

УДК 536.24

ТЕРЕХОВ В.И., ЯРЫГИНА Н.И., СМУЛЬСКИЙ Я.И.

Институт теплофизики СО РАН

ТУРБУЛЕНТНОЕ ОТРЫВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЗА ПЛОСКИМ РЕБРОМ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИИ К ПОТОКУ

В роботі наведено результати експериментального дослідження обтікання турбулентним потоком плоского ребра, встановленого під різними кутами орієнтації до потоку від $\varphi = 50^\circ$ до 90° , при різних висотах ребра та різних ступінях турбулентності зовнішньої течії. Методом візуалізації вивчено тривимірну структуру течії за ребром та деформацію області приєднання у залежності від кута φ . Виміряно коефіцієнти тиску та тепловіддачі. Проаналізовано вплив кута φ , висоти перешкоди та зовнішнього ступня турбулентності на динамічні і теплові характеристики відривної течії.

В работе представлены результаты экспериментального исследования обтекания турбулентным потоком плоского ребра, установленного под различным углом ориентации к потоку от $\varphi = 50^\circ$ до 90° , при различных высотах ребра и разных степенях турбулентности внешнего течения. Методом визуализации изучена трехмерная структура течения за ребром и деформация области присоединения в зависимости от угла φ . Измерены коэффициенты давления и теплоотдачи. Проанализировано влияние угла ориентации ребра, высоты преграды и внешней степени турбулентности на динамические и тепловые характеристики отрывного течения.

This work represents the results of experimental studies on streamlining of a flat rib by a turbulent flow. The rib was installed at different angles relative to the flow (from $\varphi = 50^\circ$ to 90°), its height was varied and the turbulence degree of the external flow was also different. The three-dimensional structure of the flow behind the rib is studied by the method of visualization; deformation of the connection area is shown depending on angle φ . Coefficients of pressure and coefficients of heat transfer are measured. The effects of the rib orientation angle, obstacle height and external turbulence degree on dynamic and thermal characteristics of the detachment flow are analyzed.

C_p – коефіцієнт тиску;
 C_p^* – модифікований коефіцієнт тиску;
 H – висота ребра;
 p – тиск;
 q – густина теплового потоку;
 Re – число Рейнольдса;
 $Re_H = U \cdot H/\nu$;
 Tu_0 – ступінь турбулентності основного потоку;
 U – швидкість основного потоку;
 x – продольная координата;
 x_r – координата точки присоединения;
 $x_{\alpha_{max}}$ – координата максимального значения коэффициента теплоотдачи;
 $x_{C_{pmax}}$ – координата максимального значения коэффициента тиску;

x^* – продольная координата, где $C_p^* = 0,5$;
 z – поперечная координата;
 α – коефіцієнт теплоотдачи;
 α_0 – коефіцієнт теплоотдачи при естественной турбулентности;
 ρ – густина;
 φ – кут орієнтації ребра к потоку;
 ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості.
Індекси:
 о – условия в основном потоке;
 ст – условия на стенке;
 * – особые условия;
 max – максимальное значение;
 min – минимальное значение.

Отрывное течение за плоской преградой, ориентированной под углом к потоку, отличается рядом особенностей по сравнению с перпендикулярной преградой. Этот факт успешно используется для эффективного охлаждения лопаток турбин или для повышения теплоотдачи в теплообменниках и является важным для пра-

вильного учета процессов теплопереноса в других энергетических установках, где реализуются элементы, установленные под углом к течению.

Течение из-за скоса ребра к набегающему потоку является трехмерным. Численное моделирование трехмерных отрывных турбулентных течений даже для современного уровня расчетных

методов требует огромных вычислительных ресурсов и не дает необходимой точности при расчете теплообмена. Для развития расчетных методов в этом направлении необходим банк опытных данных.

В литературе имеется не так много работ, посвященных экспериментальному изучению структуры течения за одиночной преградой под углом к потоку, и еще меньше работ по исследованию тепловых характеристик в этих условиях. В большинстве работ обсуждался вопрос о существовании областей и направлений, где могут реализовываться инвариантные параметры для динамических характеристик. В работе [1] рассматривалось течение за ребром под углом 65° к потоку в сопоставлении с перпендикулярным препятствием. Были найдены компоненты средних и пульсационных характеристик. Выявлено, что в направлении, перпендикулярном препятствию, продольные пульсации скорости сохраняют инвариантность до сепарационной линии для обеих конфигураций. В статье [2] изучались средние и пульсационные характеристики течения. Показано, что существует инвариантность для продольных пристенных касательных напряжений при тех же условиях, что и в [1]. Авторы [3] исследовали обтекание препятствия под острым углом к потоку в 20° . Рассматривались поля средних скоростей и коэффициенты давления и трения. Найдено автомодельное распределение давления вдоль ребра. В работах [4–5] анализировалось течение в достаточно узком канале при наличии системы скошенных ребер на его дне и противоположной стенке. Авторами показано, что если в канале с прямыми ребрами теплоотдачу при больших числах Рейнольдса можно увеличить примерно в два раза, то со скошенными ребрами – в три раза. Параметр эффективности значительно возрастает с увеличением разницы температуры нагретой стенки и потока. Работа [6] посвящена обсуждению совместного влияния на массообмен угла ориентации ребер, высоты ребер и расстояния между ними. Показано, что ребра под углом к потоку более эффективны при больших расстояниях между ними.

Целью данной работы явилось расширение исследований по динамике и теплообмену от-

рывного потока за преградой в широком диапазоне таких геометрических параметров, как угол ориентации, высота препятствия и внешняя турбулентность.

Эксперименты были проведены в аэродинамической трубе Института теплофизики СО РАН сечением 200×200 мм и длиной 600 мм. Исследовалось течение за плоскими ребрами высотой 6, 10 и 20 мм. Ребра располагались по всей ширине канала. Углы ориентации ребра по отношению к потоку равнялись 50° , 60° , 70° , 80° и 90° . Скорость основного потока составляла 20 м/с. Соответствующее число Рейнольдса, рассчитанное по высоте препятствия, равнялось $1,2 \cdot 10^4$; $2,6 \cdot 10^4$; $3,9 \cdot 10^4$. Толщина пограничного слоя перед преградой составляла 10 мм. Варьировался уровень турбулентности Tu_0 : 1,5 %, 6 % и 15 % – промежуточный уровень достигался с помощью перфорированного турбулизатора, высокий уровень обеспечивал флажковый генератор турбулентности. Полиэтиленовые флажки были прикреплены к перфорированной решетке.

Была выполнена сажемастная визуализация потока, измерены распределения коэффициентов давления в нескольких продольных сечениях и распределение коэффициента теплоотдачи в мидельном сечении канала. Тепловая модель нагревалась с помощью ленточного нагревателя из алюминиевой фольги в режиме $q_{ст} = \text{const}$. В центральном сечении вдоль потока заподлицо с поверхностью были заделаны термодпары.

В работе [7] на данной модели была проведена визуализация течения за ребром, установленным перпендикулярно потоку. Течение в этом случае симметрично, имеется два угловых ярко выраженных вихря, а линия присоединения практически параллельна ребру. В отличие от этого случая визуализация в данной работе, частично представленная в [8,9], показала, что при уменьшении угла ориентации ребра течение становится несимметричным, на остром угле наблюдается один концевой вихрь, на тупом угле вихрь размывается. Линия присоединения оторвавшегося сдвигового слоя для высокой преграды ($H = 20$ мм), становится непараллельной ребру, что связано с усиленным влиянием боковых стенок. При уменьшении угла наблюдается все большее расхождение с ним угла между линией

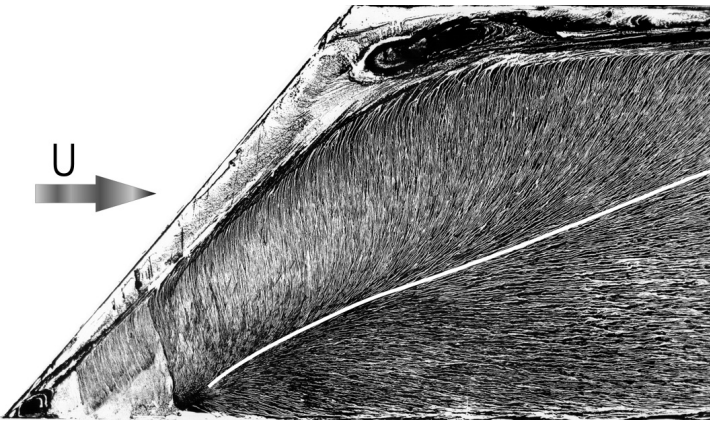


Рис. 1. Картина течения за ребром высотой $H=20$ мм с углом ориентации к потоку $\varphi = 50^\circ$.

присоединения и основным потоком. Так при $\varphi = 50^\circ$ расхождение со случаем $\varphi = 90^\circ$ было максимальным, при этом угол между линией присоединения и основным потоком равнялся примерно 45° (рис. 1). Для ребра малой высоты 6 мм имело место уменьшение влияния боковых стенок. Для этого ребра при всех углах на линии присоединения, как и в работе [1], существовал участок, параллельный ребру. С уменьшением угла его протяженность уменьшалась. И, как было подтверждено измерениями давления и теплоотдачи, течение за этим участком инвариантно вдоль ребра.

Для ребер произвольной высоты с уменьшением угла наблюдается сильное сокращение расстояния от ребра до линии присоединения x_r . Так в случае $H = 6$ мм и $\varphi = 50^\circ$ для автотельной области оно уменьшается почти в два раза по сравнению с $\varphi = 90^\circ$. С уменьшением сокращаются также расстояния до максимумов давления $x_{C_{p\max}}$ и теплоотдачи $x_{\alpha_{\max}}$. Причем $x_{\alpha_{\max}} < x_r < x_{C_{p\max}}$. Определение всех трех координат является очень важным, так как нормирование коэффициентов давления и теплоотдачи на их величины в точках $x_{C_{p\max}}$ и $x_{\alpha_{\max}}$ в любом продольном сечении позволяет получать коррелированные зависимости.

Для малых углов сокращение отрывной зоны подтверждается более быстрым восстановлением давления (рис.2). Распределение коэффициента давления $C_p = 2(p_i - p_0)/\rho U^2$ рассматривалось в пяти продольных сечениях по ширине канала для углов $\varphi = 90^\circ$ и 60° . Здесь p_i – давление на стенке, p_0 и U – опорное давление и скорость, измеряемые

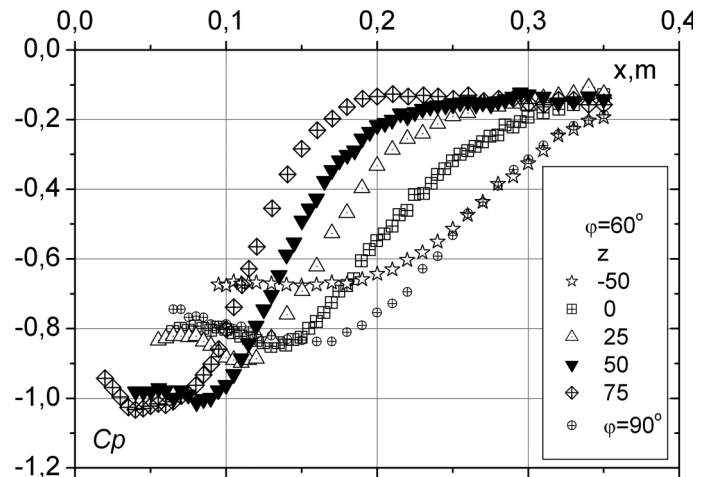


Рис. 2. Приведенный коэффициент давления для углов $\varphi = 90^\circ$ и 60° в различных продольных сечениях по ширине канала.

в ядре потока над ребром. Если для $\varphi = 90^\circ$ распределение давления во всех сечениях совпадает, то вследствие трехмерности течения за скошенным ребром такого совпадения нет. Как видно из рис. 2, для $\varphi = 60^\circ$ наибольший перепад давления наблюдается возле острого угла. Распределение давления в зависимости от угла установки ребра при высоте ребра 20 мм [8,9] показало, что максимальное разрежение имеет место на минимальном угле, и восстановление давления для него происходит раньше. Было установлено, что на кривой распределения модифицированного ко-

эффициента давления $C_p^* = \frac{C_p - C_{p\min}}{C_{p\max} - C_{p\min}}$ по ко-

ординате $(x-x^*)/H$, где x^* – продольная координата, в которой $C_p^* = 0,5$, имеется автотельная область для всех углов скоса, где кривые достаточно хорошо обобщаются. Отметим также, что с увеличением высоты ребра максимальное разрежение усиливается, а относительное расстояние в калибрах от ребра до координаты максимального значения коэффициента давления $C_{p\max}$ уменьшается.

Распределение коэффициента теплоотдачи α вниз по потоку от ребра представлено на рис. 3. Очень четко прослеживается интенсификация теплоотдачи при уменьшении угла φ . С увеличением угла ориентации ребра максимальная теп-

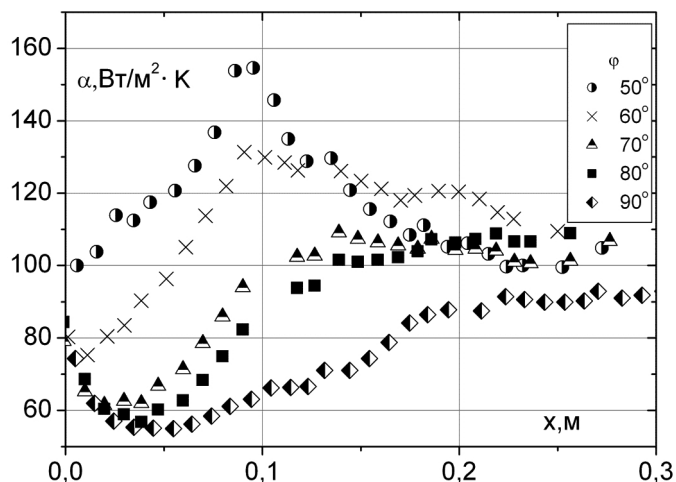


Рис. 3. Влияние высоты ребра на коэффициент теплоотдачи, $\varphi = 60^\circ$.

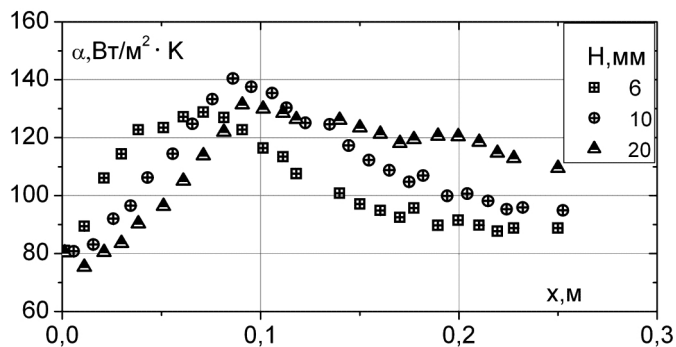


Рис. 4. Коэффициент теплоотдачи при вариации угла φ , $H = 20$ мм

лоотдача снижается, а ее координата $x_{\alpha_{\max}}$ отдалается от ребра. Локальный максимум теплоотдачи для угла 50° примерно на 40% больше, чем для угла 90° , средний же коэффициент теплоотдачи по всей длине пластины при этом возрастает примерно на 30%.

Для угла $\varphi = 60^\circ$ было рассмотрено влияние на теплоотдачу высоты ребра (рис. 4). Как и при угле 90° получено, что нормированное расстояние от ребра до линии присоединения x_r к высоте ребра H увеличивается с уменьшением высоты. Например, при высоте ребра 20 мм максимум теплоотдачи находится посередине между ребром и разделительной линией, а при высоте 6 мм их координаты практически совпадают. Получено, что высота преграды влияет различным образом на коэффициенты давления и теплоотдачи. Теплоотдача имеет максимум при $H = 10$ мм, то есть

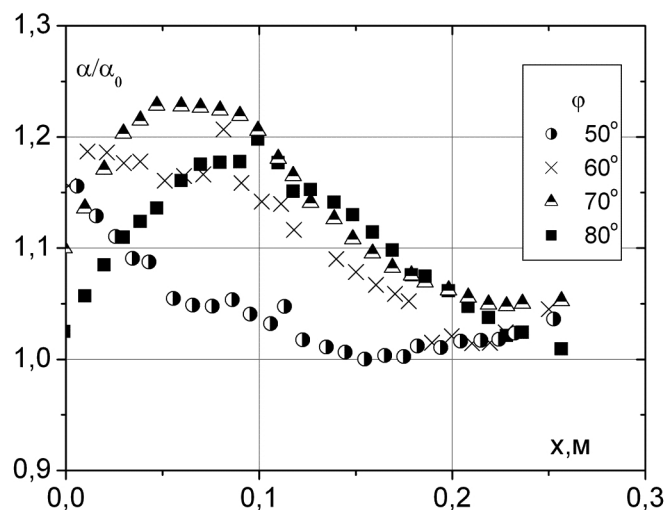


Рис. 5. Влияние внешней турбулентности на коэффициент теплоотдачи за ребром при различных углах ориентации, $H = 20$ мм.

когда высота ребра примерно равна толщине пограничного слоя. Это явление не наблюдается при $\varphi = 90^\circ$.

Повышенная степень турбулентности потока Tu_0 оказывает влияние на распределение давления C_p , но в большей степени на коэффициент теплоотдачи. Влияние повышенной турбулентности на теплоотдачу на разных углах различно. Для $\varphi = 70^\circ$ выявлено наибольшее влияние внешней турбулентности (рис. 5). При этом в области вторичного вихря теплоотдача возрастает на 23% по сравнению со значением при естественной турбулентности. Наименьшее влияние на теплоотдачу наблюдалось на угле ориентации ребра 50° . Во вторичном вихре увеличение составило всего 15%, а в основной рециркуляционной области влияние турбулентности минимально.

Воздействие высокой турбулентности на поведение теплоотдачи для разных высот ребра исследовалось на угле $\varphi = 60^\circ$ [8,9]. Найдено, что с уменьшением высоты ребра влияние турбулизации на теплоотдачу растет. При малой высоте преграды ($H = 6$ мм) для угла $\varphi = 70^\circ$ средняя теплоотдача возросла в 1,3 раза.

Выводы

В работе получены новые экспериментальные данные по структуре вторичного потока, распре-

делению коэффициентов давления и теплоотдачи. Исследовано влияние угла ориентации ребра к основному турбулентному потоку, высоты ребра и степени турбулентности набегающего потока.

Визуализация представила сложную перестройку структуры вторичного течения при уменьшении угла скоса ребра к потоку – уменьшение области присоединения вторичного течения на больших поперечных расстояниях со стороны острого угла и ее увеличение с размыванием линии присоединения у стенки возле тупого угла.

Показано, что для области, где координаты линии присоединения уменьшаются, смещаются к ребру и координаты максимумов давления и теплоотдачи, при этом угол линии присоединения все больше расходится с углом ориентации преграды. Найдено, что для малых углов φ усиливается разрежение в области вторичного вихря и более всего у стенки с острым углом. Для всех углов скоса потока имеется автомодельный участок на кривой для модифицированного коэффициента давления. С уменьшением φ возрастает максимальная теплоотдача.

Получено, что с увеличением высоты ребра приведенный коэффициент давления усиливается, а максимальный коэффициент теплоотдачи реализуется при высоте ребра, равной высоте пограничного слоя.

Установлено, что влияние повышенного уровня турбулентности на коэффициент давления в основном наблюдается в области вторичного вихря. Выявлена сильная интенсификация теплообмена (в 1,3 раза) на самом высоком уровне внешней турбулентности потока, особенно для угла $\varphi = 70^\circ$ и при малых высотах преграды.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04–02–16070).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hancock P.E. and McCluskey F.M.* Spanwise-invariant three-dimensional separated flow // *J. Exp. Thermal and Fluid Science.* – 1999. – Vol. 14. – P. 25 – 34.

2. *Hancock P.E.* Measurements of mean and fluctuating wall shear stress beneath spanwise-invariant separation bubbles // *Experiments in Fluids*, Springer-Verlag. – 1999. – Vol. 27. – P. 53 – 59.

3. *Okita Yu., Ayukawa K., Nakamura K., Ichimiya M. and Nakase Yo.*, The flow over an inclined fence in a turbulent boundary layer // *Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. B.* – 2001. – Vol. 67, №655. – P. 645 – 650.

4. *Mahmood G., Ligrani P.M. and Won S.Y.*, Spatially-resolved heat transfer and flow structure in a rectangular channel with 45° angled rib turbulators // *Proc. of ASME TUPBO 2002*, Amsterdam, The Netherlands, Gt-2002-30215. – 2002. – 12p.

5. *Mahmood G., Ligrani P.M. and Chen K.*, Variable property and temperature ratio effects on Nusselt number in a rectangular channel with 45° angled rib turbulators // *J. Heat Transfer.* – 2003. – Vol. 125. – P. 769 – 778.

6. *Chyu M.K. and 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. Experimental Heat Transfer.* – 1989. – Vol.2. – P.291 – 308.

7. *Terekhov V.I., Yarygina N.I. and Zhdanov R.F.*, Heat transfer in turbulent separated flows in presence of high free-stream turbulence // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2003 – Vol. 46. – P. 4535 – 4551.

8. *Терехов В.И., Ярыгина Н.И., Смутьский Я.И.* Трехмерное турбулентное отрывное течение за плоским препятствием с различной ориентацией к потоку // Сборник трудов XXVII Сибирского теплофизического семинара, 4-5 октября 2004, Новосибирск: ИТ СО РАН. – 2004. – CD. – ISBN-5-89017-027-9. – № 146. – 8с.

9. *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 Sixth World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (ExHFT-6)*, Matsushima, Japan, April 17-21, 2005. – CD-Proceedings (Ed.: Kasagi, Maruyama, Yoshida, Inoue). – Paper N 3-a-5. – 5 p.

Получено 25.11.2005 г.