

УДК 536.24

Особенности теплообмена в отрывном течении за плоским ребром, расположенным под углом к основному потоку, при изменении внешней турбулентности*

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

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Представлены результаты экспериментального изучения обтекания турбулентным потоком плоского ребра при изменении угла ориентации к направлению течения от 50 до 90° для двух уровней турбулентности. Опыты проведены при различных значениях высоты ребра в условиях естественного и высокого уровней турбулентности (13,4 %) внешнего течения. Из экспериментов по визуализации определены картины вихреобразования и направления линий тока. Показаны деформации рециркуляционной области и зоны вторичного вихря, а также усиление эффектов трехмерности в потоке за ребром с уменьшением угла φ и заметная перестройка течения при высокой турбулентности внешнего потока. Проведено сравнение коэффициентов давления в различных продольных сечениях канала за ребром при изменении его высоты и варьировании угла ориентации φ . Проанализировано влияние угла скоса потока, высоты ребра и внешней степени турбулентности на локальные коэффициенты теплоотдачи и интенсификацию теплообмена.

ВВЕДЕНИЕ

Управление процессами тепломассопереноса представляет собой одну из наиболее важных проблем энергетики, связанную с поиском возможностей эффективной интенсификации теплообмена при снижении гидравлических потерь и ориентированную как на создание физических основ процессов тепломассопереноса потоков, так и на улучшение показателей теплоэнергетического оборудования. В частности, исследования конвективных потоков в отрывных течениях на всевозможных преградах играют важную роль в оптимизации тепловых процессов в теплообменниках. Для интенсификации теплообмена в каналах различных энергоустановок широко используются разнообразные препятствия и наиболее технологичные плоские ребра. В отрывном потоке за ребром генерация крупномасштабных вихревых структур в слое смешения между рециркуляционным течением и внешним потоком с порождением высокой турбулентности и нестационарности способствует усилению теплообмена на стенке, что продемонстрировано в работах [1–10].

Ребра, установленные под углом к потоку, достаточно широко используются в различных теплообменниках, особенно компактных. Течение из-за скоса препятствия к набегающему потоку становится трехмерным, и линии тока в рециркуляционной области уже не являются замкнутыми. Трехмерность вызывает дополнительные

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 06-08-00300).

трудности и в расчетах и в экспериментах, т. к. приходится оценивать продольное распределение параметров в каждом поперечном сечении. Численный расчет трехмерных отрывных турбулентных потоков довольно трудоемок, поэтому многими параметрами пренебрегается, особенно предысторией потока. Немногочисленные экспериментальные исследования отрывных течений за выступами, расположенными под углом к потоку, проводились в основном в каналах с оребренными стенками. Еще меньше работ по исследованию характеристик за единичным ребром со скосом к набегающему потоку, в которых исследуется физика отрывного течения в данных условиях. Например, в работах [5, 6] определены средние и пульсационные составляющие скорости и их инвариантность. В этих работах при расположении ребра под углом 65° отмечалась инвариантность касательных напряжений в отрывном пузыре в направлении, перпендикулярном ребру. В [7] найдено автомодельное распределение давления вдоль ребра, ориентированного под острым углом в 20° к потоку. В работах [8–9] проанализировано течение в достаточно узком канале при наличии системы скошенных ребер на его дне и противоположной стенке. Показано, что увеличение теплоотдачи при больших числах Рейнольдса можно повысить примерно в три раза по сравнению с гладким каналом. Параметр ее эффективности значительно возрастает с увеличением разницы температуры между нагретой стенкой и потоком. Работа [10] посвящена обсуждению совместного влияния на массообмен угла ориентации ребер, высоты ребер и расстояния между ними. Показано, что ребра, установленные под углом к потоку, более эффективны при больших расстояниях между ними.

Целью настоящей работы явилось расширение исследований по динамике и теплообмену отрывного потока за плоской преградой, частично изложенных в [13], в широком диапазоне таких геометрических параметров, как угол ориентации препятствия к основному потоку и его высота при варьировании интенсивности турбулентности внешнего течения.

1. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на аэродинамической трубе Института теплофизики СО РАН. Прямоугольный рабочий канал аэродинамической трубы имеет сечение 200 мм на 200 мм и длину 1000 мм. В рабочий канал помещалась модель (рис. 1) длиной 500 мм, шириной 190 мм и толщиной 20 мм, с носиком-обтекателем — длиной 100 мм, имеющим шероховатую поверхность в виде

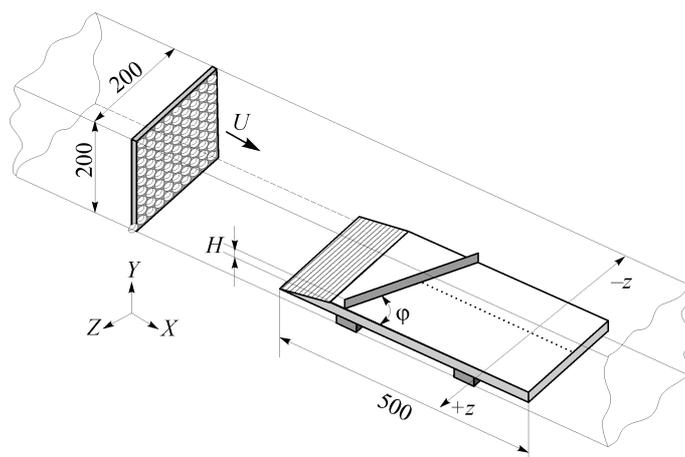


Рис. 1. Схема рабочего участка.

поперечных ступенек высотой 0,1 мм. Для измерения тепловых и динамических характеристик использовались две идентичные по размерам модели толщиной 20 мм, выполненные из текстолита. При установке модель была приподнята на высоту 18 мм так, что на ней развивался новый пограничный слой. Обтекатель обеспечивал турбулентный пограничный слой толщиной порядка 10 мм со степенной зависимостью $1/7$. Нагрев поверхности тепловой модели осуществлялся с помощью электрического ленточного нагревателя из алюминиевой фольги толщиной ~ 20 мкм общей площадью 149×393 мм², удаленного от начала пластины на расстояние ~ 100 мм. Ширина лент нагревателя равнялась 4 мм с расстоянием между ними 1 мм. Непосредственно по фольге пропускался переменный электрический ток при условии $q_{\text{ст}} = \text{const}$. Под лентой нагревателя вдоль центральной линии пластины размещались хромель-копелевые термопары в количестве 39 штук с шагом около 10 мм, посредством которых производилось измерение температуры. Диаметр термопарных проводов равнялся 0,2 мм. Спай термопар и разведенные в разные стороны поперек канала термопарные провода отделялись от нагревателя тонким слоем эпоксидной смолы. Температура стенки изменялась в пределах от 30 до 90 °С. Таким образом, имело место квазиизотермическое обтекание. Утечки тепла за счет теплопроводности модели определялись по перепаду температуры на ней. Для этого две термопары устанавливались на нижней стороне экспериментальной модели. На динамической модели в пяти продольных сечениях по ширине канала имелись продольные отборы давления с шагом 10 мм.

На модель плотно к поверхности крепилось ребро, изготовленное из материала оргстекла толщиной ~ 3 мм с низкой теплопроводностью. При угле $\varphi = 60^\circ$ использовались ребра с высотами $H = 6, 10$ и 20 мм. Для всех остальных углов высота ребра составляла 20 мм. Угол ориентации ребра φ относительно потока варьировался от 50 до 90° с шагом 10° . Фиксированное расстояние от носика до центра ребра равнялось 197 мм, скорость основного потока в большинстве экспериментов — 20 м/с. Соответствующее число Рейнольдса, рассчитанное по высоте препятствия, составляло $1,2 \cdot 10^4, 2,6 \cdot 10^4, 3,9 \cdot 10^4$.

Естественный уровень турбулентности равнялся $Tu_0 = 1,2$ %. Высокий уровень, $Tu_0 = 13,4$ %, достигался с помощью флажкового генератора турбулентности — полиэтиленовые флажки прикреплялись к перфорированной решетке.

Для визуализации отрывного течения поверхности за преградой методом сажемасляной пленки использовалась еще одна модель аналогичных размеров с покрытием из оргстекла толщиной 3 мм. Визуализирующая жидкость состояла из смеси черной офсетной краски и осветительного керосина, которая наносилась на оргстекло. Для получения более четких линий тока консистенция смеси керосина и краски подбиралась опытным путем. Картины, полученные после окончания эксперимента, длившегося ~ 1 мин, после снятия защитной крышки с поверхности, когда краска полностью высыхала, через сканер переводились в электронный вид и в дальнейшем обрабатывались на компьютере.

Для термографической визуализации использовался тепловизор TH 7102 NEC (Japan) со спектральным диапазоном 8–14 мкм. Специальная модель с ленточным нагревателем, аналогом тепловой, в этих экспериментах устанавливалась на вертикальной боковой стенке канала. Поверхность рабочей части модели покрывалась черной краской ПФ, обеспечивающей при измерениях в инфракрасном диапазоне степень черноты 0,92. Противоположная стенка канала для прохождения инфракрасного излучения затягивалась полиэтиленовой пленкой. Для привязки получаемых в ходе эксперимента термографических картин к реальным температурам использовались показания расположенных под нагревателем 20 термопар.

Погрешность измерения температуры равнялась $0,1^{\circ}\text{C}$. Пространственное разрешение кадра составляло 320 на 240 точек. Оцифровка полученного поля температур выполнялась специальной программой.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Подробная визуализация течения за ребром, установленным перпендикулярно потоку, была выполнена в работе [12]. Если течение за поперечным ребром симметрично (рис. 2, *a*), имеется два угловых ярко выраженных вихря и линия присоединения практически параллельна ребру, то при уменьшении угла ориентации плоской преграды течение становится несимметричным (рис. 2, *b-d*). Угловой вихрь при остром угле уменьшается, а у тупого угла сильно размывается и увеличивается в размерах. Это особенно характерно для высокой преграды при минимальном угле $\varphi = 50^{\circ}$ (рис. 2, *c*). При этом особые точки фокус-седло также смещаются в сторону тупого угла. Рециркуляционная область характеризуется изменением направления линий тока по ширине канала, а линией присоединения становится линия растекания. В соответствии с работой [13], чем выше ребро, тем сильнее отклоняется линия растекания от направления преграды, но относительное расстояние x/H до линии растекания становится меньше.

О направлениях линий тока и выравнивании течения в разных сечениях канала можно судить по углам β_0 между линией тока в рассматриваемой точке и основным направлением потока. Отрицательные значения углов β_0 определены при отклонении линий тока влево от направления основного потока. На рис. 3 представлено распределение β_0 для низкой и высокой преград. Для построения β_0 выбирались точки на линиях тока: в поперечных сечениях $z = -50, -25, 0, 25, 50$ мм, в продольном направлении — в двадцати точках через каждые 10 мм. Координата $z = 0$ на рис. 1 соответствует центральному сечению пластины, обозначенному точечной линией. Первые точки в каждом сечении отсчитываются от преграды. Со стороны острого угла (положительные значения z) имеет место быстрое

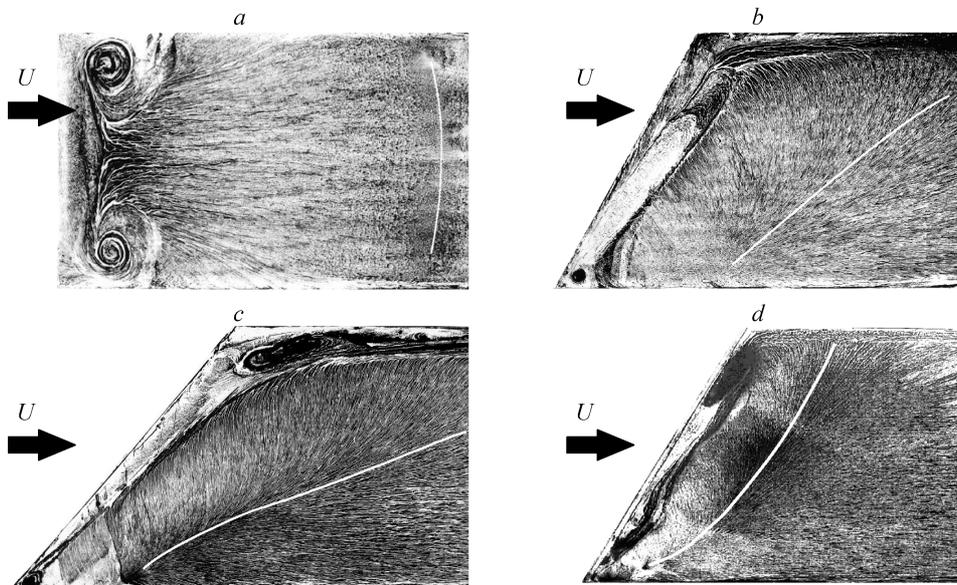


Рис. 2. Картина течения за развернутым к потоку ребром высотой $H = 20$ (*a-c*), 6 (*d*) мм.
 $\varphi = 90^{\circ}$ (*a*), 60° (*b*), 50° (*c*), 60° (*d*) мм.

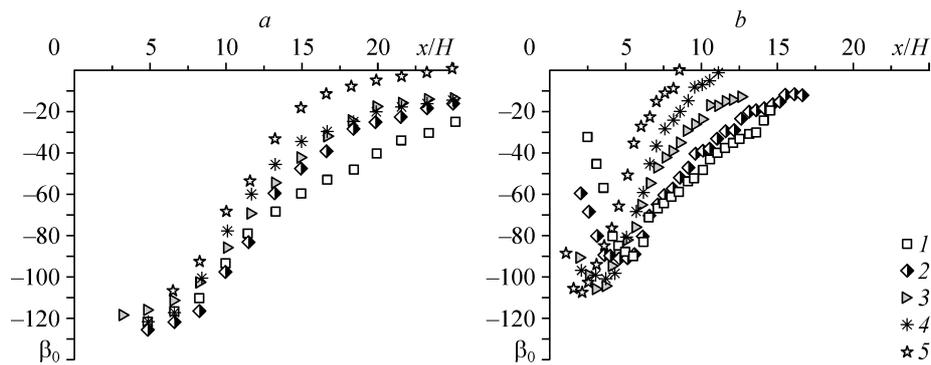


Рис. 3. Углы β_0 между линиями тока и направлением основного потока в разных сечениях по ширине канала.

$H = 6$ (a), 20 (b) мм, $\varphi = 60^\circ$ (a), 50° (b), $z = -50$ (1), -25 (2), 0 (3), 25 (4), 50 (5) мм.

восстановление течения до направления основного потока в противоположность медленному выравниванию течения со стороны тупого угла. Для случая высокого ребра (см. рис. 3, b) хорошо прослеживается зона вторичного вихря, и расслоение по углам β_0 в начале рециркуляционной области более значительное, чем для низкого препятствия. Однако углы β_0 для трех высот препятствий в центральном сечении, $z = 0$, по относительной продольной координате (рис. 4) свидетельствуют о более быстром восстановлении течения по этой координате именно за высокими преградами.

С уменьшением угла ориентации ребра φ по центральной линии имеет место более быстрое восстановление давления [13]. На рис. 5 представлен модифицированный коэффициент давления

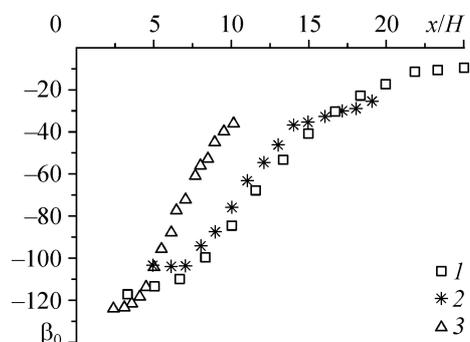
$$C_p^* = \frac{C_p - C_{p\min}}{C_{p\max} - C_{p\min}}$$

x^* — продольная координата, в которой $C_p^* = 0,5$. Интересно отметить, что на

кривой распределения имеется автомодельная область для всех углов скоса, и кривые достаточно хорошо обобщаются. При больших углах скоса потока ($\varphi = 50^\circ$) исключение по автомодельности составляет область, непосредственно примыкающая к ребру, где формируются вторичные вихри. В формуле для C_p^* коэффициент давления $C_p = 2(p_i - p_0)/\rho U^2$. Здесь p_i — давление на стенке, p_0 и U — опорное давление и скорость, измеренные в ядре потока над ребром.

Наиболее сильное изменение давления наблюдается по ширине канала для малых углов φ . Распределение коэффициента давления C_p в пяти продольных сечениях по ширине канала для угла $\varphi = 60^\circ$ в сопоставлении с углом 90° представлено на рис. 6. Если для $\varphi = 90^\circ$ распределение давления во всех сечениях совпадает, то за ребром под углом 60° оно значительно изменяется от одного поперечного сечения к другому. К кривой C_p за прямым ребром близко распределение давления вблизи тупого

Рис. 4. Углы линий тока β_0 в центральном сечении для $\varphi = 60^\circ$ при разных высотах ребра: $H = 20$ (1), 10 (2), 6 (3) мм.



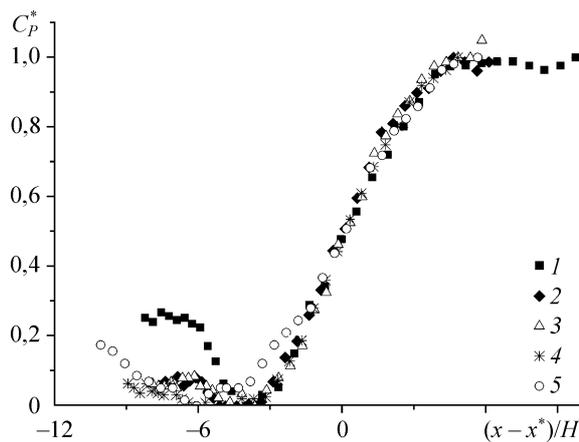


Рис. 5. Модифицированный коэффициент давления в центральном сечении для разных углов.
 $\varphi = 50^\circ$ (1), 60° (2), 70° (3), 80° (4), 90° (5).

угла ($z = -50$ мм). Наиболее быстрое восстановление давления наблюдается возле острого угла при максимальном разрежении непосредственно у ребра. Таким образом, длина, на которой происходит восстановление давления,

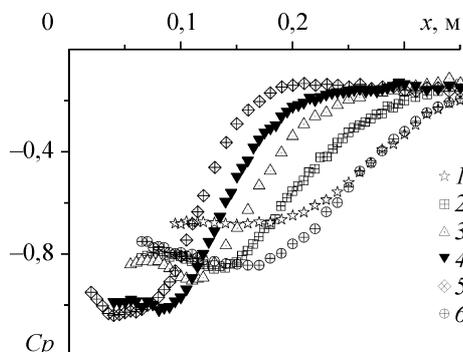
не превышает длину восстановления C_p для прямого угла.

На полученных с помощью тепловизора распределениях температурных полей и соответственно коэффициентов теплоотдачи (рис. 7), как и на динамических картинах течения (см. рис. 2), отчетливо прослеживается область присоединения оторвавшегося сдвигового слоя — в данном случае по максимуму теплоотдачи. На рис. 7 представлены осредненные по времени характерные термограммы распределения локальных коэффициентов теплоотдачи α_i по поверхности за ребром высотой 20 мм, ориентированным под углом $\varphi = 70^\circ$ к основному потоку при двух уровнях турбулентности. В обоих случаях наблюдается более быстрое нарастание α_i со стороны острого угла и более медленное — со стороны тупого. Высокая турбулентность за развернутым к потоку ребром, как и за перпендикулярной преградой, уменьшает зону вторичного вихря (темная область на рисунках непосредственно за ребром) и расстояние до максимума теплоотдачи, что способствует интенсификации теплоотдачи в отрывной области.

В работе также измерялись температурные распределения вдоль центральной линии канала с помощью термопар. По этим измерениям были рассчитаны локальные коэффициенты теплоотдачи

$$\alpha_i = (q_{ст} - q_{потерь}) / (T_{стi} - T_0).$$

На рис. 8 приведены распределения коэффициентов теплоотдачи в турбулизированном потоке в центральном сечении канала в зависимости от угла ориентации φ .



Высота ребра равнялась 20 мм. Как и при естественной турбулентности [13], четко прослеживается интенсификация теплоотдачи при уменьшении

Рис. 6. Распределение коэффициента давления в пяти продольных сечениях по ширине канала за ребром высотой $H = 20$ мм с углом $\varphi = 60^\circ$ в сопоставлении с углом $\varphi = 90^\circ$.
 $\varphi = 60^\circ$ (1–5), 90° при $z = -50$ (1), 0 (2), 25 (3), 50 (4), 75 (5) мм; $\varphi = 90^\circ$ (6).

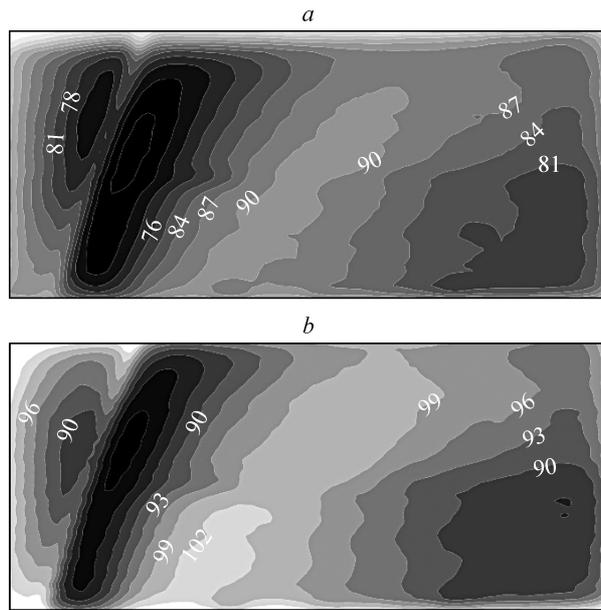


Рис. 7. Теплограммы коэффициентов теплоотдачи за ребром, развернутым под углом $\varphi = 70^\circ$ к потоку при низком и высоком уровнях турбулентности (направление течения слева направо): $Tu_0 \sim 1,2$ (a), $\sim 13,4$ (b) %.

угла φ . Локальный максимум теплоотдачи для угла $\varphi = 50^\circ$ примерно на 60 % больше, чем для угла $\varphi = 90^\circ$.

Интенсификация теплоотдачи внешней турбулентностью хорошо прослеживается на рис. 9. На этом графике изображен относительный коэффициент теплоотдачи в центральном сечении канала вниз по течению за ребром при высоком уровне турбулентности, нормированный на свое значение при низком уровне турбулентности при том же угле разворота ребра. Данные по α_0 при низком уровне турбулентности взяты из работы [13]. Наибольшее интегральное по длине увеличение теплоотдачи имеет место при угле $\varphi = 70^\circ$. По нашим оценкам, это справедливо

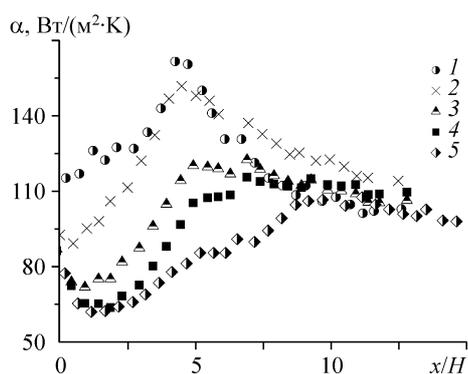


Рис. 8. Коэффициент теплоотдачи за ребром с разными углами φ при высокой степени турбулентности ($Tu_0 \sim 13,4$ %, $H = 20$ мм): $\varphi = 50^\circ$ (1), 60° (2), 70° (3), 80° (4), 90° (5).

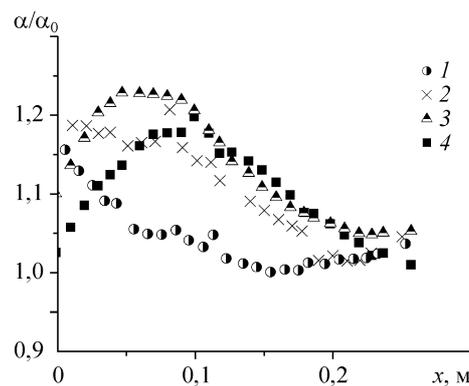


Рис. 9. Относительный коэффициент теплоотдачи в условиях высокой внешней турбулентности для различных углов ориентации ребра ($H = 20$ мм): $\varphi = 50^\circ$ (1), 60° (2), 70° (3), 80° (4).

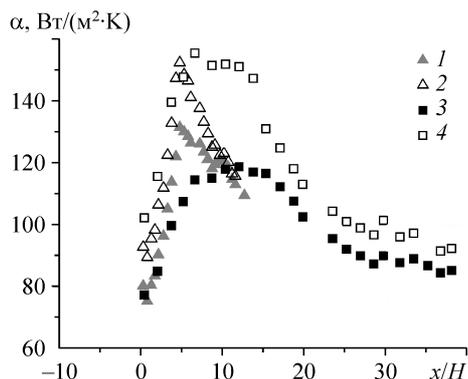


Рис. 10. Теплоотдача за ребром с углом $\varphi = 60^\circ$ для разных высот при низком и высоком уровнях: $H = 20$ (1), 20 (2), 6 (3, 4) мм, $Tu_0 \sim 1,2$ (1, 3), 13,4 (2, 4) %.

и для осредненного по всей области рециркуляции коэффициента теплоотдачи. Увеличение максимального коэффициента теплоотдачи при $\varphi = 70^\circ$ достигает 23 %.

Воздействие высокой турбулентности на поведение теплоотдачи для разных высот ребра исследовалось на угле $\varphi = 60^\circ$ (рис. 10). Найдено, что влияние турбулизации на максимум теплоотдачи довольно слабо зависит от высоты ребра. Если за ребром высотой $H = 20$ мм максимальный коэффициент теплоотдачи при высокой турбулентности увеличился в 1,2 раза, то при малой высоте преграды, $H = 6$ мм, возрастает не более чем в 1,3 раза. При этом, как видно на рис. 10 по площадям под кривыми α_i , для ребра малой высоты влияние степени турбулентности более ощутимо на средний коэффициент теплоотдачи.

В целом, рис. 8–10 демонстрируют, что разворот преграды на угол $\varphi = 60$ или 70° к потоку при увеличении уровня турбулентности в нем до 13,4 % обеспечивает суммарную интенсификацию среднего по областям рециркуляции и релаксации коэффициента теплоотдачи в 1,5 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено изучение влияния угла ориентации ребра к основному потоку ($\varphi = 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$) на картину вихреобразования, поля давления и теплообмен при различных в зависимости от высоты препятствия числах Рейнольдса.

Показано, что с уменьшением угла разворота ребра к потоку расстояния до линий присоединения и максимума теплоотдачи уменьшаются, причем наиболее сильно со стороны острого угла. То же самое происходит при увеличении степени турбулентности внешнего потока, но в этом случае в большей степени за счет сокращения зоны вторичного вихря. Суммарная интенсификация среднего коэффициента теплоотдачи для обоих факторов составляет $\sim 50\%$.

Сокращение отрывной зоны способствует интенсификации теплоотдачи.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

C_p — коэффициент давления, $C_p = 2(p_i - p_0)/\rho U^2$,
 H — высота ребра, мм,
 p — давление, Па,
 q — тепловой поток, Вт/м²,
 Re — число Рейнольдса, $Re_H = U \cdot H/\nu$,
 U — скорость основного потока, м/с,
 Tu_0 — степень турбулентности основного потока,
 $\sqrt{u'^2}/U$, u' — продольная пульсация скорости,

u' — продольная пульсация скорости, м/с,
 x — продольная координата, м, мм,
 α — коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К,
 β_0 — угол линий тока, градус,
 φ — угол ориентации ребра относительно основного потока, градус,
 ν — кинематический коэффициент вязкости, м²/с,
 ρ — плотность, кг/м³.

ИНДЕКСЫ

0 — условия в основном потоке,
 i — локальные значения,

ст — условия на стенке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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. — Vol. 2. — P. 291–308.
2. **Gao X., Sunden B.** Heat transfer and pressure drop measurements in rib-roughened rectangular channels // J. Exp. Thermal and Fluid Science. — 2001. — Vol. 24. — P. 25–34.
3. **Han J.C., Park J.S.** Developing heat transfer in rectangular channels with rib turbulators // Inter. J. Heat Mass Transfer. — 1988. — Vol. 31, No. 1. — P. 183–195.
4. **Hancock P.E.** Measurements of mean and fluctuating wall shear stress beneath spanwise-invariant separation bubbles // Exp. in Fluids. — 1999. — Vol. 27. — P. 53–59.
5. **Hancock P. E., McCluskey F. M.** Spanwise-invariant three-dimensional separated flow // J. Exp. Thermal and Fluid Science. — 1999. — Vol. 14. — P. 25–34.
6. **Kiml 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. — Vol. 123. — P. 675–682.
7. **Mahmood G., Ligrani P.M., Chen K.** Variable property and temperature ratio effects on Nusselt number in a rectangular channel with 45 deg angled rib turbulators // J. Heat Transfer. — 2003. — Vol. 125. — P. 769–778.
8. **Mahmood G., Ligrani P.M., 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. — P. 1–12.
9. **Okita Yu., Ayukawa K., Nakamura K., Ichimiya M., Nakase Yo.** The flow over an inclined fence in a turbulent boundary layer // Trans. Japan. Soc. Mech. Engng. B. — 2001. — Vol. 67, No. 655. — P. 645–650.
10. **Olsson C.-O., Sunden B.** Experimental study of flow and heat transfer in rib-roughened rectangular channels // J. Exp. Thermal and Fluid Science. — 1998. — Vol. 16, No. 4. — P. 349–365.
11. **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, CD-Proceed. — 2005. — Paper No. 3-a-5. — P. 1–5.
12. **Terekhov V.I., Yarygina N.I., Zhdanov R.F.** Heat transfer in turbulent separated flows in presence of high free stream turbulence // Inter. J. Heat Mass Transfer. — 2003. — Vol. 46. — P. 4535–4551.
13. **Терехов В.И., Ярыгина Н.И., Смутьский Я.И.** Тепловые и динамические характеристики отрывного течения за плоским ребром с различной ориентацией к потоку // ПМТФ. — 2007. — Т. 48, № 1. — С. 103–109.

Статья поступила в редакцию 12 ноября 2007 г.