективным методом, интенсифицирующим процесс теплообмена.

С целью более детального изучения механизма интенсификации теплообмена в межреберных каналах поверхностей с пластинчато-разрезным оребрением необходимо составить численную модель процесса. Эта модель позволит получить данные, которые весьма сложно получить в эксперименте, например, локальные коэффициенты теплоотдачи, градиенты температур, картину течения в пристеночном слое, в прямоугольных кавернах, образованных разрезкой, в углах между ребром и основанием. Кроме того, численное моделирование дает возможность, не проводя дорогостоящих экспериментов, изучить влияние таких геометрических параметров разрезки, как шаг и ширина „лепестков”, толщина ребра.

### 1 Постановка задачи

При исследованиях ставилась задача рассчитать теплообмен при трехмерном движении вязкой среды, продольно омывающей разрезные ребра исследуемой поверхности.

Исследуемая поверхность состояла из плоского медного основания размерами  $L \times L = 70 \times 70$  мм<sup>2</sup> толщиной  $\delta_0 = 3$  мм, к которому припаяны пластинчатые ребра высотой  $h = 35$  мм, толщиной  $\delta = 1.4$  мм, расположенные с шагом  $t = 6.9$  мм. Исследовались три относительные глубины разрезки –  $h_p/h = 0.4, 0.6, 0.8$ . Подробное описание теплоотводящих поверхностей и условий, в которых проводили исследования, содержится в [11].

На рис. 1 представлена исследуемая теплообменная поверхность, размещенная в плоскопараллельном полуоткрытом канале аэродинамической трубы. Тонкими осевыми линиями выделен исследуемый элемент поверхности, стрелками показано направление воздушного потока и подводимый тепловой поток.

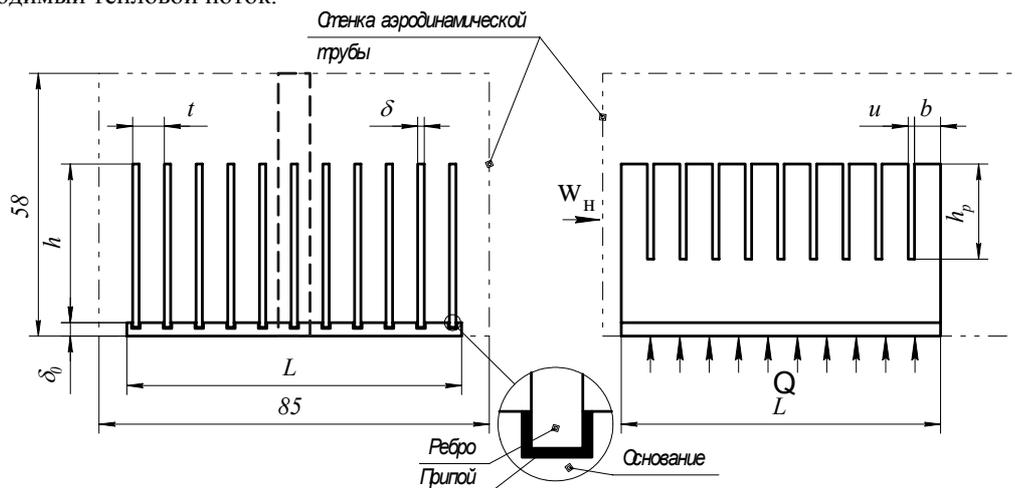


Рис. 1. Исследуемая поверхность

Элемент выбирался таким образом, чтобы смоделировать гидродинамическую картину течения жидкости в полуоткрытых каналах прямоугольной формы, образованных ребрами и основанием теплообменной поверхности и стенкой аэродинамической трубы. С этой целью было выбрано среднее по ширине радиатора ребро, по форме и конфигурации соответствующее натурному, расположенное на плоском основании шириной, равной шагу ребер. 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 плоский канал, учитывалось симметричными граничными условиями [15].

### 2 Расчетная модель

В данной работе разработка расчетной модели течения основывалась на построении геометрической модели расчетной области, дискретизации расчетной области в соответствии с представлениями о влиянии характеристики сети конечных элементов на устойчивость и

сходимость решения, задании граничных условий. Расчетная область покрывалась неравномерной, со сгущением к стенкам основания и ребер нагревательного элемента 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, использовалась неравномерная декартовая сетка, которая в продольном направлении сгущалась к стенкам каверны, а в поперечном разбивалась на равномерные интервалы с шагом  $1 \cdot 10^{-4}$  м. Трехмерная расчетная сетка для разрезного ребра с  $h_p/h=0.6$  представлена рис. 2.

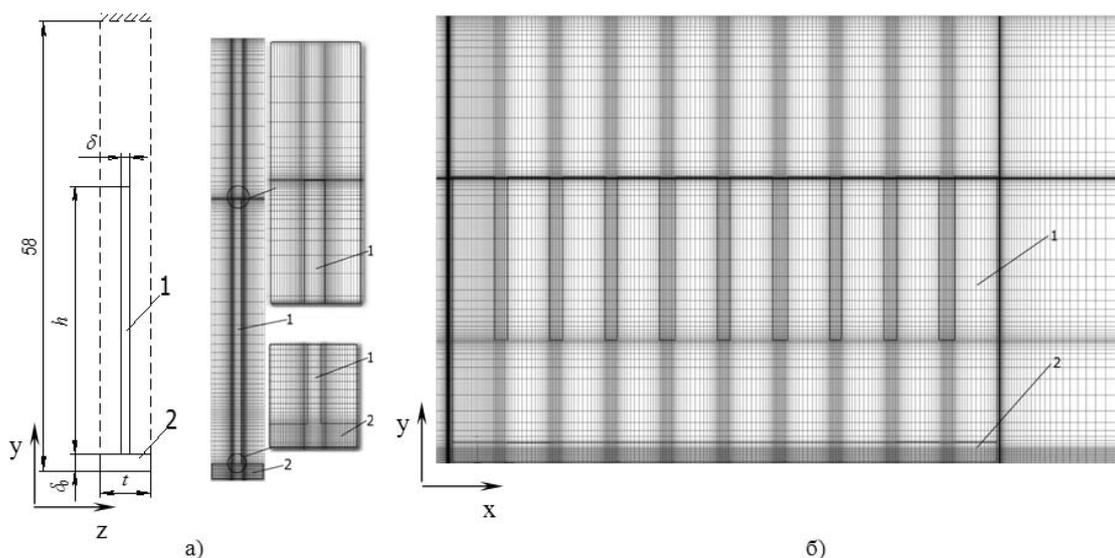


Рис. 2. Область решения задачи и расчетная сетка: (а) – вид спереди, (б) – вид сбоку (1 – разрезное ребро при  $h_p/h=0.6$ ; 2 – основание)

Выбранный алгоритм решения основывается на неявном конечно-объемном методе решения уравнений Навье-Стокса, замкнутых с помощью модели турбулентности Ментера [16]. По данным исследователей [16, 17] именно эта модель является наиболее приемлемой для расчета отрывных течений. Инициализация решения проведена в абсолютной системе координат по условиям на входе в канал.

Теплофизические свойства воздуха задавались в виде полиномиальных функций температуры. Модель учитывала наличие прослойки оловянно-свинцового припоя ПОССу 5-1, посредством которого ребро было припаяно к основанию. Теплофизические свойства твердых тел задавались постоянными. Стенки, ограждающие канал сверху и снизу, считались адиабатическими. За определяющий размер принимался эквивалентный диаметр  $d_s$  теплообменной поверхности.

Гидродинамические граничные условия формировались следующим образом:

- на входе в канал задавалась температура  $t_{ex}$ , полное давление воздушного потока  $p_0$ , которое рассчитывалось по зависимости:

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

где  $p_s$  – статическое давление, а  $w_n$  – скорость набегающего воздушного потока;

- интенсивность продольных пульсаций скорости  $\sqrt{w'^2}/w=4\%$ , характерная для аэродинамической трубы, на которой проведены исследования теплообмена и аэродинамики теплообменных поверхностей;

- на выходе из канала – так называемые „мягкие” граничные условия (условия продолжения решения) [16].

В качестве тепловых граничных условий задавалась плотность теплового потока, подводимая к основанию модели:

$$q = \frac{Q - Q_n}{z \cdot t \cdot L}, \quad (2)$$

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

Численные расчеты температурного поля ребра и основания поверхностей проводились для 3-х – 5-ти режимов, отличающихся между собой плотностью теплового потока, подводимого к основанию модели, и скоростью набегающего потока.

С целью верификации полученных с помощью численного моделирования и экспериментальных данных на рис. 3 дана схема расположения термодпар на поверхности исследуемого среднего ребра, используемая в [12-14]. Цифрами 1...9 обозначены номера термодпар, а обозначения  $F_1...F_9$  соответствуют площади поверхности в окрестности термодпары.

Полученные расчетные данные позволяют рассчитать среднеповерхностную температуру  $\bar{t}$  теплоотдающей поверхности по соотношению:

$$\bar{t}_{cn} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i F_i}{\sum_{i=1}^n F_i}, \quad (3)$$

где  $t_i$  – температура в заданной точке поверхности;  
 $F_i$  – площадь участка, на котором установлена термодпара.

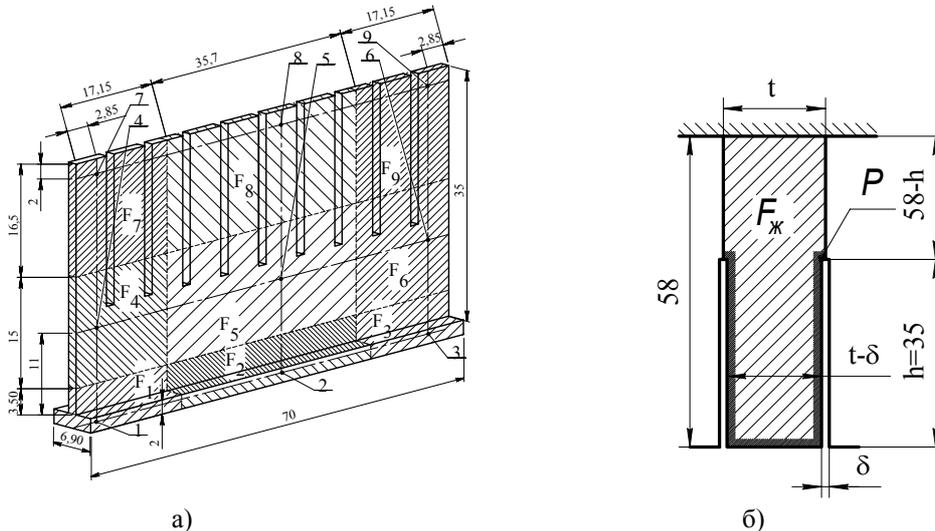


Рис. 3. Схема размещения термодпар на ребре (а) и схема расчета эквивалентного диаметра оребренной поверхности(б)

Средний коэффициент конвективной теплоотдачи поверхности рассчитывался по формуле:

$$\alpha_k = \frac{Q}{\Delta t_n \cdot F_n}, \quad (4)$$

где  $F_n$  – полная площадь теплоотдающей поверхности,  
 $\Delta t = \bar{t}_{cn} - t_{нс}$  – среднеповерхностный температурный напор;  
 $t_{нс}$  – средняя температура омывающего поверхность потока воздуха, которая определялась балансовым методом по уравнению:

$$t_{нс} = t_в + \frac{Q}{2G \cdot C_p}, \quad (5)$$

где  $t_в$  – температура воздуха на входе;  
 $Q$  – количество подводимой к поверхности теплоты;  
 $G$  – расход воздуха в рабочем участке;  $C_p$  – теплоемкость воздуха.

Помимо конвективного коэффициента теплоотдачи, определялся также приведенный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{np} = \frac{Q}{(t_{осн} - t_{нс}) \cdot F_n}, \quad (6)$$

где  $t_{осн}$  – температура основания указанной поверхности.

Для сравнительного анализа теплообмена исследуемых поверхностей использовались зависимости безразмерных конвективных и приведенных чисел Нуссельта  $Nu_k$ ,  $Nu_{np}$ , рассчитанных соответственно по конвективным и приведенным коэффициентам теплоотдачи, от чисел Рейнольдса  $Re$ :

$$Nu_k = \frac{\alpha_k d_э}{\lambda}, \quad Nu_{np} = \frac{\alpha_{np} d_э}{\lambda}, \quad Re_n = \frac{w_n d_э}{\nu}. \quad (7)$$

В качестве определяющего размера в (7) применялся эквивалентный диаметр  $d_э$  (рис. 3б), а в качестве определяющей скорости  $w_n$  – скорость набегающего потока в сечении перед моделью.

### 3 Результаты исследований и их анализ

На рис. 4 представлено сравнение результатов экспериментальных и численных расчетных данных, а также графики зависимостей среднеповерхностных температур основания и ребра для различных режимов. Лучшую поверхность по тепловым качествам можно выбрать по результатам анализа имеющихся кривых. Если при всех прочих одинаковых условиях температуры ребра и основания поверхности будут ниже, коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_k$  и  $\alpha_{np}$  выше, следовательно, поверхность эффективнее.

Анализ данных рис. 4 свидетельствует о том, что температуры ребра и основания поверхности снижаются с увеличением относительной глубины разрезки  $h_p/h$ . Минимальная среднеповерхностная температура наблюдается при  $h_p/h=0.6$  ( $\Delta t_{осн} \sim 36...51^\circ\text{C}$ , а  $\Delta t_{сн} \sim 31...45^\circ\text{C}$ ). Отклонения опытных и расчетных значений температур находятся в пределах 2...7 % для всех исследуемых случаев.

Распределение температуры на поверхности неразрезного ребра носит следующий характер:

- поле температур по толщине основания поверхности вследствие высокой теплопроводности меди остается практически неизменной;
- в области контакта основания и ребра изотермы имеют характерный излом вследствие наличия между медным основанием и ребром прослойки тугоплавкого оловянно-свинцово-сурьмяного припоя с относительно низкой теплопроводностью;
- на сплошной части неразрезного ребра наблюдается практически равномерное распределение температуры (вследствие перетоков теплоты от более нагретого торца ребра к более холодному). Однако по мере удаления от основания ребра температура монотонно уменьшается как по длине, так и по высоте ребра. Темп уменьшения температуры зависит от режима омывания поверхности ребра, а также от количества теплоты, подведенной к основанию ребра.

По сравнению с неразрезным ребром температурное поле разрезного ребра имеет ряд особенностей. Поэтому необходимо выделить и отдельно рассматривать основание теплообменной поверхности и прилегающий к ней неразрезной участок ребра, а также участок из прямоугольных, расположенных вдоль по потоку прямоугольных частей – „лепестков”.

Характер распределения температур по толщине основания на неразрезной части ребра качественно сохранился таким же, как и для элемента со сплошным оребрением.

Анализ температурных полей на разрезных частях ребер (рис. 4) показывает, что:

- благодаря разрезке поверхности ребра возникают условия, которые препятствуют перетокам теплоты от более нагретого торца ребра к менее нагретому;
- температурное поле каждого „лепестка” однородно, причем изменение температуры происходит только по высоте, о чем свидетельствует расположение изотерм в теле „лепестка”. Таким образом, каждый „лепесток” работает как отдельная продольно омываемая пластина;
- для всех исследованных теплообменных поверхностей первый „лепесток” охлаждается более интенсивно, о чем свидетельствуют меньшие температуры его поверхности;
- температура „лепестков” и неразрезного участка в глубине межреберного канала выше, так как поток, омывающий „лепестки”, прогревается по мере перемещения вглубь межреберного канала.

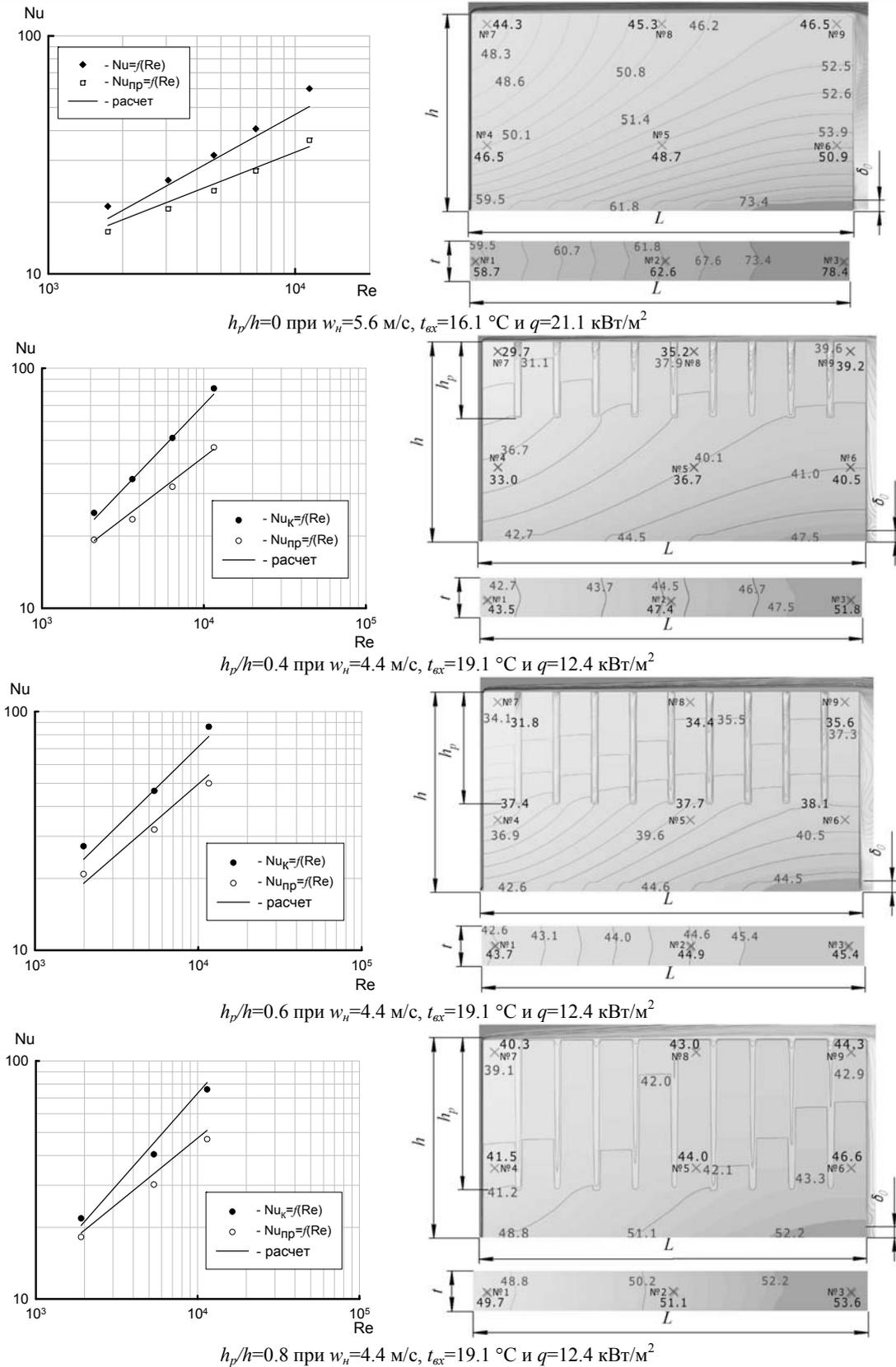


Рис. 4. Сравнение теплообмена и распределения температур на поверхностях ребра и основания

Увеличение относительной глубины разрезки до  $h_p/h=0.6$  позволяет уменьшить температуру ребра, а значит отвести большее количество теплоты. Однако дальнейшее ее увеличение приводит к ухудшению теплообмена, о чем свидетельствует перегрев ребра и основания (рис. 4). Данные рис. 4 также свидетельствуют, что расхождения между опытными и расчетными конвективными и приведенными значениями чисел  $Nu$  находятся в пределах 2...18 %. На основании вышесказанного можно утверждать, что численный расчет подтверждает наличие максимума интенсивности теплообмена при разрезке концевых частей ребер на относительную глубину  $h_p/h=0.6$ , полученного в [11-13].

### Выводы

Проведенный численный расчет тепловых характеристик теплообменных поверхностей с пластинчато-разрезным оребрением показал, что:

- зависимость распределения среднесредностной температуры ребра и основания носит экстремальный характер с минимумом, который соответствует относительной глубине разрезки  $h_p/h=0.6$  ( $\Delta t_{очн} \sim 36...51$  °С, а  $\Delta t_{ст} \sim 31...45$  °С);
- анализ распределения температур на поверхности пластинчатого и пластинчато-разрезного ребра свидетельствует, что пайка ребер к основанию уменьшает эффективность оребренной поверхности в целом, поэтому, если изготавливать такие поверхности, например, с помощью экструзии, то можно существенно повысить эффективность ребра;
- при продольном обтекании основания и ребер пластинчато-ребристой поверхности разрезка ребра на „лепестки” при относительной глубине разрезки  $h_p/h=0.4; 0.6; 0.8$  способствует интенсификации теплообмена в 1.16...1.25 раза по сравнению с поверхностью без разрезки;
- сравнительный анализ свидетельствует, что отклонения опытных и расчетных значений температур и средних характеристик теплообмена находятся в пределах 20 % всех исследуемых случаев;
- с увеличением относительной глубины разрезки до  $h_p/h=0.6$  температуры ребра и основания уменьшаются, что способствует увеличению теплоотдачи;
- разрезка ребер на „лепестки” препятствует перетоку теплоты от более нагретого торца ребра к более холодному и приводит к уменьшению температуры ребра и основания в целом;
- уменьшение интенсивности теплообмена при  $h_p/h=0.8$  связано с тем, что глубокая разрезка ребра на прямоугольные „лепестки” мешает более свободной растечке теплоты от основания к ребру и приводит к перестройке течения, вызванной ослаблением вихревых структур вблизи основания канала.

### Литература

1. Чернышев А.А. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники. – М. Энергия, 1989 – 216 с.
2. Пархоменко Г.А. Водные процедуры. Достоинство и недостатки водяных систем охлаждения // Мой компьютер. – 2004. – №9. – С.17-19.
3. Мигай В.К., Быстров П.Г., Федотов В.В. Теплообмен в поперечно-обтекаемых пучках труб с оребрением лепесткового типа // Тяжелое машиностроение. - 1992, № 7.- С.8-10.
4. Диев М.Д., Колесникова А.А. Численное моделирование интенсификации турбулентного теплообмена в прямоугольном канале с применением CFD пакета Fluent // Проблемы 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.Издательский дом МЭИ, 2007. 576 с.
5. Eckels P. W., Rabas T. J. Heat Transfer and Pressure Drop Performance of Finned Tube Bundles // Journ. of Heat Transfer. - 1985. - Vo1. 107. - P.205-213.
6. Таранян И.Г., Иохведов Ф.М., Кунтыш В. Б. Исследование влияния параметров оребрения на теплоотдачу и сопротивление шахматных пучков труб с поперечными гладкими и интегральными ребрами // Теплофизика высоких температур. - 1972. - Т. 10, №5. - С. 1049-1054.
7. Кунтыш В.Б., Иохведов Ф.М. Теплопередача и аэродинамическое сопротивление пучков труб и поперечными разрезными ребрами // Холодильная техника. – 1968, № 6. - С. 14-18.
8. Иохведов Ф.М., Таранян И.И., Кунтыш В. Б. Теплоотдача и аэродинамическое сопротивление шахматных пучков труб с различной формой поперечного разрезного ребра // Энергомашиностроение. 1975. № 11.- С.23-26.

9. Sparrow E. M., Myrum T.A. Crossflow Heat Transfer for Tubes with Periodically Interrupted Annular Fins // Int. Jour. of Heat and Mass Transfer. - 1985. - Vol.28, №2. - P.509-512.
10. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения под общей редакцией Кунтыша Б.В., Бессонного А.Н. – Санкт-Петербург: Недра, 1996. – 508 с.
11. Письменный Е.Н., Рогачев В.А., Терех А.М., и др. Теплообмен плоских поверхностей с сетчато-проволочным оребрением при вынужденной конвекции // Промышленная теплотехника. – 2002. – Т.24, №4. – С.71-78.
12. 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.–Т. 25.–№1. – С. 10 – 16.
13. Письменный Е.Н., Бурлей В.Д., Терех А.М., и др. Теплообмен плоских пластинчатых поверхностей с разрезным оребрением при вынужденной конвекции //Промышленная теплотехника. – 2005. – Т.27, №4.– С.11-16.
14. Письменный Е.Н., Рогачев В.А., Терех А.М., и др. Тепло-аэродинамическая эффективность новых теплоотводящих поверхностей с пластинчато-разрезным оребрением // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2007. – №1. – С.16-21.
15. Zhigang Li, Xiulan Huai, Yujia Tao, Huanzhuo Chen. Effect of thermal property variations on the liquid flow and heat transfer in microchanel heat sinks // Applied Thermal Engineering. – 2007. V.27. – P.2803-2814.
16. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. – Санкт-Петербург: Судостроение, 2005. – 389 с.
17. Богатко Т.В., Терехов В.И. Численное исследование интенсификации теплообмена при турбулентном обтекании одиночных диафрагм различной формы в трубе // Проблемы 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.Издательский дом МЭИ, 2007. – 576 с.