

УДК 536.24

ПИСЬМЕННЫЙ Е.Н., ЭПИК Э.Я.,
 БАРАНЮК А.В., ТЕРЕХ А.М., БУРЛЕЙ В.Д.

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”

СТРУКТУРА ПОТОКА В ПОЛУОТКРЫТЫХ ПЛОСКИХ КАНАЛАХ С РАЗРЕЗНЫМИ СТЕНКАМИ ЭЛЕМЕНТОВ ОХЛАЖДЕНИЯ РЭА

Представлено результати експериментального дослідження структури потоку (розподілів осереднених в часі швидкостей та їх пульсацій) у напіввідкритих плоских каналах із розрізними ребрами, які характерні для елементів охолодження ПК. Виявлено суттєвий вплив відносної глибини розрізки ребра (h_p/h) на структуру течії в міжреберному каналі. Установлено пряму кореляцію між рівнем сумарного збурення потоку та інтенсивністю теплообміну, на основі якої обґрунтовано наявність максимуму середнього теплообміну при $h_p/h=0,6$.

Представлены результаты экспериментального исследования структуры потока (распределений осредненных во времени скоростей и их пульсаций) в полуоткрытых плоских каналах с разрезными ребрами, характерных для элементов охлаждения ПК. Обнаружено существенное влияние относительной глубины разрезки ребра (h_p/h) на структуру потока в межреберном канале. Установлена прямая корреляция между уровнем суммарной возмущенности потока и интенсивностью теплообмена, на основе которой обосновано наличие максимума среднего теплообмена при $h_p/h=0,6$.

We present the results of experimental investigation of the flow structure (distributions of time-averaged in velocities and their fluctuations) in half-open flat channels with cut fins typical for the cooling elements of PC. A substantial influence of relative cutting depth of the fin (h_p/h) on the flow structure in inter-fin channels is discovered. Direct correlation between the level of flow total disturbances and heat transfer intensity is established, on the basis of which the presence of a maximum of mean heat transfer is grounded at $h_p/h=0.6$.

h – высота ребра;

L – линейный размер основания;

t – шаг между ребрами;

x, z – текущие координаты по длине и высоте ребра;

w – средняя во времени скорость воздушного потока;

w' – среднеквадратичная пульсация скорости потока;
 δ – толщина ребра.

Индексы:

k – критический;

n – набегающий;

p – разрезка.

Введение

В настоящее время особую актуальность приобретают работы, направленные на обеспечение оптимальных режимов охлаждения теплонагруженных элементов радиоэлектронных устройств и разработку новых видов эффективных теплоотводящих поверхностей. В этой связи в НТУУ „КПИ” были выполнены исследования, в которых изучалась возможность интенсификации теплообмена в радиаторах с прямыми пластинчатыми ребрами путем воздействия на структуру межреберного потока за счет разрезки ребер на “лепестки”.

При использовании для охлаждения элементов ПК пластинчато-ребристых поверхностей процессы переноса теплоты и импульса происходят в полуоткрытых каналах с плоскими продольно обтекаемыми стенками. К поверхности охлаждаемого элемента примыкает основание канала, а частичной разрезке на “лепестки” подвергаются его боковые стенки (ребра).

Как показано в [1], в условиях вынужденной конвекции при продольном обтекании основания и ребер разрезка поверхности 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 традиционной базовой пластинчато-ребристой поверхностью (без разрезки). Максимальная интенсивность теплообмена имеет место при глубине разрезки $h_p/h = 0,6$, при этом аэродинамическое сопротивление увеличивается всего на 10...35%.

Интенсификация теплообмена в [1] объясняется тем, что разрезка ребра приводит к срыву потока с кромок каждого “лепестка”, турбулизует поток и не дает возможности нарастать пограничному слою по всей длине ребра. Таким образом, интенсификация теплообмена связана фактически с двумя факторами: дополнительной турбулизацией за счет срыва потока с кромок “лепестка” и нарушением процесса развития пограничного слоя по длине ребра.

Можно предположить, что появление максимума теплоотдачи связано с перестройкой течения в межреберных каналах при увеличении относительной глубины разрезки $h_p/h > 0,6$. Вполне очевидно, что структура течения, а следовательно, и интенсивность процессов переноса в межреберных каналах будут в значительной степени зависеть не только от глубины разрезки, но и от других геометрических параметров разрезки (ширины, шага, формы “лепестков” и т.п.).

Для целенаправленного управления интенсификацией теплообмена пластинчато-ребристых поверхностей и рационального выбора геометрических параметров разрезки необходимо располагать экспериментальными данными об особенностях структуры потока в полуоткрытых межреберных каналах с разрезкой. В настоящее время банк таких данных отсутствует, а имеющаяся информация носит ограниченный и разрозненный характер. Поэтому в НТУУ “КПИ” были начаты экспериментальные исследования структуры потока в полуоткрытых межреберных каналах с разрезкой. Ниже излагаются результаты одного из этапов исследований, посвященного измерению турбулентных характеристик потока (осредненных во времени скоростей и среднеквадратичных пульсаций скорости). Геометрические параметры модели выбраны в полном соответствии с параметрами модели, подвергнутой в [1] тепловым испытаниям.

Краткое описание установки и методики измерений

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе открытого типа НТУУ “КПИ” [2] с рабочим участком прямоугольного поперечного сечения 71×85 мм² длиной 960 мм. На входе в рабочий участок устанавливался конфузор со степенью поджатия 4,9, спроектированный по лемнискате. Установка конфузора обеспечивала равномерное распределение скорости набегающего потока w_∞ по всему сечению рабочего участка перед устанавливаемыми в нем моделями.

Модели теплообменных поверхностей состояли из 4-х ребер толщиной $\delta = 2$ мм, высотой $h = 70$ мм и длиной $L = 140$ мм, расположенных с шагом $t = 14$ мм на плоском основании толщиной $\delta_0 = 5$ мм. Основание модели устанавливалось вертикально в выемке стенки рабочего участка и выступало на 2 мм над поверхностью стенки. Ребра модели располагались горизонтально, так что зазор между торцами ребер и стенкой рабочего участка составлял 10 мм. Модели отличались друг от друга только относительной глубиной разрезки ребер ($h_p/h = 0; 0,4; 0,6; 0,8$). Конструкция модели представлена на рисунке 1.

Для измерения турбулентных характеристик потока (осредненных во времени скоростей w и среднеквадратичных пульсаций скорости w') использовалась прецизионная термоанемометрическая система ДИСА 55М с одноточечным датчиком типа 55P11 ДИСА, вольфрамовая нить которого имеет диаметр 5 мкм при длине 1,2 мм. Датчик устанавливался в стандартную державку типа Н21 ДИСА. Методика измерений, разработанная в ИТТФ НАН Украины, подробно описана в [3].

Как видно из рис. 1, для уменьшения аэродинамического воздействия на течение в полуоткрытом межреберном канале державка датчика обтекалась продольно. При этом нить датчика располагалась перпендикулярно набегающему потоку и параллельно разрезке ребра (т.е. перпендикулярно потоку, перетекающему из одного межреберного канала в другой в месте разрезки). Таким образом, нить реагировала на суммарную возмущенность, создаваемую при течении в канале и в месте разрезки.

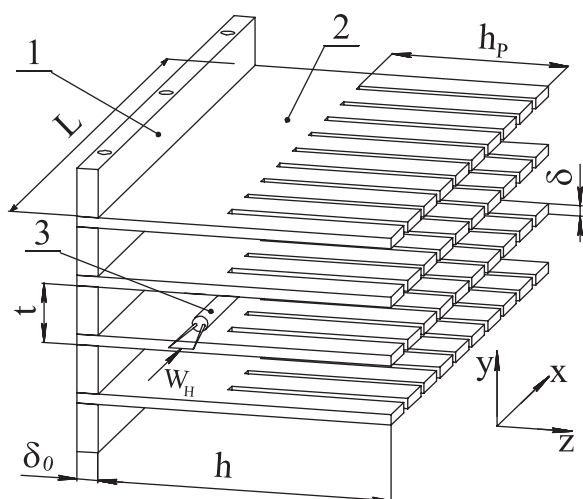


Рис. 1. Схема установки модели и датчика термоанемометра: 1 – основание модели; 2 – разрезное ребро; 3 – державка с датчиком термоанемометра.

Основные измерения структуры потока проводились в межреберном полуоткрытом канале в центральной плоскости при $z/(t-\delta) = 0,5$, поскольку размеры державки с наружным диаметром 4 мм не позволяли приблизиться к стенкам ближе, чем на 2 мм. По этой же причине (из-за невозможности установки державки в межреберном канале натуральных теплообменных поверхностей) при проведении измерений скоростей и их пульсаций использовались модели в масштабе 2:1.

Результаты измерений представлены в виде следующих распределений:

- относительных скоростей по высоте канала $w/w_n = f(z/h)$ в фиксированных сечениях $x/L = \text{const}$;

- относительных осредненных (по высоте ребра) скоростей по длине ребра $\bar{w}/w_n = f(x/L)$;

- пульсаций скорости по высоте ребра $w'/w = f(z/h)$ в фиксированных сечениях $x/L = \text{const}$;

- осредненных (по высоте ребра) пульсаций скорости по длине ребра $\bar{w}'/w = f(x/L)$.

Осреднение по высоте ребра проводилось следующим образом:

$$\bar{w}/w_n = \frac{\sum w/w_n}{n}; \quad (1)$$

$$\bar{w}'/w = \frac{\sum w'/w}{n}, \quad (2)$$

где w и w' – соответственно осредненная во времени скорость и среднеквадратичная пульсация скорости, n – количество измерений по высоте ребра.

На основании распределений $\bar{w}'/w = f(x/L)$ была оценена суммарная возмущенность потока, характерная для данного типа оребрения, которую можно рассматривать как некий аналог степени турбулентности:

$$Tu = \frac{\sum \bar{w}'/w}{m}, \quad (3)$$

где m – количество измерений по длине ребра.

Распределение осредненных скоростей потока

Как указывалось выше, измерение турбулентных характеристик проводилось в центральной плоскости межреберного канала в разных сечениях по высоте и длине ребра при двух режимах по скорости набегающего потока: 1-й режим – $w_n \sim 10$ м/с, 2-й режим – $w_n \sim 5$ м/с. Ниже проведен детальный анализ результатов экспериментов для 1-ого режима при $w_n \sim 10$ м/с.

Распределение относительной осредненной во времени скорости по высоте межреберного канала представлено на рисунках 2 и 3.

Для канала с неразрезными ребрами ($h_p/h = 0$) анализ данных рис. 2 свидетельствует о том, что

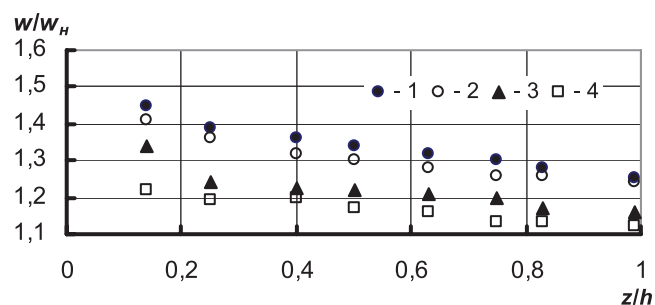


Рис. 2. Распределение относительной скорости по высоте ребра на входе в межреберный канал ($x/L=0,007$) при различной глубине разрезки ребер: 1 – $h_p/h=0$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8.

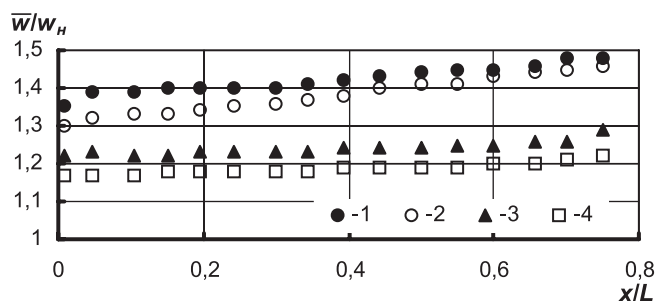


Рис. 3. Распределение относительной скорости по высоте ребра на выходе из межреберного канала ($x/L=0,75$) при различной глубине разреза ребер: 1 – $h_p/h=0$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8.

вблизи входа в канал при $x/L=0,007$ профиль скорости является неравномерным: у основания ребра при $z/h=0,14$ скорость потока на $\sim 23\%$ выше, чем у открытого торца при $z/h=0,83$. Это связано с наличием уступа на входе в канал, образованного выступающим над стенкой основанием, а также вихреобразованием в углах канала. Оба фактора приводят к уменьшению проходного сечения вблизи основания и соответственно ускоренности потока.

По мере продвижения потока вдоль основания ребер к выходу из межреберного канала происходит постепенное выравнивание профиля скорости, так что в сечениях $x/L > 0,3$ неравномерность профиля не превышает $\pm 4...5\%$ (рис. 3).

Формирование профиля скорости в каналах, образуемых ребрами, разрезанными не по всей высоте, происходит в условиях роста пограничного слоя по всей длине неразрезной части ребра. Наличие разрезки вызывает деформацию пограничного слоя в месте разрезки с последующим восстановлением процесса его формирования на поверхности ребра за разрезкой. Можно предположить, что поток “проскакивает” над разрезкой без увеличения толщины пограничного слоя, а затем пограничный слой снова начинает развиваться по длине “лепестка” до места следующей разрезки. Поэтому в целом по длине всего разрезного ребра имеет место утоньшение пограничного слоя по сравнению со случаем течения вдоль ребер без разрезки.

Действительно, как видно из рис. 2, вблизи входа ($x/L = 0,007$) при $h_p/h = 0,4; 0,6; 0,8$ отношение w/w_n по высоте разрезного ребра изменя-

ется в пределах: 1,4...1,25; 1,32...1,18; 1,22...1,15 соответственно, т.е. осредненная во времени скорость падает с увеличением глубины разрезки, что является косвенным подтверждением нарушения плавности роста пограничного слоя (фактически, его утоньшения).

По мере удаления от входной кромки ребер (рис. 3) распределения скоростей по высоте ребра постепенно выравниваются и вблизи выхода из канала при $x/L = 0,75$ становятся практически равномерными, как и в случае неразрезного ребра. При этом в выходном сечении в зависимости от глубины разрезки ребра сохраняется описанный выше характер изменения осредненной во времени относительной скорости: значения w/w_n уменьшаются с увеличением глубины разрезки ($w/w_n \sim 1,46; 1,3; 1,2 \sim \text{const}$ при $h_p/h = 0,4; 0,6; 0,8$ соответственно).

Во всех исследованных случаях при фиксированной высоте ребра и $x/L > 0,3$ имеет место увеличение осредненной по высоте ребра относительной скорости вдоль оси канала, свидетельствующее о тенденции к смыканию пограничных слоев, развивающихся на поверхностях ребер (рис. 4). Вполне очевидно, что из-за задержки роста пограничного слоя, вызванной разрезкой ребра, с увеличением глубины разрезки темп увеличения скорости будет уменьшаться.

На основе данных, приведенных на рис. 4, оценены градиенты осредненной по высоте ребра скорости по длине ребра при $x/L > 0,3$. Для обоих исследуемых режимов течения при $h_p/h = 0; 0,4; 0,6; 0,8$ градиенты скорости составляют: $d\bar{w}/dx = 12,7; 11,1; 9,5; 6,4 \text{ с}^{-1}$ соответственно, т.е. убывают с увеличением глубины разрезки.

Распределение пульсаций скорости потока

Анализ представленных на рисунках 5 и 6 экспериментальных данных для 1-ого режима при $w_n \approx 10 \text{ м/с}$ свидетельствует о том, что в различных сечениях по длине ребра в центральной плоскости межреберного канала имеет место формирование профиля пульсаций скорости с четко обозначенными экстремумами в зависимости от глубины разрезки. Так, в трех случаях при

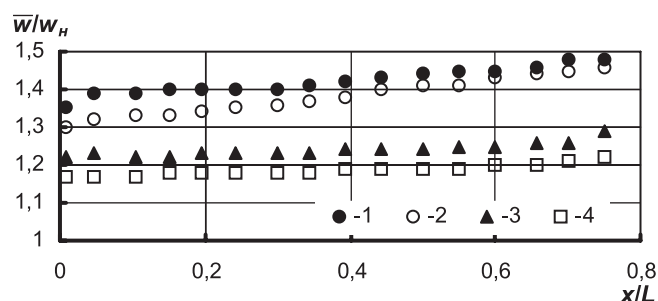


Рис. 4. Изменение осредненной по высоте ребра относительной скорости по длине ребра $\bar{w}/w_H = f(x/L)$ при различной глубине разрезки ребер: 1 – $h_p/h=0$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8.

$h_p/h = 0; 0,4; 0,6$ возникают как максимумы, так и минимумы пульсаций, тогда как при $h_p/h = 0,8$ наблюдается только максимум пульсаций.

Местоположение максимумов в указанных трех случаях зависит от глубины разрезки и соответствует: $z_{\max}/h = 0,63; 0,6...0,65; 0,7$ при $h_p/h = 0; 0,4; 0,6$. С увеличением глубины разрезки от 0 до $h_p/h = 0,6$ максимумы пульсаций смещаются к верхнему торцу ребра, тогда как местоположение минимумов пульсаций сохраняется постоянным ($z_{\min}/h = 0,25$).

Для $h_p/h = 0...0,6$ на всей длине ребра при $h_p/h < 0,3$ по мере приближения к основанию наблюдается рост пульсаций скорости, что, по нашему мнению, вызвано влиянием, вихревых структур, развивающихся в углах между основанием и ребрами. Значения интенсивности пульсаций при $h_p/h = 0,014$, т.е. вблизи основания, составляют в указанном диапазоне глубин разрезки $w'_{\min}/w \sim 3...3,5\%$.

При $h_p/h = 0,8$ максимум пульсаций смещается ближе к основанию и располагается при $z_{\max}/h \sim 0,4$, тогда как минимум пульсаций при $z_{\min}/h = 0,3$ отсутствует (рис. 5 и 6). Это связано, по нашему мнению, с ослаблением вихревых структур вблизи основания в виду их частичного разрушения из-за перетоков между смежными каналами через разрезку. Об этом свидетельствует уменьшение (по сравнению с остальными исследованными случаями) значений интенсивности пульсаций до $w'/w \sim 2\%$ при $z/h = 0,014$. Таким образом, при $h_p/h = 0,8$ пульсационная структура течения существенно изменяется.

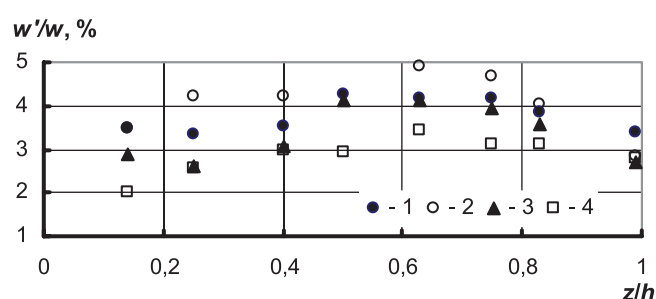


Рис. 5. Распределение интенсивности пульсаций скорости по высоте ребра на входе в межреберный канал ($x/L = 0,007$) при различной глубине разрезки ребер: 1 – $h_p/h=0$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8.

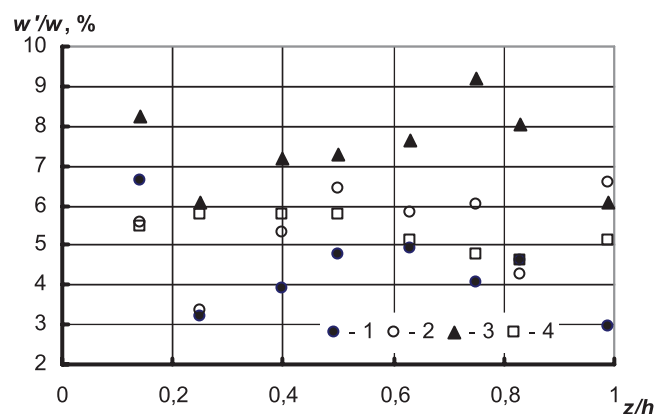


Рис. 6. Распределение интенсивности пульсаций скорости по высоте ребра на выходе из межреберного канала ($x/L=0,75$) при различной глубине разрезки ребер: 1 – $h_p/h=0$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8.

Характерной особенностью описанных распределений является рост интенсивности пульсаций во всех сечениях по длине ребра с увеличением относительной глубины разрезки до $h_p/h = 0,6$ и последующее ослабление при $h_p/h = 0,8$. Так, при $x/L = 0,3...0,75$ максимумы интенсивности пульсаций для $h_p/h = 0; 0,4; 0,6$ составляют $w'_{\max}/w = 4...4,5\%$; $5...6\%$; $7...9\%$ соответственно, а для $h_p/h = 0,8$ – $w'_{\max}/w = 5...6\%$.

Изменение по длине межреберного канала интенсивности осредненных по высоте ребра пульсаций скорости $w'/w = f(x/L)$ представлено на рис. 7.

Анализ данных рис. 7 свидетельствует о том, что во всех исследованных случаях при $x/L \leq 0,2$

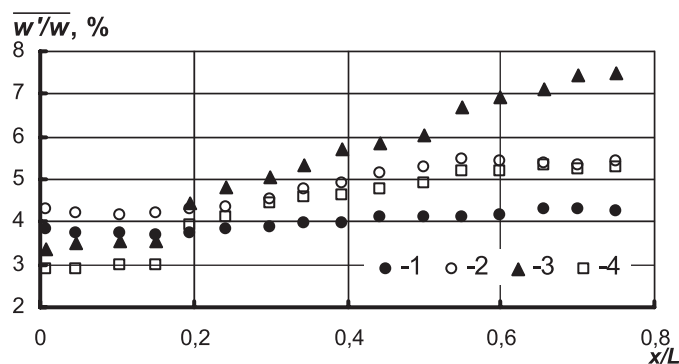


Рис. 7. Изменение интенсивности осредненных по высоте ребра пульсаций скорости по длине межреберного канала $\overline{w'/w} = f(x/L)$ при различной глубине разреза ребер: 1 – $h_p/h = 0$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8.

интенсивность осредненных по высоте пульсаций скорости изменяется в пределах 3,8...4,2%, т.е. является практически постоянной. При $x/L > 0,2$ имеет место тенденция роста интенсивности осредненных пульсаций с максимальным темпом при $h_p/h = 0,6$. Так, при $x/L = 0,75$ для ребер с относительной глубиной разреза $h_p/h = 0$; 0,4 и 0,8 интенсивность пульсаций составляет $\overline{w'/w} = 4,2\%$; 5,5% и 5,3% соответственно, тогда как при $h_p/h = 0,6$ интенсивность пульсаций достигает $\overline{w'/w} = 7,3\%$.

Для суммарной оценки турбулизирующего эффекта, вызванного генерацией пульсаций скорости в межреберном полуоткрытом канале, как указывалось выше, был выбран аналог степени турбулентности Tu . Этот аналог фактически отражает интегральную возмущенность потока при различной глубине разреза, поскольку получен на основе процедуры осреднения среднеквадратичных пульсаций скорости по высоте и длине межреберного канала в центральной плоскости.

Изменение суммарной возмущенности в зависимости от глубины разреза ребер $Tu = f(h_p/h)$ представлено на рис. 8.

Анализ данных рис. 8 свидетельствует о том, что зависимость $Tu = f(h_p/h)$ носит немонотонный характер с явно выраженным максимумом при $h_p/h = 0,6$. При указанном значении глубины разреза имеет место также максимальная интенсивность среднего теплообмена [1]. Таким образом, наблюдается прямая корреляция между

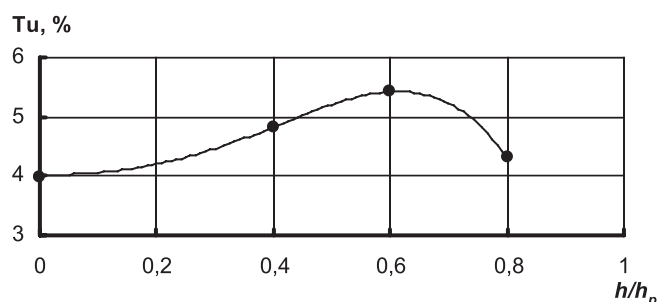


Рис. 8. Изменение турбулентности в зависимости от относительной глубины разреза ребер $Tu = f(h_p/h)$.

уровнем возмущенности потока, вызванной разрезкой ребер, и интенсивностью среднего теплообмена оребренной поверхности.

Некоторые общие сведения об особенностях структуры течения

Результаты настоящего исследования подтвердили выводы [1] о том, что разрезка ребра приводит к ряду аэродинамических эффектов, способствующих интенсификации теплообмена за счет дополнительной турбулизации потока.

Рассматривая дополнительную турбулизацию потока как один из основных влияющих на интенсификацию теплообмена факторов, следует напомнить, что при турбулентном стабилизированном течении в каналах степень турбулентности в ядре потока составляет 3...4%, существенно возрастая вблизи стенок [3]. Отметим также, что процессы переноса в полуоткрытом межреберном канале происходят в начальном участке в условиях несомкнувшихся пограничных слоев, т.е. до достижения динамической и тепловой стабилизации.

К дополнительными источникам турбулизации потока в полуоткрытых каналах с разрезными стенками можно отнести:

- ◆ локальные отрывы потока на входных кромках ребер и основания;
- ◆ возникновение ламинарно-турбулентного перехода на основании и неразрезной части поверхности ребер;
- ◆ срыв потока с выходных кромок “лепестка”;

- ◆ деформация пограничного слоя в месте разрезки ребер;

- ◆ вихреобразования в углах между основанием и ребрами.

Согласно имеющимся физическим представлениям о развитии пограничного слоя по длине обтекаемой поверхности [4], в условиях настоящих экспериментов непосредственно за входными кромками ребер и основания следует ожидать образования зон с локальными замкнутыми отрывными структурами, протяженность которых зависит от степени турбулентности набегающего потока.

За зонами отрыва развивается псевдоламинарный пограничный слой с последующим переходом в турбулентный при достижении критического числа Рейнольдса $Re_{кр} = wx_{кр}/\nu$. Предварительная оценка показывает, что при $w_H \sim 10$ м/с турбулентный пограничный слой образуется при $x_{кр}/L > 0,7$, тогда как при $w_H \sim 5$ м/с практически вся неразрезная, примыкающая к основанию часть ребра занята псевдоламинарным и переходным режимами течения.

На разрезной части ребер срыв потока с входной кромки “лепестка” способствует дополнительной турбулизации потока, однако при этом препятствует возникновению отрыва на входной кромке последующего “лепестка”. На поверхности “лепестка”, поскольку $t < x_{кр}$, образуется только псевдоламинарный пограничный слой, рост которого нарушается наличием разрезки.

Разрезка ребер замедляет процесс роста псевдоламинарного пограничного слоя по длине “лепестка”. Можно предполагать, что внешняя граница пограничного слоя подвергается систематическим воздействиям в местах разрезки из-за уменьшения толщины слоя. Деформация пограничного слоя усиливает суммарную возмущенность потока, вызываемую разрезкой.

Ощутимое влияние на турбулизацию потока оказывают вихреобразования в углах канала между ребрами и основанием. Вихревые структуры являются довольно устойчивыми при глубине разрезки $h_p/h < 0,8$. Однако с ростом глубины разрезки имеет место уменьшение интенсивности пульсаций вблизи основания, что свидетельствует об ослаблении вихревых структур из-за перетоков через разрезку. Именно этим обстоя-

тельством объяснено снижение интенсификации теплообмена при $h_p/h = 0,8$.

При несомкнутых пограничных слоях в центральном сечении, где проводились измерения, суммарная возмущенность Tu учитывает взаимодействие перечисленных факторов и позволяет в первом приближении прогнозировать интенсификацию теплообмена в полуоткрытых каналах с разрезными стенками.

Выводы

Проведено экспериментальное исследование структуры потока (осредненных во времени скоростей и среднеквадратичных пульсаций) в полуоткрытом плоском канале с разрезными ребрами.

Показано, что:

- ◆ Наличие разрезки ребер на “лепестки” приводит к дополнительной турбулизации потока за счет возникновения аэродинамических эффектов различной природы (в том числе, отрывов и срывов потока, ламинарно-турбулентного перехода, вихреобразования в углах основания, нарушения процесса роста пограничного слоя);

- ◆ с увеличением глубины разрезки до $h_p/h = 0,6$ интенсифицируется перенос количества движения, сопровождаемый ростом интенсивности пульсаций скорости в центральной плоскости межреберного канала;

- ◆ При $h_p/h = 0,8$ процесс замедляется из-за перестройки течения, вызванной ослаблением вихревых структур вблизи основания канала.

Полученные данные в первом приближении объясняют наличие при $h_p/h = 0,6$ максимума интенсивности теплообмена, связанного с дополнительной турбулизацией потока в полуоткрытом канале, образованном разрезными ребрами. Они свидетельствуют о необходимости проведения дальнейших экспериментальных исследований по изучению структуры сложных течений для установления взаимосвязи характеристик турбулированных потоков с процессами переноса и целенаправленного воздействия на их интенсивность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Письменный Е.Н., Бурлей В.Д., Терех А.М., Баранюк А.В., Цвященко Е.В. Теплообмен плос-

ких пластинчатых поверхностей с разрезным оребрением при вынужденной конвекции // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т.27, №4. – С.11-16.

2. Письменный Е.Н., Рогачев В.А., Терех А.М., Бурлей В.Д., Разумовский В.Г. Теплообмен плоских поверхностей с сетчато-проволочным оребрением при вынужденной конвекции // Промышленная теплотехника. – 2002. – Т.24, №4. – С.71-78.

3. Дыбан Е.П., Эпик Э.Я. Теплообмен и гидродинамика турбулизированных потоков. – К.: Наукова думка, 1985. – 293 с.

4. Эпик Э.Я. Проблемы прогнозирования и расчета верхнего теплового ламинарно-турбулентного перехода (проблемный доклад) // Труды У Минского международного форума по тепло-и массообмену, 24-28 мая 2004, – Минск. – 2004. – 10 с.

Получено 26.02.2007 г.

УДК 519.6

ВЕРЛАНЬ А.Ф.¹, ГОРОШКО И.О.¹, НИКОЛАЕНКО Ю.Е.²

¹Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины

²Министерство промышленной политики Украины

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ БАЗОВЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ С ТЕПЛОВЫМИ ТРУБАМИ

Розглянуто задачі моделювання теплових і гідродинамічних процесів у системі водяного охолодження яруса БНК нового покоління, побудованої на основі теплових труб. Порівняння результатів кінечноелементного моделювання з експериментом підтвердило адекватність розроблених математичної і комп'ютерної моделей та можливість їх застосування для виконання інженерних розрахунків при розробці і проектуванні перспективних систем охолодження БНК засобів обчислювальної техніки і керування на новій елементній базі з тепловою потужністю, що розсіюється, до 30 кВт в одній стойці.

Рассмотрены задачи моделирования тепловых и гидродинамических процессов в системе водяного охлаждения яруса БНК нового поколения, построенной на основе тепловых труб. Сравнение результатов конечноэлементного моделирования с экспериментом подтвердило адекватность разработанных математической и компьютерной моделей и возможность их применения для выполнения инженерных расчетов при разработке и проектировании перспективных систем охлаждения БНК средств вычислительной техники и управления на новой элементной базе с рассеиваемой тепловой мощностью до 30 кВт в одной стойке.

The problems of simulation of thermal and hydrodynamic processes in the water cooling system of the stage of the new generation basic bearing structure constructed on the base of heat pipes are considered. The comparison of the results of a finite element simulation with an experiment confirmed the adequacy of the developed mathematical and computer models and possibility of their application for carrying out engineering calculations in the development and design of advanced cooling systems of basic bearing structures of the computer and control hardware based on new components with thermal power dissipation up to 30 kW in one rack.

c – удельная теплоемкость жидкости;
 g_i , $i = \overline{1,3}$ – компоненты вектора гравитационного ускорения;
 P – тепловой поток;
 p – давление жидкости;
 T – температура;
 t – время;

v_i , $i = \overline{1,3}$ – компоненты вектора скорости течения жидкости;
 x_i, x_j , $i, j = \overline{1,3}$ – пространственные координаты;
 ΔT – разность температур;
 δ – рассогласование расчетных и экспериментальных значений;
 λ – коэффициент теплопроводности жидкости;