

УДК 536.24

ТЕПЛОВЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ ЗА ПЛОСКИМ РЕБРОМ С РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ К ПОТОКУ

В. И. Терехов, Н. И. Ярыгина, Я. И. Смульский

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования обтекания турбулентным потоком плоского ребра при различных значениях угла поворота к направлению течения и высоты ребра. Угол поворота ребра к потоку изменялся в диапазоне $\varphi = 50 \div 90^\circ$. Визуализированы картины вихреобразования и определены координаты линии присоединения. Показано, что с уменьшением угла φ деформируется область присоединения и усиливается трехмерность потока за ребром. При варьировании угла ориентации φ в различных продольных сечениях канала за ребром измерены коэффициенты давления. На поверхности за ребром термографическим методом и с помощью термопар определены температурные поля и по ним рассчитаны коэффициенты теплоотдачи. Проанализировано влияние угла поворота ребра к потоку и высоты ребра на динамические и тепловые характеристики отрывного течения.

Ключевые слова: турбулентное течение, поворот ребра, трехмерный отрывной поток.

Введение. Для интенсификации теплообмена в каналах различных энергоустановок широко используются разнообразные преграды, например плоские ребра. В отрывном потоке как перед ребром, так и за ним генерация крупномасштабных вихревых структур и взаимодействие когерентных структур со стенкой способствуют усилению теплообмена на стенке. В то же время присутствие преград вызывает нежелательное увеличение потерь давления. Возникает задача повышения теплоотдачи при снижении потерь давления. Для ее решения необходимо изучение физических механизмов управления вихреобразованием в отрывных течениях, а также проведение тщательных измерений динамических и тепловых характеристик в системе ребер и за единичной преградой, в частности за одиночным ребром.

Отрывное турбулентное течение за плоской преградой, ориентированной под углом к потоку, имеет ряд особенностей по сравнению с течением за преградой, установленной перпендикулярно потоку. Одна из таких особенностей — значительное усиление теплообмена [1–4]. В последнее время это явление все шире используется в технике, например для эффективного охлаждения лопаток турбин или повышения теплоотдачи в теплообменниках. Из-за ориентации препятствия под углом к набегающему потоку течение является трехмерным. Численный расчет трехмерных отрывных турбулентных течений требует больших вычислительных ресурсов и не обеспечивает необходимую точность. При моделировании скошенных течений возникает вопрос о существовании областей и направлений

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 06-08-00300, 04-02-16070).

с инвариантными величинами как динамических, так и тепловых характеристик, что особенно важно в случае одиночного препятствия.

Существует небольшое количество работ, посвященных экспериментальному изучению структуры течения за одиночной преградой, ориентированной под углом к потоку, и еще меньше работ, в которых исследуются тепловые характеристики в этих условиях. В работе [5] рассматривалось течение за ребром, расположенным под углом $\varphi = 65^\circ$ к потоку, в сопоставлении с данными для $\varphi = 90^\circ$. Найдены компоненты средних и пульсационных характеристик потока. Установлено, что в направлении, перпендикулярном препятствию, распределения скоростей и продольных пульсаций скорости сохраняют инвариантность до линии присоединения. В [6] показана инвариантность касательных напряжений при тех же условиях, что и в [5]. В работе [7] исследованы поля средних скоростей и определены коэффициенты давления и трения при обтекании препятствия под углом к потоку $\varphi = 20^\circ$. Получено автомодельное распределение давления вдоль ребра. В работах [8, 9] проанализировано течение в достаточно узком канале при наличии системы скошенных ребер на его дне и противоположной стенке. Показано, что в канале с прямыми ребрами на стенке при больших числах Рейнольдса теплоотдачу можно увеличить примерно в два раза, в канале со скошенными ребрами — в три раза. С увеличением различия температур нагретой стенки и потока параметр эффективности значительно увеличивается. В работе [10] анализируется совместное влияние на массообмен угла ориентации ребер, высоты ребер и расстояния между ними. Показано, что с точки зрения интенсификации теплообмена ребра, ориентированные под углом к потоку, более эффективны при больших расстояниях между ними.

Целью данной работы является продолжение исследований динамики и теплообмена отрывного потока за плоской преградой при изменении в широком диапазоне угла ориентации препятствия к основному течению и его высоты.

Условия эксперимента. Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Института теплофизики СО РАН с прямоугольным рабочим каналом, имеющим сечение 200×200 мм. Длина канала 1000 мм. В рабочий канал помещалась модель длиной 500 мм (рис. 1) на расстоянии 18 мм от нижней стенки. Ступенчатый носик модели длиной около

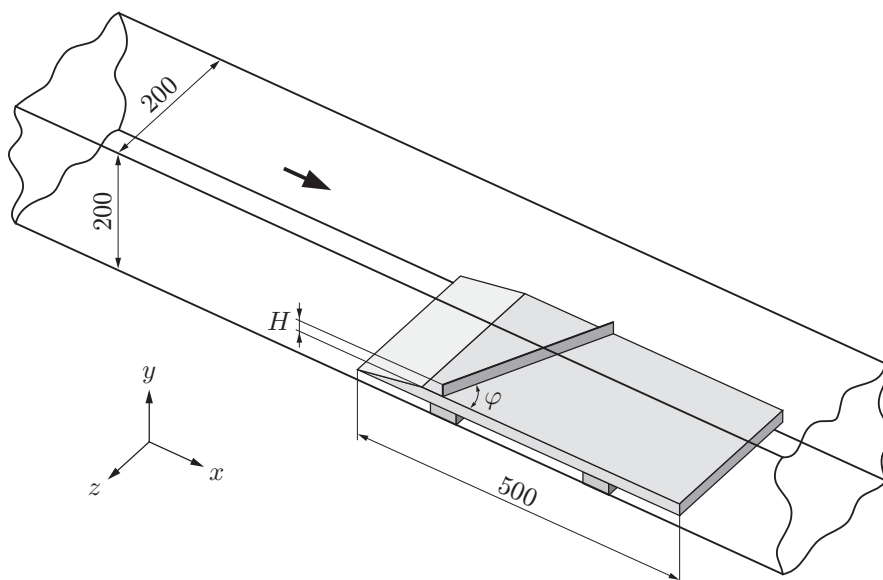


Рис. 1. Схема рабочего участка

100 мм формировал турбулентный пограничный слой толщиной порядка 10 мм с распределением скорости по закону $1/7$ [11]. Для измерения тепловых и динамических характеристик использовались две модели, имеющие одинаковые размеры. Обе модели были изготовлены из листа текстолита толщиной 20 мм. Тепловая модель нагревалась с помощью ленточного нагревателя из алюминиевой фольги в режиме постоянного теплового потока на стенке $q_w = \text{const}$. В центральном сечении вдоль потока заподлицо с поверхностью были заделаны термодпары. На динамической модели в пяти продольных сечениях по ширине канала имелись отверстия для отбора давления, расположенные с шагом 10 мм. На поверхность модели крепилось ребро. Угол ориентации ребра относительно потока φ варьировался от 50 до 90° с шагом 10° , расстояние от носика до центра ребра составляло 197 мм. При $\varphi = 60^\circ$ использовались ребра высотой $H = 6, 10, 20$ мм. В остальных случаях высота ребра составляла 20 мм. В большинстве экспериментов скорость основного потока равна 20 м/с. Соответствующее число Рейнольдса, рассчитанное по высоте препятствия, равно $Re_H = UH/\nu = 1,2 \cdot 10^4; 2,6 \cdot 10^4; 3,9 \cdot 10^4$ (U — скорость основного потока; ν — кинематическая вязкость).

Для визуализации отрывного течения на поверхности за преградой методом саже-масляной пленки использовалась еще одна модель аналогичных размеров с покрытием из оргстекла толщиной 3 мм. Визуализирующая смесь представляла собой смесь черной офсетной краски и осветительного керосина.

Результаты экспериментов. Подробная визуализация течения за ребром, установленным перпендикулярно потоку, выполнена в работах [11–13]. Установлено, что течение за поперечным ребром симметрично, в углах наблюдаются ярко выраженные вихри, а линия присоединения почти параллельна ребру. При уменьшении угла ориентации плоской преграды течение становится несимметричным. Схема течения за скошенным ребром с указанием основных зон приведена на рис. 2,а. При $\varphi < 90^\circ$ угловой вихрь вблизи острого угла φ уменьшается по сравнению со случаем $\varphi = 90^\circ$, а вблизи тупого угла сильно размывается и увеличивается в размерах, особенно в случае высокой преграды (рис. 2,б).

За невысоким ребром для всех углов на линии присоединения имеется участок, параллельный ребру, который при $H = 6$ мм, $\varphi = 60^\circ$ (рис. 2,в) занимает почти половину ширины канала. Можно ожидать, что на этом участке характеристики течения в любом сечении, параллельном ребру, будут одинаковыми.

За высоким ребром линия присоединения, на которой происходит разделение течения на обратное и присоединенное, становится непараллельной ребру, что обусловлено усилением влияния боковых стенок. Так, за ребром высотой $H = 20$ мм при $\varphi = 50^\circ$ различие структуры течения по сравнению со случаем $\varphi = 90^\circ$ максимально. При этом угол между линией присоединения и основным потоком равен примерно 45° . Линия присоединения за скошенным ребром является более выровненной линией растекания. На ней не наблюдаются вихри Тейлора — Гертлера, как в случае $\varphi = 90^\circ$ [11]. Результаты визуализации также показали, что вдоль линии присоединения существует ярко выраженное течение в поперечном направлении. С уменьшением угла φ расстояние от ребра до линии присоединения x_r уменьшается: при $\varphi = 50^\circ$ по центральному сечению канала — почти в два раза, в области, примыкающей к острому углу, — в три раза. Значения величины x_r/H в центральном сечении пластины в направлении течения при различных углах ориентации приведены в таблице.

Уменьшение отрывной зоны приводит также к уменьшению области восстановления давления. Координата максимального значения коэффициента давления приведена в таблице. На рис. 3 показано характерное распределение коэффициента давления $C_p = 2(p_i - p_0)/(\rho U^2)$ в центральном продольном сечении модели за ребром высотой 20 мм при варьировании угла φ (p_i — давление на стенке; p_0, U — опорное давление и скорость

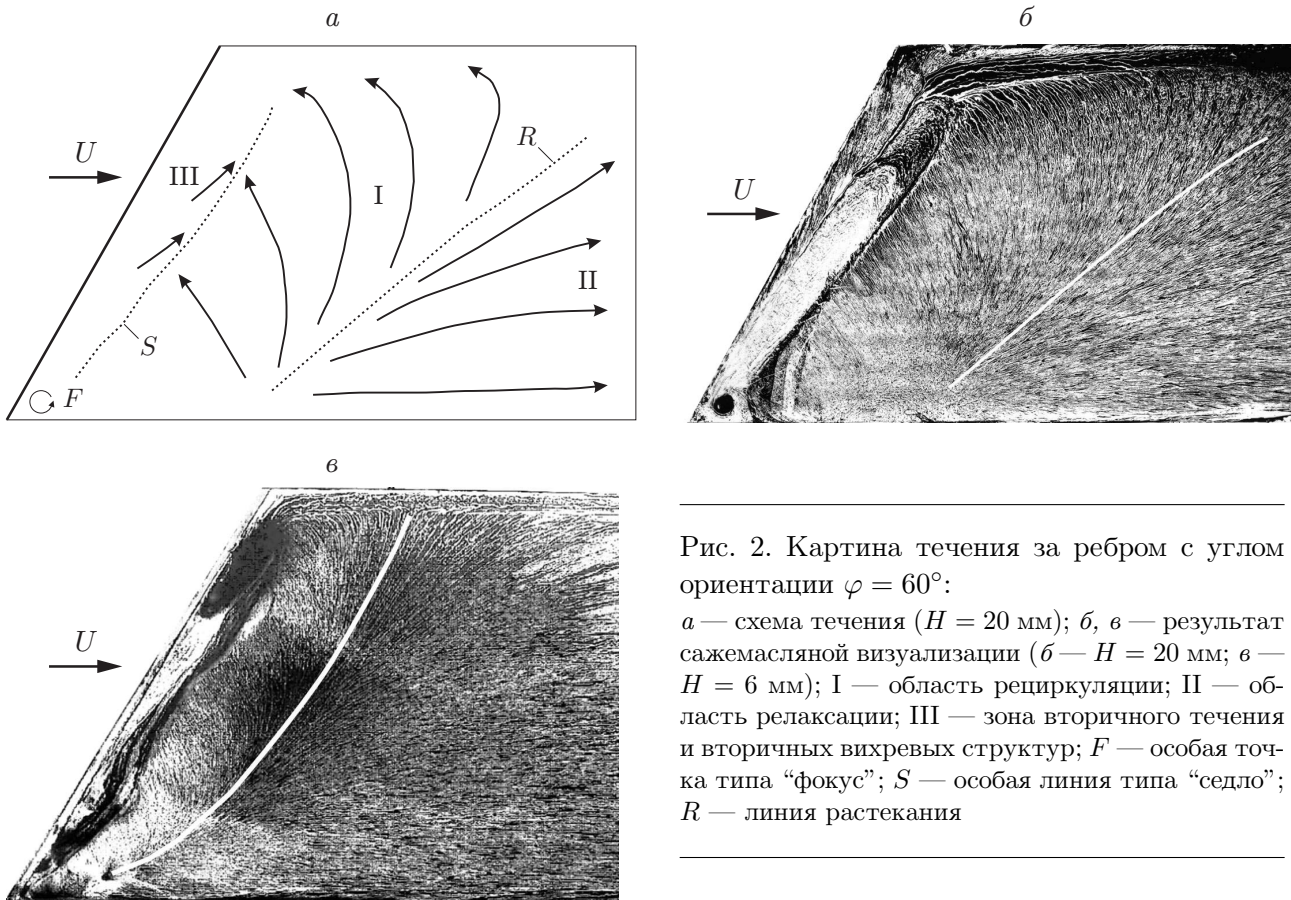


Рис. 2. Картина течения за ребром с углом ориентации $\varphi = 60^\circ$:

a — схема течения ($H = 20$ мм); $b, в$ — результат сажемасляной визуализации ($b — H = 20$ мм; $в — H = 6$ мм); I — область рециркуляции; II — область релаксации; III — зона вторичного течения и вторичных вихревых структур; F — особая точка типа “фокус”; S — особая линия типа “седло”; R — линия растекания

Характерные относительные расстояния рециркуляционной области вдоль центрального сечения по ширине канала

φ , град	$x_{\alpha, \max}/H$	x_r/H	$x_{C_p, \max}/H$
50	4,0	7,5	9,3
60	4,5	9,5	11,3
70	7,0	10,25	12,3
90	11,0	16,5	17,0

в ядре потока над ребром). Восстановление давления в центральном по потоку сечении с уменьшением угла φ происходит раньше, чем в других сечениях. Однако угол атаки потока нарушает инвариантность распределения давления по ширине канала (рис. 4). Поперечная координата z отсчитывается от центра канала. При $\varphi = 90^\circ$ распределения давления во всех сечениях совпадают. При малых углах φ наблюдается быстрое восстановление уровня давления в области, примыкающей к острому углу, в то время как в области, примыкающей к тупому углу, давление нарастает медленно (примерно так же, как при $\varphi = 90^\circ$). Таким образом, длина, на которой происходит восстановление уровня давления, не превышает длины, на которой восстанавливается значение коэффициента давления при $\varphi = 90^\circ$. При этом наибольший перепад давления наблюдается при малых углах ориентации ребра в области, примыкающей к острому углу.

Влияние высоты препятствия на распределение C_p в среднем по ширине канала сечения исследовалось при $\varphi = 60^\circ$ (рис. 5). С увеличением высоты ребра максимальное

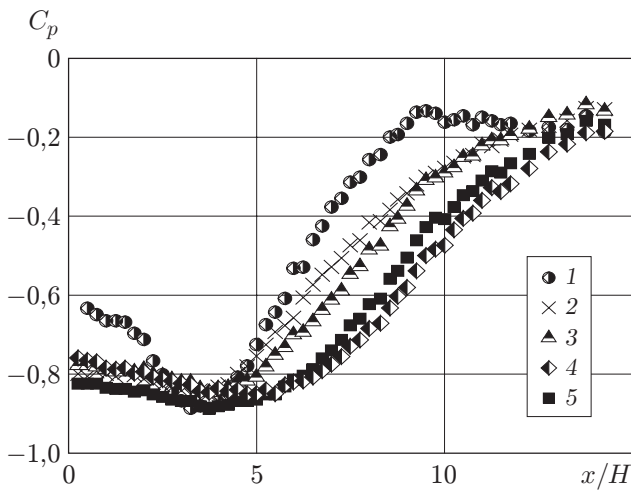


Рис. 3

Рис. 3. Распределение коэффициента давления в центральном сечении при различных углах φ :

1 — $\varphi = 50^\circ$; 2 — $\varphi = 60^\circ$; 3 — $\varphi = 70^\circ$; 4 — $\varphi = 80^\circ$; 5 — $\varphi = 90^\circ$

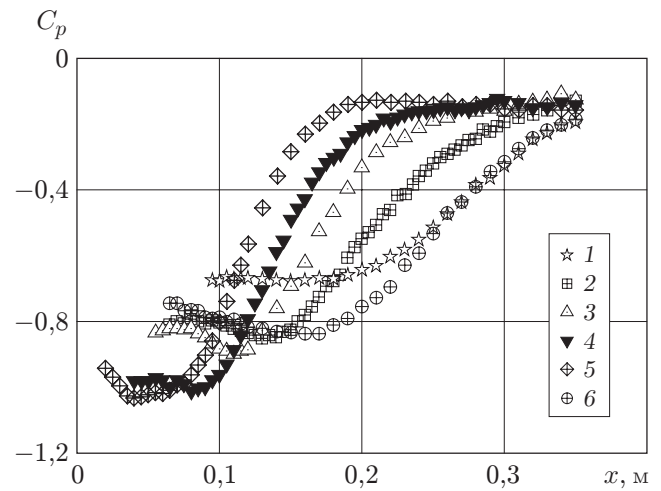


Рис. 4

Рис. 4. Распределение коэффициента давления в пяти продольных сечениях по ширине канала:

1-5 — $\varphi = 60^\circ$ (1 — $z = -50$ мм; 2 — $z = 0$; 3 — $z = 25$ мм; 4 — $z = 50$ мм; 5 — $z = 75$ мм); 6 — $\varphi = 90^\circ$

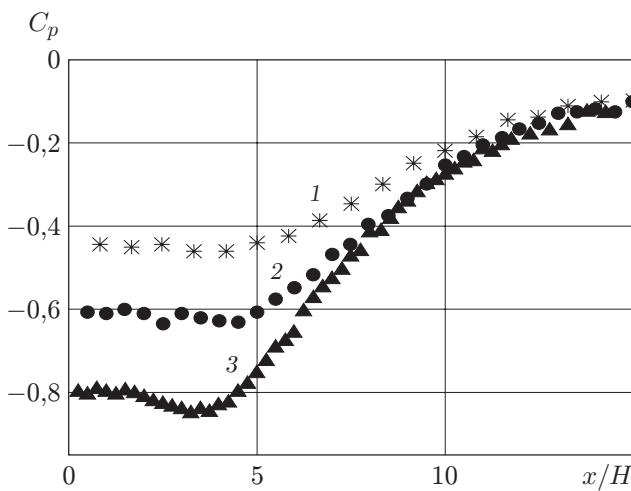


Рис. 5

Рис. 5. Зависимость коэффициента давления C_p от высоты ребра при $\varphi = 60^\circ$:

1 — $H = 6$ мм; 2 — $H = 10$ мм; 3 — $H = 20$ мм

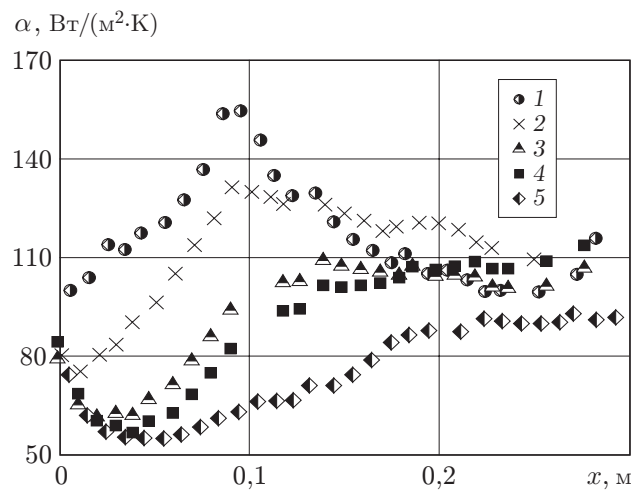


Рис. 6

Рис. 6. Распределение коэффициента теплоотдачи по длине канала при различных значениях угла φ :

1 — $\varphi = 50^\circ$; 2 — $\varphi = 60^\circ$; 3 — $\varphi = 70^\circ$; 4 — $\varphi = 80^\circ$; 5 — $\varphi = 90^\circ$

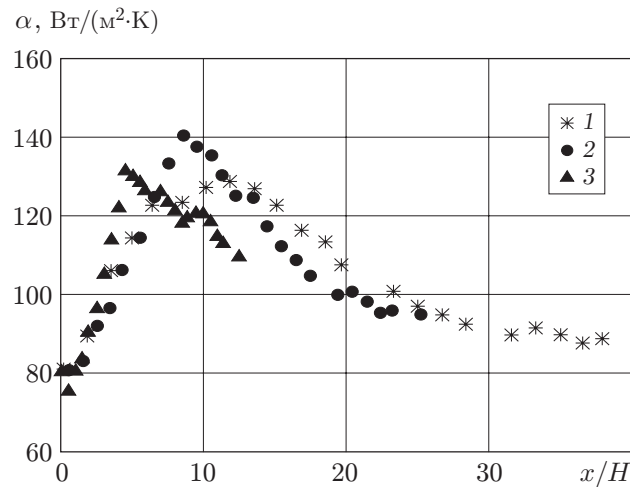


Рис. 7. Распределение коэффициента теплоотдачи по длине канала при $\varphi = 60^\circ$ и различной высоте ребра:

1 — $H = 6$ мм; 2 — $H = 10$ мм; 3 — $H = 20$ мм

разрежение увеличивается, а относительное расстояние от ребра до координаты максимального значения коэффициента давления $C_{p,\max}$ остается практически постоянным.

За скошенным ребром тепловые характеристики близки к динамическим. В данной работе распределения температуры вдоль центральной линии канала получены с помощью термопар, по всей области за ребром — с помощью тепловизора. По этим распределениям вычислены локальные коэффициенты теплоотдачи.

Распределение коэффициента теплоотдачи α подобно распределению коэффициента давления C_p (рис. 6). С уменьшением угла ориентации ребра максимальное значение коэффициента теплоотдачи увеличивается, а координата максимума $x_{\alpha,\max}$ приближается к ребру. При $\varphi = 90^\circ$ точка $x_{\alpha,\max}$ находится значительно ближе к преграде, чем точка присоединения x_r и координата максимума давления $x_{C_{p,\max}}$. При малых значениях φ расстояние до точки максимума коэффициента теплоотдачи уменьшается более значительно, чем расстояние до точки максимума давления и длина области присоединения. При $\varphi = 50^\circ$ локальный максимум коэффициента теплоотдачи в миделевом сечении примерно на 70 % больше, чем при $\varphi = 90^\circ$. Высота преграды оказывает различное влияние на коэффициенты давления и теплоотдачи, при этом влияние высоты на коэффициент теплоотдачи достаточно слабое (рис. 7).

Заключение. Исследовано влияние угла ориентации ребра к основному потоку ($\varphi = 50, 60, 70, 80, 90^\circ$) на картину вихреобразования, поля давления и теплообмен при различных (в зависимости от высоты препятствия) значениях числа Рейнольдса: $Re_H = 1,2 \cdot 10^4$; $2,6 \cdot 10^4$; $3,9 \cdot 10^4$.

Показано, что с уменьшением угла поворота ребра к потоку расстояния до линии присоединения и точек максимумов коэффициентов давления и теплоотдачи уменьшаются, причем наиболее значительно в области, примыкающей к острому углу. При этом наибольшее отличие угла наклона линии присоединения к направлению потока от угла ориентации преграды наблюдается для высокого ребра.

При малых значениях φ за ребром имеет место существенная неравномерность распределений давления по ширине канала, при этом увеличивается разрежение в области вторичного вихря, примыкающей к острому углу.

С уменьшением угла φ возрастает максимальное значение коэффициента теплоотдачи (в центральном сечении — в 1,7 раза при $\varphi = 50^\circ$). С увеличением высоты ребра давление за преградой растёт, в то время как коэффициент теплоотдачи изменяется слабо.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Olsson C.-O., Sunden B.** Experimental study of flow and heat transfer in rib-roughened rectangular channels // J. Exp. Thermal Fluid Sci. 1998. V. 16, N 4. P. 349–365.
2. **Gao X., Sunden B.** Heat transfer and pressure drop measurements in rib-roughened rectangular channels // J. Exp. Thermal Fluid Sci. 2001. V. 24, N 1. P. 25–34.
3. **Han J. C., Park J. S.** Developing heat transfer in rectangular channels with rib turbulators // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1988. V. 31, N 1. P. 183–195.
4. **Kim R., Mochizuki S., Murata A.** Effects of rib arrangements on heat transfer and flow behavior in a rectangular rib-roughened passage: Application to cooling of gas turbine blade trailing edge // J. Heat Transfer. 2001. V. 123, N 4. P. 675–682.
5. **Hancock P. E., McCluskey F. M.** Spanwise-invariant three-dimensional separated flow // J. Exp. Thermal Fluid Sci. 1997. V. 14, N 1. P. 25–34.
6. **Hancock P. E.** Measurements of mean and fluctuating wall shear stress beneath spanwise-invariant separation bubbles // Exp. Fluids. 1999. V. 27, N 1. P. 53–59.
7. **Okita Yu., Ayukawa K., Nakamura K., et al.** The flow over an inclined fence in a turbulent boundary layer // Trans. Japan Soc. Mech. Engrs. Ser. B. 2001. V. 67, N 655. P. 645–650.
8. **Mahmood G. I., Ligrani P. M., Won S. Y.** Spatially-resolved heat transfer and flow structure in a rectangular channel with 45° angled rib turbulators // Proc. of the ASME TURBO EXPO 2002, Amsterdam (Netherlands), June 3–6, 2002. Amsterdam: ASME, 2002. CD-proc. Gt-2002-30215.
9. **Mahmood G., Ligrani P. M., Chen K.** Variable property and temperature ratio effects on Nusselt number in a rectangular channel with 45° angled rib turbulators // J. Heat Transfer. 2003. V. 125, N 5. P. 769–778.
10. **Chyu M. K., Wu L. X.** Combined effects of rib angle-of-attack and pitch-to-height ratio on mass transfer from a surface with transverse ribs // J. Exp. Heat Transfer. 1989. V. 2, N 4. P. 291–308.
11. **Terekhov V. I., Yarygina N. I., Zhdanov R. F.** Heat transfer in turbulent separated flows in presence of high free-stream turbulence // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2003. V. 46, N 23. P. 4535–4551.
12. **Терехов В. И., Ярыгина Н. И., Смульский Я. И.** Трёхмерное турбулентное отрывное течение за плоским препятствием с различной ориентацией к потоку // Сб. тр. XXVII Сиб. теплофиз. семинара, Новосибирск, 4–5 окт. 2004 г. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2004. № 146. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). ISBN 5-89017-027-9.
13. **Terekhov V. I., Yarygina N. I., Smulsky Ya. I.** Three-dimensional turbulent separated flow behind a flat obstacle with different orientations relative to the flow // Proc. of the 6th World conf. on exp. heat transfer, fluid mech. and thermodynamics (ExHFT-6), Matsushima (Japan), Apr. 17–21, 2005. Miyagi: Tohoku Univ., 2005. CD-proc. Paper N 3-a-5.

*Поступила в редакцию 27/XII 2005 г.,
в окончательном варианте — 6/II 2006 г.*