

УДК 536.24

## **ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА ПРОДОЛЬНО ОМЫВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПЛАСТИНЧАТО-РАЗРЕЗНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОХЛАЖДЕНИЯ РЭА**

**Письменный Е.Н., Эпик Э.Я., Рогачев В.А., Терех А.М., Баранюк А.В.**

*Национальный технический университет Украины  
„Киевский политехнический институт” (НТУУ „КПИ”)*

### **1. Введение**

Разработка малогабаритных, высокоэффективных теплоотдающих поверхностей для обеспечения оптимального теплового режима элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и персональных компьютеров (ПК) тесно связана с интенсификацией процессов теплообмена. Одним из перспективных способов увеличения интенсивности теплообмена является создание условий для возникновения отрыва пограничного слоя на плоской поверхности ребер, уменьшения его толщины и турбулизации воздушного потока, омывающего оребренную поверхность. Такие условия возникают на ребре в результате гофрировки ребер, перфорирования [1, 2], разрезки на короткие участки с отогнутыми в противоположные стороны краями [3-7] и т. п.

В литературе довольно широко освещены вопросы влияния изменения формы ребер на теплоаэродинамические характеристики теплоотдающих поверхностей. По данным работ [3-6], 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 суммарную тепловую эффективность поверхности.

Принимая во внимание выше сказанное, для увеличения интенсивности теплообмена 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 их 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 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 турбулизируют его, что, в конечном счете, приводит к интенсификации теплообмена.

С целью изучения взаимосвязи теплообмена и структуры потока, в НТУУ „КПИ” проведены экспериментальные исследования течения, характеристик турбулентности и теплообмена, при варьировании геометрических и режимных параметров теплоотводящей поверхности с пластинчато-разрезным оребрением.

### **2. Методика экспериментальных исследований**

#### **2.1 Определение коэффициентов конвективного теплообмена.**

Исследования конвективного теплообмена поверхностей выполнено в условиях вынужденной конвекции в аэродинамической трубе открытого типа, в диапазонах рассеиваемых тепловых мощностей  $Q = (45-100)$  Вт, скоростей набегающего потока  $w_n = (1.5-10)$  м/с и температур охлаждающего воздуха  $t_B = (20-30)$  °С. Более подробно

экспериментальная установка описана в [8]. Конструкция и основные геометрические размеры исследуемых поверхностей приведены на рис.1. Поверхность состоит из плоского медного основания размерами  $L \times L = 70 \times 70$  мм толщиной  $\delta_0 = 3$  мм, к которому припаяны пластинчатые ребра высотой  $h = 35$  мм толщиной  $\delta_0 = 1.4$  мм расположенные с шагом  $t = 6.9$  мм. Ребра разрезаны в верхней их части на „лепестки” прямоугольной формы. Исследовались три относительные глубины разрезки –  $h_p/h = 0.4, 0.6, 0.8$ .

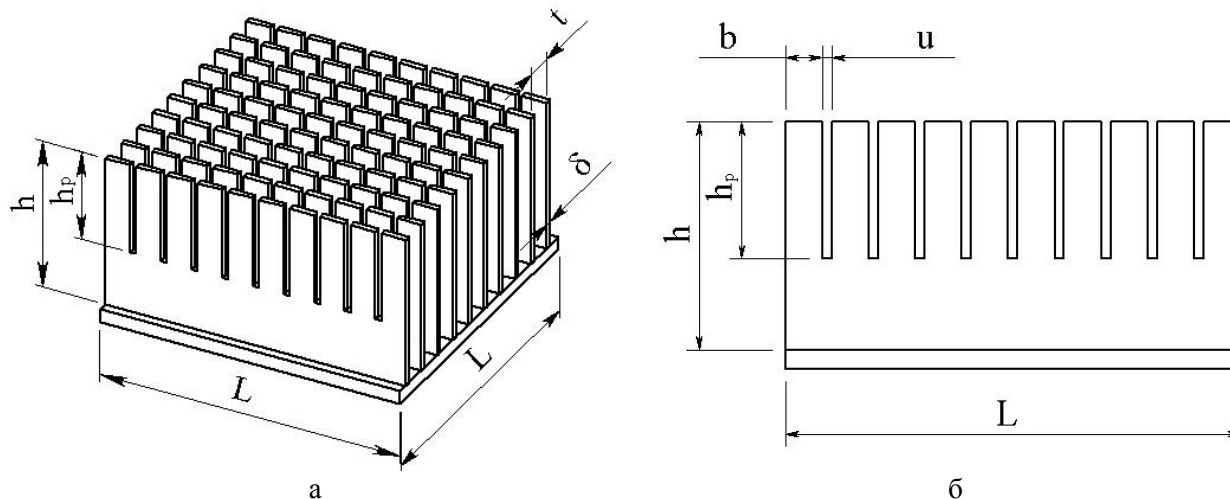


Рис. 1 – Теплоотдающая поверхность с пластинчато-разрезным оребрением  
а – вид общий; б – вид с боку;

Для сравнения и оценки интенсификации теплообмена пластинчато-разрезных поверхностей использовалась широко применяемая в системах охлаждения РЭА и ПК пластинчато-ребристая поверхность без разрезки ребер (радиатор). Эта поверхность имела такие же геометрические характеристики как и поверхность с разрезным оребрением ( $h_p/h=0$ ).

Определение конвективных коэффициентов теплоотдачи в опытах осуществлялось в стационарных условиях. Измерение температурного поля поверхности при фиксированных уровнях рассеиваемых мощностей и установившихся режимах выполнялось с помощью медь-константановых термопар диаметром проводов 0.08 мм. Термопары равномерно распределялись и зачеканивались в глухие отверстия на основании и ребрах поверхности. Исследуемая поверхность устанавливалась в нише дна рабочего участка аэродинамической трубы на теплоизолирующую подставку таким образом, что ее ребра располагались перпендикулярно нижней стенке проточной части аэродинамической трубы. При этом кромка основания поверхности выступала на 2 мм.

Средний коэффициент конвективной теплоотдачи поверхности рассчитывался по формуле:

$$\alpha = \frac{Q}{\Delta t_{\Pi} \cdot F_{\Pi}} \quad (1)$$

где  $Q$  – количество подводимой к поверхности теплоты,  $F_{\Pi}$  – полная площадь теплоотдающей поверхности,  $\Delta t_{\Pi} = t_{\Pi} - t_{\Pi B}$  – среднеповерхностный температурный напор по отношению к омывающему потоку;  $t_{\Pi}$  – средняя поверхностная температура рассчитывалась путем осреднения по всей теплоотдающей поверхности данных температурных измерений,  $t_{\Pi B}$  – средняя температура потока воздуха, определяемая балансовым методом по уравнению:

$$t_{\Pi B} = t_B + \frac{Q}{2G \cdot C_p} \quad (2)$$

где  $t_B$  – температура охлаждающего воздуха  $t_B$ ,  $G$  – расход воздуха в поперечном сечении рабочего участка перед теплоотводящей поверхностью;  $C_p$  – теплоемкость воздуха при  $t_B$ .

В качестве определяющего размера в числах Нуссельта  $Nu$  и Рейнольдса  $Re$  использовался эквивалентный диаметр минимального поперечного проходного сечения исследуемой поверхности. Физические свойства воздуха определялись по температуре набегающего потока  $t_B$ . В числах Рейнольдса за расчетную скорость принималась скорость набегающего воздушного потока.

## 2.2 Измерение турбулентных характеристик потока и визуализация течения.

Исследованные теплоотводящие поверхности имели сравнительно небольшие геометрические размеры и плотную компоновку ребер. В связи с этим не представлялось возможным применить существующие методики исследований и провести измерения структуры потока и получить четкое и контрастное изображение картины течения. Поэтому, при проведении измерений скоростей и их пульсаций в межреберном зазоре, а также для визуализации течения на поверхности ребра использовались геометрически подобные модели, имитирующие теплоотводящие поверхности (рис.1) по форме и конфигурации, выполненные в масштабе 2:1 (рис.2). Модель помещалась в рабочий участок аэродинамической трубы таким образом, что ее ребра располагались параллельно, а основание перпендикулярно нижней стенке проточной части трубы.

Как видно из рис.2, для уменьшения аэродинамического воздействия на поток в полуоткрытом межреберном канале державка датчика термоанемометра 3 обтекалась продольно. При этом нить датчика располагалась перпендикулярно набегающему потоку и параллельно разрезке ребра. Таким образом, нить реагировала на суммарную возмущенность, создаваемую при течении в канале и в области разрезки.

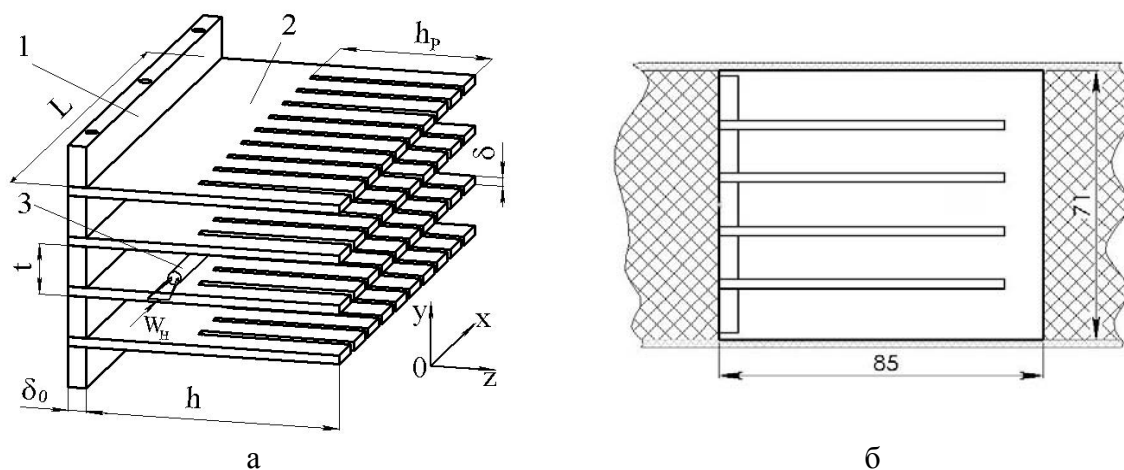


Рис. 2. Модель поверхности с пластинчато-разрезным оребрением (а) и ее расположение в аэродинамической трубе (б)

1 – основание; 2 – ребро; 3 – датчик;

Для измерения осредненных во времени скоростей  $w$  и среднеквадратичных пульсаций скорости  $w'$  использовалась термоанемометрическая система ДИСА 55М с однониточным 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 Институте технической теплофизики НАН Украины, подробно описана в [9].

Результаты измерений турбулентных характеристик потока в центральной плоскости межреберного канала представлены в виде следующих распределений:

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

- осредненных (по высоте ребра) пульсаций скорости по длине ребра  $\overline{w'/w} = f(z/h)$ ;

Осреднение по высоте ребра проводилось следующим образом:

$$\bar{w}/w_h = \frac{\sum w/w_h}{n}; \quad (3)$$

$$\overline{w'/w} = \frac{\sum w'/w}{n}, \quad (4)$$

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

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

$$Tu = \frac{\sum \overline{w'/w}}{m}, \quad (5)$$

где  $m$  – количество измерений по длине ребра.

В экспериментах по визуализации течения при омывании ребра воздушным потоком нанесенная сажекеросиновая взвесь распределялась на его поверхности в зависимости от направления омываемого потока. В результате испарения керосина на поверхности ребра фиксировалась осредненная картина течения из частиц сажи, отражающая особенности течения в пограничном слое. На полученных изображениях области отрыва и циркуляционного движения потока проявлялись в виде темных пятен и полос, свидетельствующих о пониженных скоростях, а места с более высокими локальными скоростями имели более светлую окраску.

### 3.1 Результаты исследований и их анализ

#### 3.2 Интенсивность теплообмена

На рис.3 представлены данные по исследованию теплообмена испытываемых поверхностей с пластинчато-разрезным оребрением в виде графических зависимостей  $Nu=f(Re)$ .

Анализ экспериментальных данных свидетельствует о том, что разрезка ребер повышает интенсивность теплообмена во всем диапазоне изменения чисел Рейнольдса.

Для оценки влияния относительной глубины разрезки на интенсивность теплообмена опытные данные были обработаны и представлены в виде зависимости  $Nu/Nu_0=f(h_p/h)$ , которые показывают влияние глубины разрезки на величину интенсивности теплообмена по сравнению с базовым пластинчатым оребрением без разрезки ( $Nu_0$ ).

Наибольшая интенсификация конвективной теплоотдачи составляет ~26 % при  $h_p/h = 0.6$ . При увеличении и уменьшении глубины разрезки  $h_p/h$  от указанного значения интенсивность теплообмена уменьшается. Относительная глубина разрезки  $h_p/h = 0.6$ , соответствует максимальной интенсивности теплообмена пластинчатых ребер, что согласуется с данными [7], полученными для труб с разрезным спирально-ленточным оребрением.

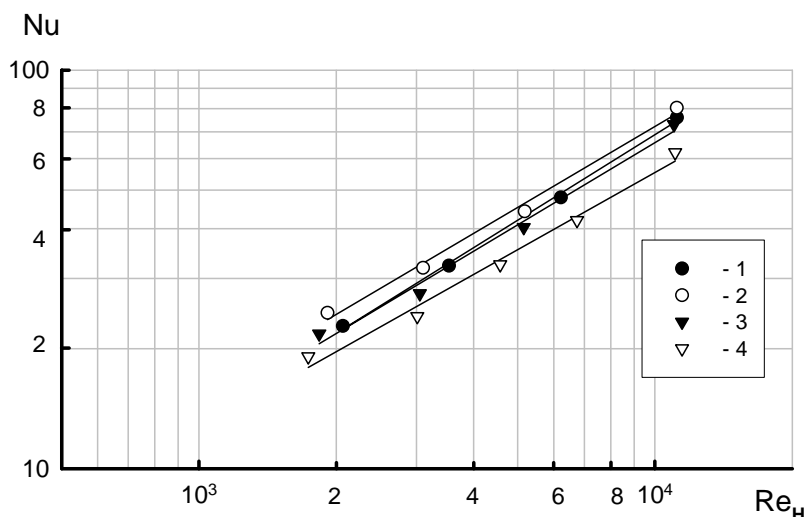


Рис. 3 – Результаты исследования теплообмена поверхностей с пластинчато-разрезным оребрением

1 –  $h_p/h=0.4$ ; 2 –  $h_p/h=0.6$ ; 3 –  $h_p/h=0.8$ ; 4 –  $h_p/h=0$ ;

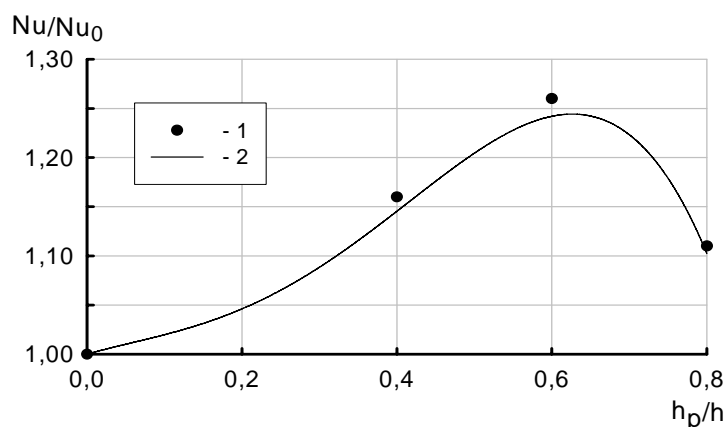


Рисунок 4 – Влияние относительной глубины разрезки ребра на интенсивность теплообмена  
1 – опытные данные; 2 – расчетная кривая [10];

### 3.3 Структура течения

Возрастание интенсивности теплоотдачи за счет разрезки ребер можно объяснить следующим образом. 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 начинает развиваться на поверхности следующего „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, измерения осредненных во времени скоростей воздушного потока в межреберном канале, образованном частично разрезанными ребрами, показали, что на выходе из канала осредненная во времени скорость уменьшается с увеличением глубины разрезки, что является косвенным подтверждением нарушения плавности роста пограничного слоя (фактически, его утоньшения).

Во всех случаях при фиксированной высоте ребра  $h$  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. 5). Расслаивающим параметром служит относительная глубина разрезки. Из рис.5 видно, что с увеличением глубины разрезки темп увеличения скорости уменьшается, что объясняется задержкой роста пограничного слоя, вызванной разрезкой ребра.

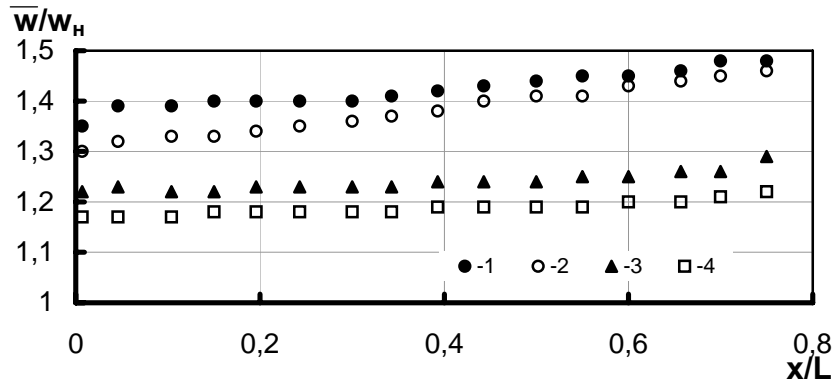


Рисунок 5 – Изменение осредненной по высоте ребра относительной скорости по длине ребра  $\bar{w}/w_n = f(x/L)$  при  $w_n=10$  м/с:  
 1 –  $h_p/h=0$ ; 2 – 0.4; 3 – 0.6; 4 – 0.8

На основе данных, приведенных на рис. 5, оценены градиенты осредненной по высоте ребра скорости по длине ребра при  $x/L > 0.3$ . Для исследуемого режима течения при  $h_p/h=0; 0.4; 0.6; 0.8$  градиенты скорости составляют:  $d\bar{w}/dx = 12.7; 11.1; 9.5; 6.4$  с<sup>-1</sup> соответственно, т.е. убывают с увеличением глубины разрезки.

На рис. 6 представлено изменение по длине межреберного канала интенсивности осредненных по высоте ребра пульсаций скорости  $\overline{w'}/\bar{w} = f(z/h)$ .

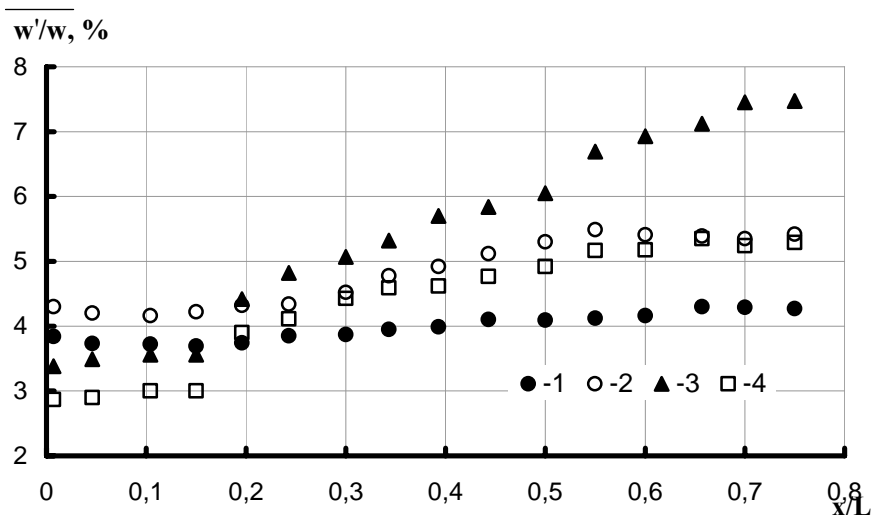


Рисунок 6 – Изменение интенсивности осредненных по высоте ребра пульсаций по длине межреберного канала  $\overline{w'}/\bar{w} = f(z/h)$   
 1 –  $h_p/h=0$ ; 2 – 0.4; 3 – 0.6; 4 – 0.8

Анализ данных рис. 6 свидетельствует о том, что во всех исследованных случаях при  $x/L \leq 0.2$  интенсивность осредненных по высоте пульсаций скорости изменяется в

пределах 3.3-4.2%, и может остаться постоянной при  $h_p/h=0...0.6$ . В тоже время для  $h_p/h=0.8$  интенсивность пульсаций является более низкой ( $\overline{w'/w}=2.8\%$ ). Этот факт свидетельствует об ослаблении вихревых структур вблизи основания при глубине разрезки  $h_p/h=0.8$ . 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 разрезки  $h_p/h=0; 0.4$  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 разрезки, поскольку получен на основе процедуры осреднения среднеквадратичных пульсаций скорости по высоте и длине межреберного канала в центральной плоскости. Изменение суммарной возмущенности в зависимости от относительной глубины разрезки ребер  $Tu=f(h_p/h)$  представлено на рис. 7.

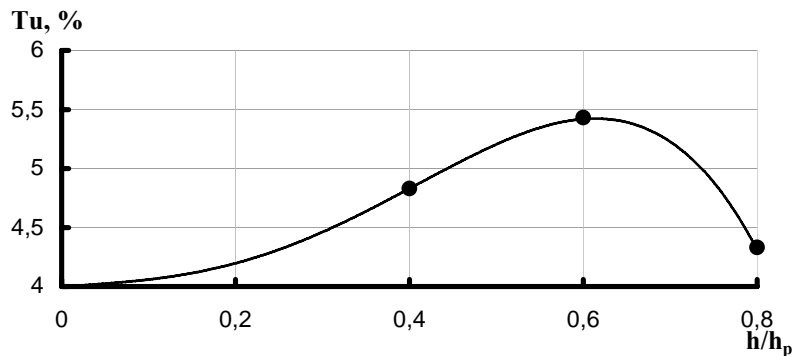


Рисунок 7 – Изменение турбулентности в зависимости от относительной глубины разрезки ребер.

Анализ данных рис. 7 свидетельствует о том, что зависимость  $Tu=f(h_p/h)$  носит экстремальный характер с явно выраженным максимумом при  $h_p/h=0.6$ . При котором наблюдается максимальная интенсивность среднего теплообмена (см. рис.4 и рис.7).

### 3.4. Визуализация течения

Эксперименты по визуализации течения позволили выявить особенности течения в пограничном слое, развивающемся на пластинчато-разрезном ребре. Картины течения на поверхности разрезных ребер с относительной глубиной разрезки  $h_p/h=0; 0.4; 0.6; 0.8$  приведены на рис. 8.

На рис. 8а представлена фотография, иллюстрирующая результаты экспериментов по визуализации течения на поверхности сплошного неразрезного ребра. Картина течения может быть условно разбита на 5 областей:

- Область 1 представляет собою темную полосу шириной  $x_{om}=(5-6)$  мм и свидетельствует об образовании отрывного пузыря при обтекании потоком передней острой кромки ребра. Эта область характеризуется медленно вращающейся вихревой структурой, возникающей вследствие гидродинамического взаимодействия оторвавшегося на входной кромке потока и пограничного слоя возвратного течения [11,12].

- За отрывным пузырем 1 расположена область 2, состоящая из мелких точек сажи, для которой характерна мелкомасштабная вихревая структура. Образование подобных структур свидетельствует о развитии при  $Tu > 0$  псевдоламинарного пограничного слоя. В отличие от ламинарного пограничного слоя, развивающегося при  $Tu = 0$ , в псевдоламинарном пограничном слое присутствуют возмущения различной природы, вызванные в данном случае отрывом с передней кромки и внешней турбулентностью в межреберном канале [12].

- За область 2, занятой псевдоламинарным пограничным слоем, развивается ламинарно-турбулентный переход [12] (область 3), конец которого соответствует  $x_k = 100$  мм. Полученные данные по формированию ламинарно-турбулентного перехода и его протяженности согласуются с экспериментальными результатами [12] для аналогичных условий обтекания пластины турбулизированным потоком.

- Область 4, расположенная за областью ламинарно-турбулентного перехода и представляющая многочисленные параллельные борозды из сажевых частиц, соответствует развитию турбулентного пограничного слоя на поверхности ребра. В этой области наблюдается укрупнение вихрей, прогрессирующих вниз по потоку.

- Узкая темная полоса 5 на кормовой части поверхности свидетельствует о срыве потока с задней кромки ребра, предшествующем течению потока в ближнем следе.

- Образование вихревых структур в углах между основанием и ребрами особенно отчетливо заметное вблизи входа в полуоткрытый канал, подтверждает образование трехмерного течения с высокой степенью турбулентности.

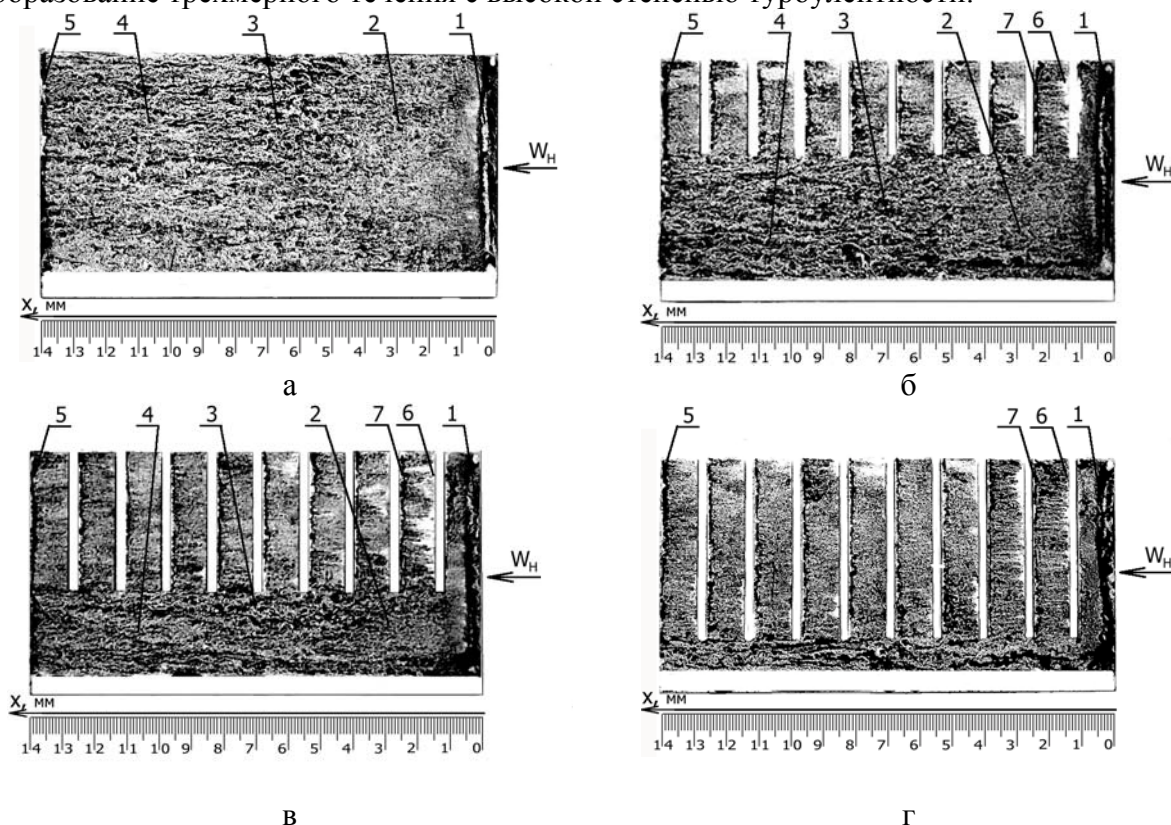


Рис. 8 – Картина течения на поверхности разрезного ребра при  $w_H = 10$  м/с  
а – 0; б – 0.4; в – 0.6; г – 0.8

Картина течения на пластинчато-разрезном ребре условно разделена на две части:



- примыкающий к основанию участок сплошного ребра без разрезки, высотой  $(h-h_p)$ ;
- участок из последовательно расположенных по потоку с шагом  $b+u$  прямоугольных пластин (лепестков), высотой  $h_p$  и шириной  $b$ .

На участке с неразрезной частью ребра при  $h_p/h=0.4$  и  $0.6$  характер течения качественно сохранился таким же, как и для сплошного ребра (рис. 8б, в): за отрывом (область 1) развивается псевдоламинарный пограничный слой (область 2) с последующим ламинарно-турбулентным переходом (область 3), образованием за ним турбулентного пограничного слоя (область 4) и срыва потока с выходной кромки ребра (область 5).

При  $h_p/h=0.4$  процесс ламинарно-турбулентного перехода сохраняется таким же, как и при  $h_p/h=0$ . При  $h_p/h=0.6$  протяженность области 2, занятой псевдоламинарным пограничным слоем, сокращается до (20-22) мм. Это свидетельствует о росте турбулизации потока на неразрезном участке ребра по сравнению со случаями  $h_p/h=0$  и  $0.4$ .

При  $h_p/h=0.8$  (рис. 8г) структура течения на неразрезном участке ребра отличается тем, что вихревые структуры в углах между ребрами и основанием занимают практически всю его высоту. Как и при  $h_p/h=0\dots0.6$  наиболее отчетливо эти структуры видны вблизи передней кромки ребра непосредственно за отрывом. Указанный факт позволяет косвенно оценить размер вихрей у основания (который в первом приближении можно считать равным или несколько превышающим высоту неразрезного участка при  $h_p/h=0.8$ ).

В остальных случаях при  $h_p/h<0.6$  размеры вихрей вблизи основания не препятствуют развитию за отрывом пограничного слоя смешанного типа.

При анализе результатов визуализации на разрезном участке ребра необходимо отдельно рассмотреть первый „лепесток” и следующие за ним.

На первом „лепестке”, как и на неразрезном участке, расположена область отрывного пузыря 1, за которой развивается псевдоламинарный пограничный слой. На остальных „лепестках”, образованных разрезкой, отчетливо видны светлые области 6, свидетельствующие об возникновении ламинарного или псевдоламинарного пограничного слоя. Таким образом, исключение составляет только входной участок первого по ходу потока разрезного ребра, занятый общей отрывной областью 1, а сама разрезка не вызывает отрыва пограничного слоя на передних кромках „лепестков”.

В то же время на всех задних кромках „лепестков” четко просматривается тонкая темная полоса 7, указывающая на срыв потока. Область срыва потока 7 протяженностью по высоте  $h_p$  полностью аналогична области 5 протяженностью по высоте  $h$  для неразрезного и последнего „лепестка” разрезных ребер.

Другой особенностью течения в системе разрезки ребер является возможность перетоков среды между межреберными каналами. Можно предположить, что в местах разрезки имеет место обмен количеством движения, вызывающий дополнительную генерацию турбулентности.

Однако при глубине разрезки  $h_p/h>0.8$  в условиях отсутствия пограничного слоя смешанного типа, располагающегося при  $h_p/h=0\dots0.6$  между «лепестками» и вихревыми структурами вблизи основания, перетоки в местах разрезки могут способствовать снижению суммарной турбулизации потока. С ростом глубины разрезки можно ожидать ослабление вихревых структур вблизи основания из-за непосредственного влияния перетоков. Именно этим обстоятельством может быть объяснено наличие максимума теплообмена при  $h_p/h=0.6$  и снижение интенсивности теплообмена при  $h_p/h=0.8$ , наблюдаемые в [10]. Кроме того, уменьшение интенсивности теплообмена при

$h_p/h > 0.7$  можно объяснить тем, что глубокая разрезка ребра на прямоугольные “лепестки” мешает более свободной растечке теплоты от основания к ребру [10].

Таким образом, наблюдается прямая корреляция между уровнем возмущенности потока, вызванной разрезкой ребер, и интенсивностью среднего теплообмена оребренной поверхности.

#### **4. Выводы**

По результатам экспериментальных исследований можно констатировать следующее:

- применение разрезки ребер является эффективным методом, интенсифицирующим процесс теплообмена;
- при относительной глубине разрезки  $h_p/h = 0.6$  имеет место максимальная интенсификация теплообмена составляющая  $\sim 26\%$ ;
- раскрыты отдельные аспекты механизма интенсификации теплообмена на разрезном ребре на основе измерения турбулентных характеристик потока в межреберном канале и визуализации течения, свидетельствующие о наличии прямой корреляции между турбулизацией потока и интенсивностью теплообмена;

Полученные данные по экспериментальному исследованию теплоотводящей поверхности с пластинчато-разрезным оребрением свидетельствуют о необходимости проведения дальнейших экспериментальных исследований по изучению структуры сложных течений для установления взаимосвязи характеристик турбулизированных потоков с процессами переноса и целенаправленного воздействия на их интенсивность геометрических характеристик ребра и его формы.

## Литература

- [1] 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.
- [2] Eckels P. W., Rabas T. J. Heat Transfer and Pressure Drop Performance of Finned Tube Bundles //Journ. of Heat Transfer. - 1985. - Vol. 107. - P.205-213.
- [3] 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.
- [4] Кунтыш В.Б., Иохведов Ф.М. Теплопередача и аэродинамическое сопротивление пучков труб и поперечными разрезными ребрами// Холодильная техника. – 1968, № 6. - С. 14-18.
- [5] Иохведов Ф.М., Таранян И.Г., Кунтыш В. Б. Теплоотдача и аэродинамическое сопротивление шахматных пучков труб с различной формой поперечного разрезного ребра //Энергомашиностроение. 1975. № 11. С.23-26.
- [6] 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
- [7] Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения под общей редакцией Кунтыша В.В., Бессонного А.Н. – Санкт-Петербург: Недра, 1996. – 508 с.
- [8] 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.
- [9] Дыбан Е.П., Эпик Э.Я. Теплообмен и гидродинамика турбулизированных потоков. – Киев: Наукова думка, 1985. – 293 с.
- [10] 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.
- [11] Ота Т., Итасака М. Отрыв и присоединение потока на плоской пластине с затупленной передней кромкой // Труды американского общества инженеров – механиков „Теоретические основы инженерных расчетов” – 1976. – №2. – С. 321-327.
- [12] Эпик Э.Я. Проблемы прогнозирования и расчета верхнего теплового ламинарно-турбулентного перехода (проблемный доклад). Труды V Минского международного форума по тепло- и массообмену, 24-28 мая 2004.-Минск: ИТМО АНБ, 2004.-10 с.