

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛООБМЕНА В ТУРБУЛЕНТНЫХ ОТРЫВНЫХ ПОТОКАХ

В. И. Терехов, Н.И. Ярыгина

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия, Terekhov@itp.nsc.ru*

Резюме

В докладе рассмотрены экспериментальные работы по проблемам теплообмена в отрывных потоках при турбулентных режимах течения. Акцент делается на изменении тепловых характеристик в отрывной области, когда на нее воздействуют высокие пульсации скорости при повышенной турбулентности внешнего потока или вихревая пелена за мини-турбулизатором, расположенным перед отрывом. Визуализация течения, измерение полей давления, температуры и скорости совместно с пульсационными величинами обеспечили более глубокое понимание природы сложных взаимосвязанных процессов переноса в турбулентных отрывных потоках. Было проведено сопоставление и показано преимущество каждого из способов. Оба способа заметно изменяют структуру и теплоперенос в отрывном потоке.

Введение

Одним из хорошо зарекомендовавших себя методов повышения эффективности теплообменного и теплотехнического оборудования является интенсификация теплообмена в каналах. В настоящее время наиболее известны и широко используются в технике такие методы интенсификации теплообмена, как переменный градиент давления, шероховатость поверхности, закрутка потока, внешняя турбулентность и наложенные внешние колебания потока. Но наиболее просты и тем привлекательны поверхностные интенсификаторы теплообмена в форме ребер, выступов и углублений, формирующие различного типа вихревые структуры в отрывном течении.

В ряде выполненных в последнее время исследований обсуждается вопрос управления не только отрывными течениями, но и теплообменом в отрывной области. Контроль над неустойчивыми отрывными течениями и процессами теплопереноса в них является важной проблемой в научных исследованиях и на практике. Одним из инструментов воздействия на отрывное течение является внешняя турбулентность, создаваемая различными решетками. Другой сходный способ - использование минитурбулизаторов с геометрическими размерами, значительно меньшими основного препятствия, например, в виде резкого расширения канала или при наличии какой-либо формы каверны.

В докладе проводится анализ экспериментальных работ по проблемам теплообмена в отрывных потоках при турбулентных режимах течения, обсуждаемых в последнее время в мировой научной литературе, а также дается ретроспектива последних работ авторов в этом направлении. Одним из

путей создания экономичных теплообменных аппаратов и систем охлаждения является использование пристенной интенсификации теплообмена, где эффективно себя проявили интенсификаторы в виде выступов или выемок [1,2]. Использование интенсификаторов практически всегда сопровождается отрывом потока. Турбулентный теплообмен в различных типах отрывных потоков является привлекательным и важным явлением. Имеется большое количество работ по отрывным течениям за уступами, ребрами и кавернами, при этом данные по теплообмену составляют менее 10% от всего количества публикаций.

В последнее время усилия исследователей направлены на поиски новых путей усиления теплоотдачи в отрывных течениях [3]. Для этого используются такие приемы, как оптимизация формы препятствия, вызывающего отрыв [4,5], ориентация препятствий (ребер или вытянутых лунок) в канале [5-8], применение пассивных и активных способов управления теплообменом при отрыве. Сюда можно отнести внешнюю турбулентность [9-12], наложенные пульсации давления [13] и использование разнообразных вихревых генераторов перед зоной отрыва – минипреград [14-17], вдува струй [18, 19], колеблющихся интерцепторов [20] и др. Проанализирована эффективность большинства методов.

По-прежнему наиболее предпочтительными экспериментальными методами исследования осредненных скоростей и их пульсаций, пульсационных спектров в отрывных потоках являются лазерно-доплеровская анемометрия и термоанемометрия. Также можно отметить датчик комбинированных измерений мгновенных локальных величин продольной компоненты вектора поверхностного трения, пульсаций теплового потока в стенку и давления на стенке [13]. В настоящее время все большую популярность приобретает метод PIV, позволяющий измерить мгновенное векторное поле скорости и получить информацию о вихревой структуре потока и масштабах крупных вихрей. Для визуализации отрывных потоков, особенно с наложенными пульсациями, большую роль играют всевозможные оптические методы. Для измерения мгновенного поля температур широко используются термографические методы.

В вопросах определения оптимальной интенсификации теплообмена отмечены короткие ребра, ориентированные под углом друг к другу или клинышки [5,16]. При использовании дельтаобразных клинышек потери на сопротивление менее значительны. Согласно [15] длина отрывной области за обратным уступом служит косвенной мерой перемешивания. Все внешние воздействия, такие как внешняя турбулентность, наложенные пульсации или установка вверх по потоку выемки, стержня, машущего крыла, отсоса на вертикальной стенке и т.д. можно отнести к методам управления отрывным течением. В большинстве эти методы относятся к двумерным, поскольку генерируют крупномасштабные вихри вдоль границы сдвигового слоя. При этом длина отрывной области сокращается, но при повышении положительного градиента давления может увеличиваться. При трехмерном воздействии, как сегментная вертикальная стенка уступа или вдув (отсос) через прерывистую щель на кромке уступа, в отрывной сдвиговый слой вносятся поперечные возмущения,

интенсифицирующие перемешивание. Во многих исследованиях показано, что трехмерное воздействие более эффективно, чем двумерное. В [15] продемонстрирована эффективность использования на кромке уступа ряда интерцепторов высотой, меньшей в три-пять раз высоты уступа, и со значительными расстояниями между ними.

Обсуждение и анализ перспективных методов управления тепловыми процессами в отрывных потоках

В докладе с одной стороны обсуждаются работы авторов по влиянию на тепловые и динамические характеристики отрывных потоков внешней турбулентности и пассивных вихревых генераторов в виде маломасштабных преград, установленных перед отрывной областью. С другой стороны речь идет о дальнейшей перспективе интенсификации теплоотдачи в отрывных потоках.

Подробно описание экспериментов с повышенной внешней турбулентностью представлено в работах [11, 21-26]. Эксперименты с единичной преградой проводились в канале аэродинамической трубы Института теплофизики СО РАН. Сечение рабочего канала аэродинамической трубы составляет 200 на 200 мм, длина 1000 мм. Единичной преградой являлся обращенный назад уступ или плоское ребро различной высоты, как поперечное, так и развернутое под углом к потоку. Рассматривалась также система ребер от двух до пяти. Более детально остановимся на поперечной каверне, так как впоследствии была проведена серия опытов с малым вихревым генератором перед ней. Поперечная каверна глубиной $H = 60$ мм, шириной по дну полости $L = 60$ мм и длиной поперек потока $W = 180$ мм также размещалась на нижней стенке канала. Всего было изготовлено 6 моделей – для сажемасляной и термографической визуализации, для измерения полей давления и тепловых характеристик. Эксперименты выполнены при углах наклона боковых стенок $\varphi = 30, 45, 60, 70, 80, 90^\circ$. При изменении угла наклона боковых стенок высота каверны H и длина дна по потоку L оставались постоянными. Измерения проведены в диапазоне скоростей набегающего потока $U = 5 \div 35$ м/с, которым соответствовали значения числа Рейнольдса $Re_H = HU/\nu = 2 \cdot 10^4 \div 1,4 \cdot 10^5$. При всех скоростях пограничный слой перед каверной был турбулентным.

Искусственная турбулизация потока осуществлялась пассивными источниками повышенной турбулентности типа «перфорированная пластина» и флажковый генератор. Турбулизатор типа «перфорированная пластина» имел 81 отверстие диаметром 20 мм со степенью перфорации ~64 % и устанавливался в сопле перед рабочим участком на расстоянии 330 мм от места расположения преграды. Генератор турбулентности флажкового типа представляет собой описанную выше перфорированную пластину с флажками-лентами длиной 10 мм в узлах решетки. Степень турбулентности $Tu_0 = \sqrt{u'^2} / U_0$ измерялась с помощью термоанемометра DISA-55M. Степень турбулентности набегающего потока в канале в ядре потока в плоскости установки преграды (без модели) для перфорированного турбулизатора составила 5 %, а для флажкового генератора – $Tu_0 = 13-15$ %. Естественный уровень турбулентности (без турбулизаторов) был равен 1,2 %.

При исследовании распределения статического давления в каверне модель была снабжена 80 приемниками статического давления, расположенными на передней и задней боковых стенках и дне каверны в 6 сечениях – по два на каждой стенке.

С помощью ленточного нагревателя из алюминиевой фольги толщиной 35 мкм с шириной дорожек 5 мм в режиме постоянного теплового потока осуществлялся нагрев боковых стенок и дна. Поверхность траншеи были препарирована 158 хромель-копелевыми термопарами в трех продольных сечениях на дне, пяти продольных сечениях на боковых стенках и четырех сечениях поперек потока (по одному на боковых стенках и в двух сечениях на дне каверны). Для оценки утечек тепла через пластину с обратной стороны каждой нагреваемой стенки было заделано по четыре термопары. В термографических экспериментах каверна с нагревателем помещалась на боковую стенку заподлицо со стенкой канала. Каверна прогревалась в течение одного часа при необходимом скоростном режиме, после чего температура стенки измерялась тепловизором THERMO TRACER TH7102 IR Imager (Япония) со спектральным диапазоном 8 - 14 мкм. Оцифровка полученного поля температур производилась минимум по двум термопарам, и построение термограмм выполнялись с использованием специальных компьютерных программ.

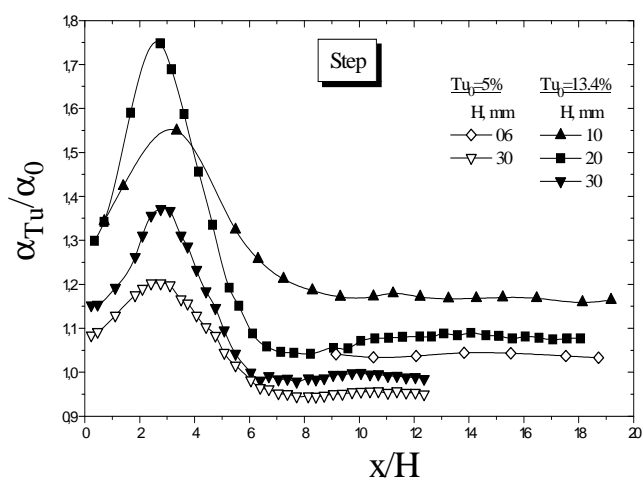


Рис. 1. Влияние внешней турбулентности на теплоотдачу в отрывном течении за уступом.

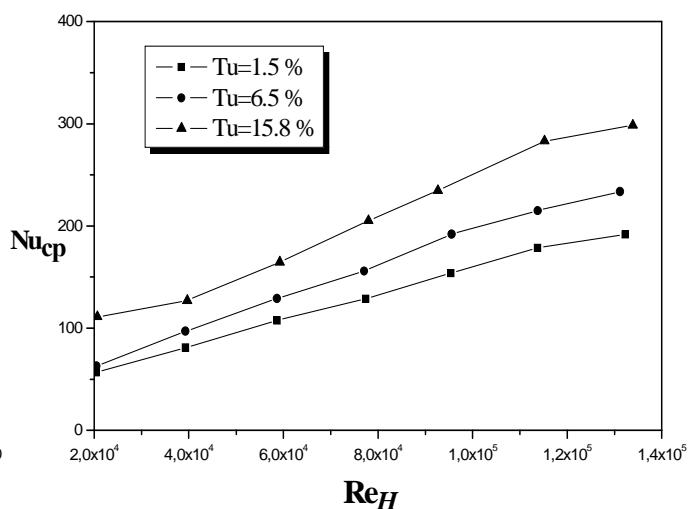


Рис. 2. Зависимость среднего числа Нуссельта от числа Рейнольдса при разной степени турбулентности набегающего потока и угле наклона боковых стенок 60°.

Остановимся на самых существенных результатах для разных типов преград. В экспериментальных работах авторов [11, 21-26] было продемонстрировано, что повышенная внешняя турбулентность, создаваемая перфорированной решеткой ($Tu_0 = 5 - 6\%$) и особенно флажковым генератором турбулентности ($Tu_0 \sim 13-15\%$), оказывает существенное влияние на вихреобразование и теплообмен в отрывных областях за различными преградами. Турбулентность воздействует в основном на крупномасштабное движение в слое смешения, вызывая увеличение

пульсаций скорости, и через него на течение, как в основном, так и во вторичном вихревом течении. При этом внешняя турбулентность уменьшает масштаб вихревых структур, длину отрывной области и длину зоны вторичного вихря за такими преградами, как уступ и ребро, а также ослабляет влияние торцевых стенок на рециркуляционную область, но при этом интенсифицирует теплоотдачу в зоне отрыва и приводит к росту по абсолютному значению давления.

Определено значительное увеличение коэффициента теплоотдачи до 70% в точке присоединения имеет место за обращенным назад уступом (рис.1). Интегрально наибольшее влияние наблюдается за уступами малой высоты. За ребром той же высоты, что и за уступом, влияние степени турбулентности входного потока на теплоотдачу несколько ослабевает и не превышает 30%, но наблюдается зависимость этого влияния от угла ориентации ребра к потоку. Наиболее сильное воздействие Tu_0 приходится на случаи, когда угол разворота ребра к потоку составлял 70° или 80° . Увеличение среднего по всей нагретой поверхности вытянутой полости значения теплоотдачи в высоко турбулизированном потоке в прямоугольной камере и при угле наклона боковых стенок $80^\circ - 70^\circ$ достигает 70% (рис.2). И это больше, чем за уступом, если провести осреднение коэффициента теплоотдачи по поверхности рециркуляционной области.

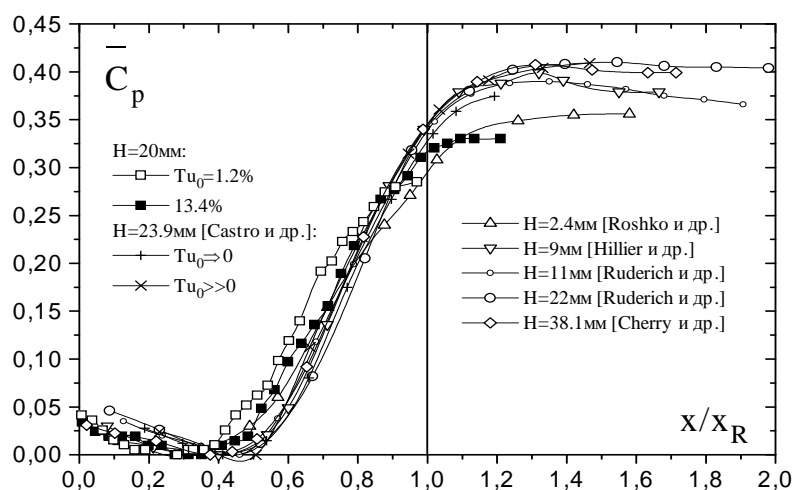


Рис. 3. Приведенный коэффициент давления за ребром при разных уровнях турбулентности.

Приведенные коэффициенты давления обладают принципиальным отличием механизмов вихреобразования за ребром и уступом, проявляющимся в весьма сильной чувствительности последнего к предыстории потока. Отрыв перед ребром является дополнительным мощным источником турбулентных пульсаций, которые гасят все воздействия извне (рис.3).

В работах [11, 21, 25] было показано, что интенсификацией тепло - и массообмена в отрывных течениях за единичным ребром и в системе ребер можно эффективно управлять как изменением ориентации набегающего потока, так и уровнем турбулентности в основном течении. Наложение внешней турбулентности стабилизирует течение в начальных межреберных ячейках, неустойчивость

которого в низкотурбулентном потоке связана с образованием встречного течения к основному потоку из третьей ячейки во вторую (рис.4).

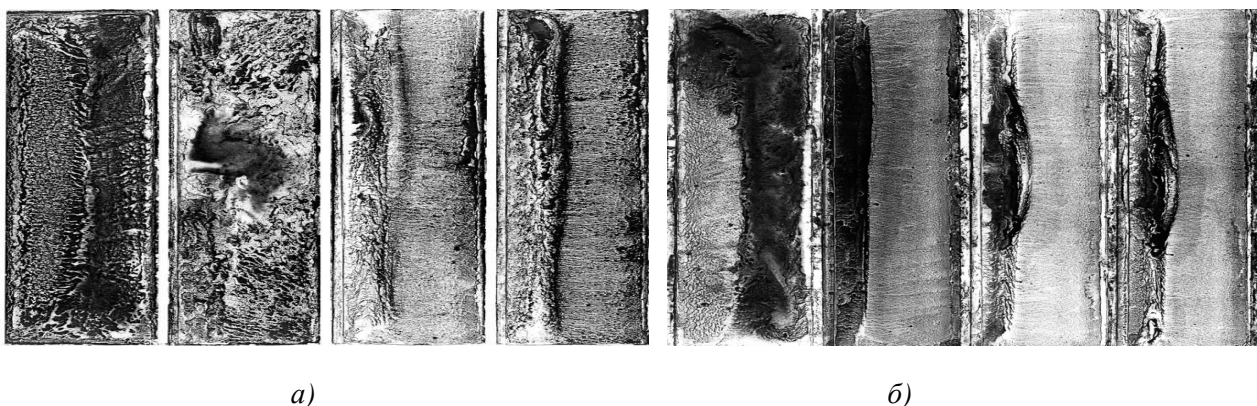


Рис. 4. Картина течения у дна межреберных ячеек при обтекании системы из пяти ребер высотой 60 мм. а) – $Tu_0 = 1,5 \%$; б) - $Tu_0 = 15 \%$.

Течение направлено слева направо.

Увеличение теплоотдачи в этом случае при турбулентности $Tu \sim 13-15\%$ достигает 30%. При ориентации системы ребер к потоку под углом 60° коэффициент теплоотдачи увеличивается дополнительно еще на 10%. Наибольший прирост теплоотдачи (порядка $\sim 40\%$) при высоком уровне турбулентности установлен в прямоугольной поперечной каверне [22, 24].

Как показано в работе [27], высокая интенсификация теплоотдачи в областях турбулентного отрыва реализуется в пульсирующих потоках.

Остановимся на результатах экспериментального исследования простого способа управления динамическими, и тепловыми характеристиками отрывного течения при использовании перед уступом и каверной дополнительных турбулизирующих элементов в виде миниребер, существенно меньших геометрических масштабов основного препятствия. Исследован характер влияния масштабов основной преграды и вихревого генератора, а также местоположения последнего по отношению к преграде, при котором имеет место максимальная интенсификация теплоотдачи.

В качестве вихревого генератора перед поперечной траншеей использовалось тонкое поперечное ребро высотой от 2,5 до 10 мм, которое помещалось перед каверной на расстоянии от 0 до 50 мм. Высота ребра не превышала $1/3 \delta$ – толщины пограничного слоя и $1/6 H$ – глубины каверны.

Методом термографии было определено температурное поле в каверне, указывающее на перестройку течения при изменении высоты вихревого генератора и расстояния до передней кромки. Обе величины заметно влияют на распределение температур по поверхности. На рис. 5 для иллюстрации показано, что при удалении минипреграды вверх по потоку поле температур соответствует все более мелкомасштабному течению. Это свидетельствует, что мелкомасштабный сдвиговый слой за малой преградой начинает попадать в отрывную область в каверне. Влияние высоты по данным [26] еще более заметное. В зависимости от высоты вихревого генератора в зоне

вторичного вихря и у задней стенки могут формироваться вихревые структуры с одной или двумя ячейками. Две ячейки у задней стенки соответствуют случаю попадания на нее линии присоединения от миниребра.

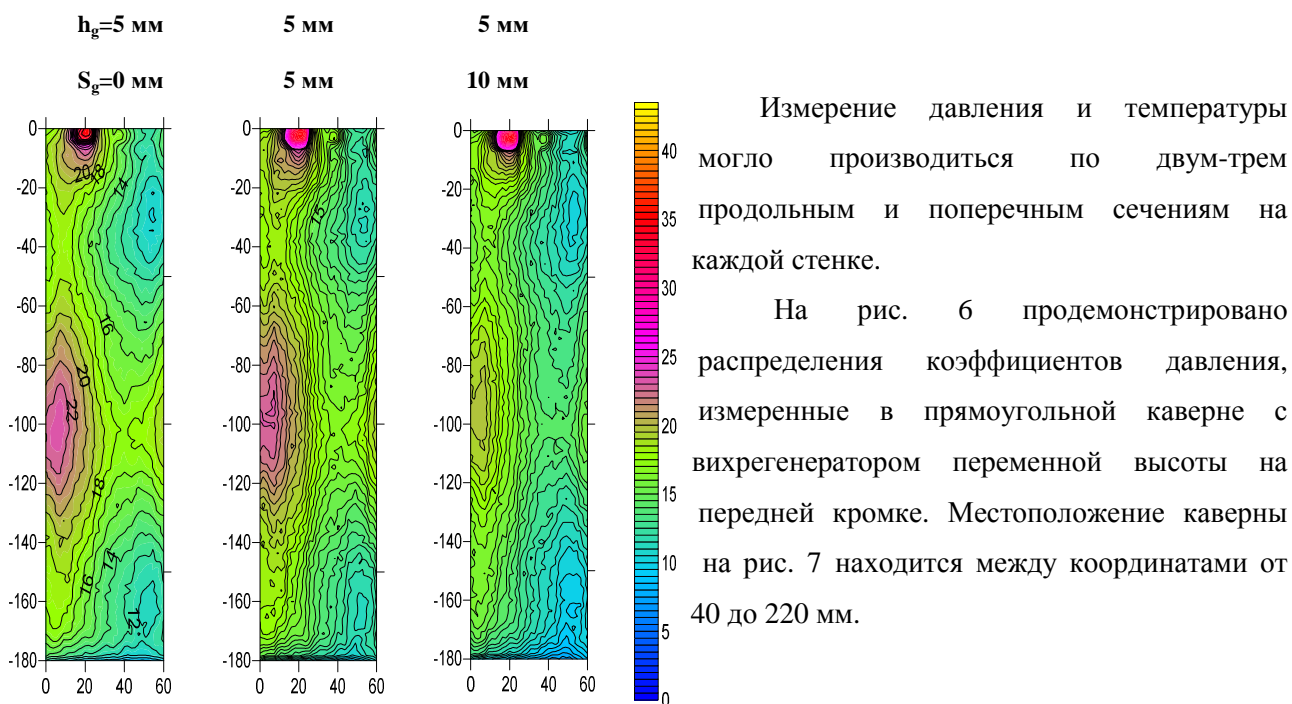


Рис. 5. Термограмма дна прямоугольной камеры за ребром высотой 5 мм на различных его расстояниях до камеры.

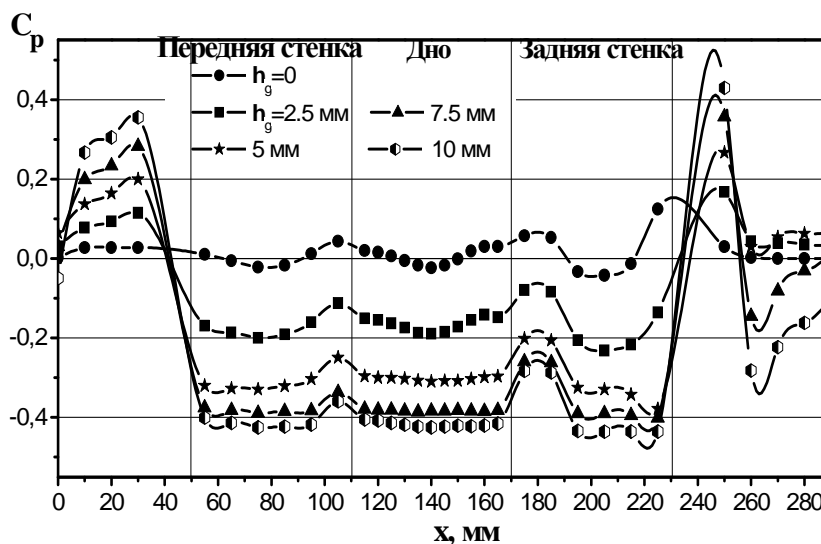


Рис. 6. Распределение коэффициента давления вдоль прямоугольной поперечной камеры при наличии минитурбулизатора на передней кромке.

Здесь же приведены результаты измерения давления на расстоянии 40 мм до каверны и 50 мм за каверной. Результаты для четырех значений высоты сопоставлены со случаем отсутствия минипреграды. Как видно из графика, чем выше преграда, тем сильнее уменьшается коэффициент давления в каверне и возрастает в непосредственной близости перед каверной и за ней. Однако темп изменения замедляется и при $h_g = 7,5$ мм и 10 мм распределения коэффициентов давления близки между собой. При удалении миниребра высотой 5 мм вверх по потоку [26] наименьшее значение C_p отмечается на расстоянии 10 мм от передней кромки. Дальнейшее увеличение этого расстояния не приводит к заметным изменениям в распределении коэффициента давления.

Минимуму коэффициента давления в каверне соответствует максимум теплоотдачи. На рис. 7 приведен относительный средний по всей поверхности полости коэффициент теплоотдачи, нормированный на его среднее значение в прямоугольной полости без минитурбулизатора для трех углов φ . Рис. 7а демонстрирует зависимость числа Нуссельта от местоположения ребра до каверны, а рис. 7б – от высоты ребра. Коэффициенты теплоотдачи в каверне при нагреве боковых стенок и дна

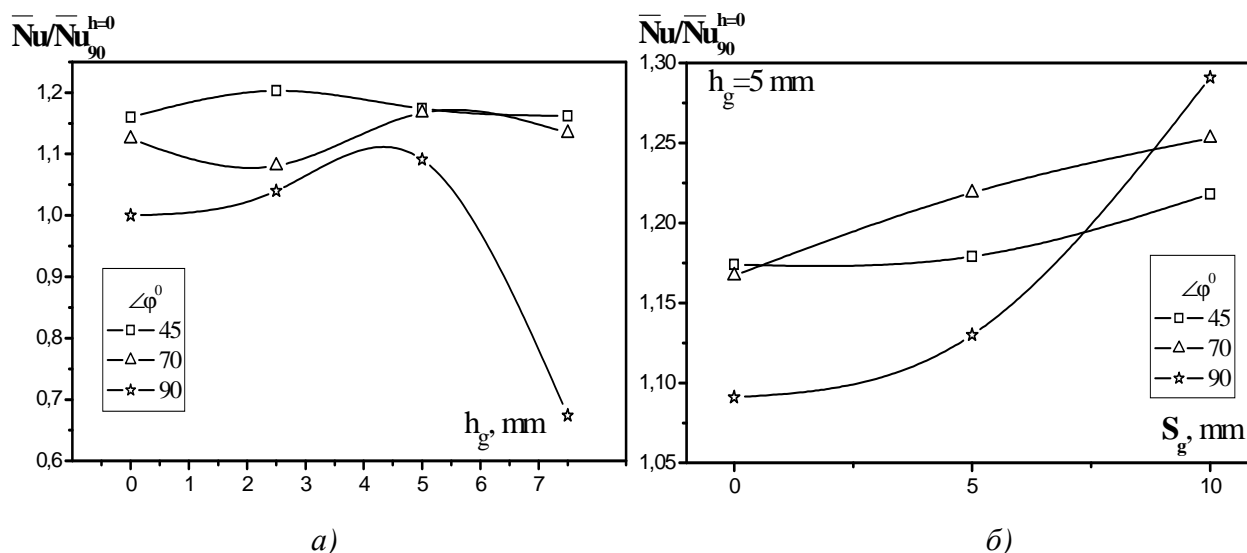


Рис. 7. Относительное число Нуссельта в каверне с разными углами φ при наличии на кромке минитурбулизатора в зависимости от его высоты (а) и в зависимости от его местоположения до каверны (б).

и за уступом были рассчитаны как по тепловизионным, так и по термопарным измерениям. Термопары были заделаны по направлению потока вдоль центрального сечения теплоотдающей поверхности. Изменение высоты ребра от 2,5 мм до 7,5 мм влияет на коэффициент очень слабо. Только для прямоугольной каверны ребро высотой 7.5 мм на передней кромке вызвало значительное (на 30%) понижение теплоотдачи. Перемещение ребра от ступеньки на расстояние 5 мм и 10 мм наоборот вызвало повышение теплоотдачи до 20%. Это справедливо и для прямоугольной каверны, и для каверны с углом наклона боковых стенок 70 градусов.

Данные по измерению методом PIV распределений скорости и ее продольной пульсации выполнено в плоском канале из оргстекла с резким расширением [28]. Высота канала до расширения

равнялась 21 мм, после расширения - 30 мм, высота минипреграды составляла 3мм, что равнялось 1/3 от высоты ступеньки. Расстояние между минипреградой и уступом S было равно 40 мм.

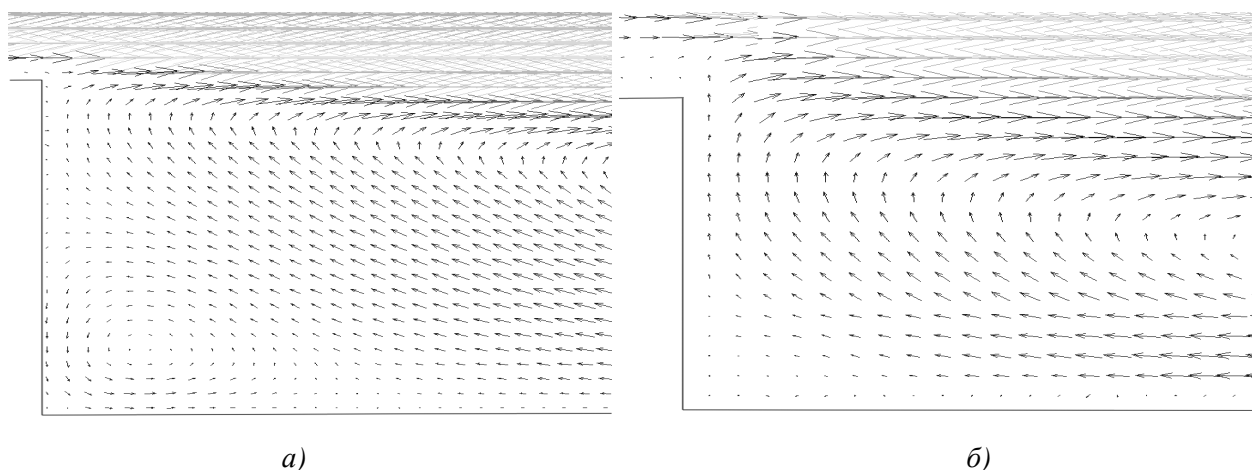


Рис. 8. Поле отрывного течения за уступом.

а) при отсутствии преграды, б) с установленной преградой перед отрывом.

На рис. 8. демонстрируется поле векторов скорости в центральном сечении канала. Отметим два важных отличия в структуре отрывных потоков с минипреградой (рис. 8б) и без нее (рис. 8а). Для отрывного течения с дополнительным возмущением характерным является расширение слоя смешения и приближение его к стенке. Его границей на рис. 8 можно условно считать координату, где продольная скорость меняет знак на противоположный. Сравнивая рис. 8а и 8б видно, что размеры отрывного пузыря при наличии возмущений (рис. 8б) заметно сокращаются по сравнению с течением без минитурбулизатора (рис.8а). Такое поведение характеристик слоя смешения наблюдалось в экспериментах [13, 27] при введении искусственных периодических возмущений в поток, а также при турбулизации основного течения [11].

Второй важной особенностью отрыва при наложенном пассивном возмущении является разрушение вторичного углового вихря у основания уступа. Если развитие отрыва происходит без дополнительного вихревого возмущения, то угловой вихрь четко просматривается (рис. 8б), хотя интенсивность его невелика.

Проведено детальное сопоставление данных по профилям скорости и ее пульсациям за обратным уступом в прямоугольном канале, полученные PIV-методом, с результатами численных расчетов, выполненных Т.В. Богатко с помощью программы «Fluent 6.2» и использованием различных моделей турбулентности. Наилучшее совпадение расчета с экспериментом получено по распределениям средней скорости (рис. 9а). Расчеты по турбулентным пульсациям верно характеризуют общую тенденцию вырождения профилей пульсаций, но дает более резкий перегиб на верхней границе слоя смешения.

Интересных результатов по интенсификации теплообмена в отрывной области можно ожидать при использовании от вихревых генераторов, порождающих трехмерные возмущения, типа табов [15]

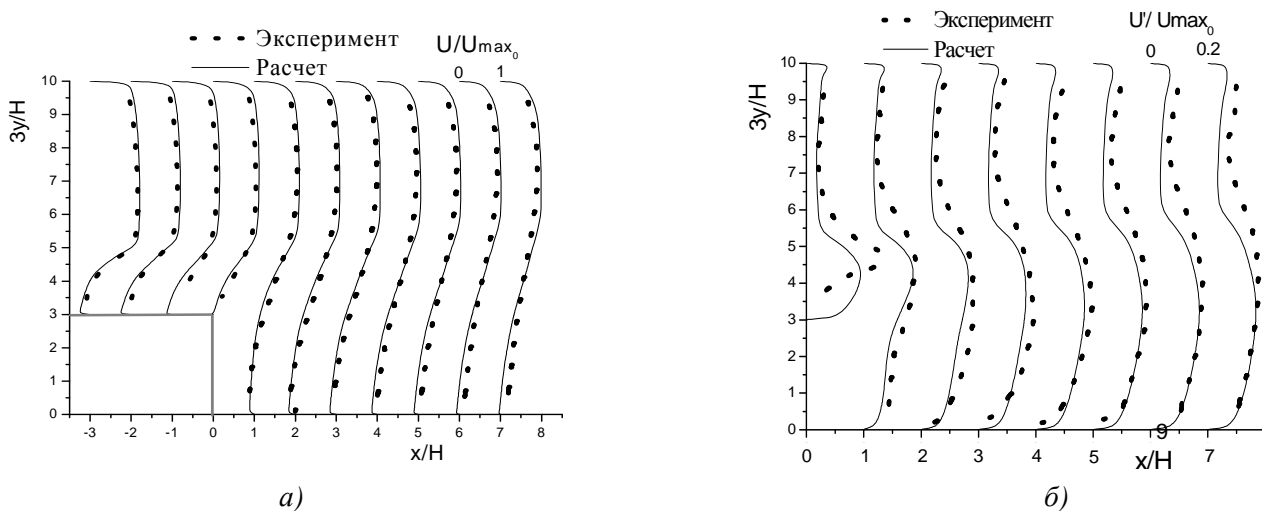


Рис. 9. Сравнение расчета профиля скорости (а) и пульсации продольной скорости в отрывной области за уступом с экспериментальными данными.

или отсоединенных миниребер, установленных на некотором расстоянии от пластины [19, 29].

Заключение

Экспериментальными исследованиями отрывных потоков при турбулентных режимах течения показана возможность воздействия на тепловые характеристики в отрывной области высоких пульсаций скорости при повышенной турбулентности внешнего потока или при использовании перед отрывом минитурбулизатора - вихревого генератора. Внесение дополнительных вихревых возмущений в рециркуляционную зону приводит к заметным изменениям вихреобразования, распределений коэффициентов давления и теплоотдачи. Внешняя же турбулентность в целом стабилизирует отрывное течение, что наглядно можно проследить на картине обтекания системы ребер. При естественной турбулентности во второй ячейке можно отметить крайне неустойчивое вихреобразование, связанное с образованием встречного течения к основному потоку из третьей ячейки во вторую. Под влиянием внешней турбулентности течение в этой ячейке стабилизируется. Используя минитурбулизаторы, можно добиться тех же эффектов, что и при увеличении степени турбулентности набегающего потока, особенно в воздействии на уровень интенсификации теплообмена. Достаточно сильное влияние можно объяснить мелкомасштабной турбулентностью от минитурбулизаторов по сравнению с турбулентностью, генерируемой решетками.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 10-08-00105, 12-08-00249).

Литература

- [1] Попов И.А. (2009) Интенсификация теплообмена. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева. 560 с.

- [2] Леонтьев А.И., Олимпиев В.В. Теплофизика и теплотехника перспективных интенсификаторов теплообмена (обзор). Изв. РАН. Энергетика. 2011. № 1. С. 7-31.
- [3] Togun H., Kazi S.N., Badarudin A. A Review of Experimental Study of Turbulent Heat Transfer in Separated Flow. Australian J. of Basic and Applied Sciences. 2011. Vol 5, N10. pp. 489-505.
- [4] Chandra P.R., Fontenot M. L., Han J.C. Effect of rib profiles on turbulent channel flow heat transfer. Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 1998. Vol. 12, N 1. pp 116-118.
- [5] Oyakawa K., Fukami S., I.M.D. Didarul, Y. Miyafuji Heat transfer enhancement of vortex generator fin. Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF-2008, September 16-19, 2008. Technical University of Berlin, Berlin, Germany. 8 p.
- [6] Леонтьев А.И., Исаев С.А. Вихревая интенсификация тепло-и массообменных процессов с помощью луночных технологий (численное и физическое моделирование). Труды 5-ой Национальной конференции по теплообмену (РНКТ-5), Москва. – 25-29 октября 2010. – М.: Изд-во МЭИ (ТУ). Т. 6. С. 102-105.
- [7] Sherrow L.D., Ligrani P.M., Chudnovsky Y., Kozlov A.P. Effects of Exterior Surface Dimples on Heat Transfer and Friction Factors for a Cross-Flow Heat Exchanger. J. Enhanced Heat Transfer. 2006. Vol. 13, i. 1. pp. 1-16.
- [8] Khalatov A.A. Heat Transfer and Hydrodynamics Near Surface Recesses (Dimples). Press of the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of the Ukraine, Kiev. 2005. 76 p.
- [9] Castro I. P. and Haque, A. The structure of a shear layer bounding a separation region. Part 2. Effects of free-stream turbulence. J. Fluid Mech. 1988. Vol. 192. pp. 577-595.
- [10] Isomoto K. and Honami S. The effect of inlet turbulence intensity on the reattachment processes over a backward-facing step. Trans. JSME. 1988. Vol. 54B. pp. 51-58.
- [11] Terekhov V.I., Yarygina N.I. and Zhdanov R.F. Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence. Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46, No 23. pp. 4535-4551.
- [12] Дыбан Е. П., Эпик Э. Я., Юшина Л. Е. Теплообмен на продольно обтекаемой пластине при наличии отрыва и турбулизации внешнего потока. Пром. теплотехника. 1995. Т.17, № 1-3. С. 3-12.
- [13] Давлетшин И.А., Михеев Н.И. Отрывная область при обтекании препятствия пульсирующим потоком в канале. Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2010. Т. 45, № 5. С. 86-91.
- [14] Neumann J., Wengle, H. DNS and LES of passively controlled turbulent backward-facing step flow. Flow, Turbulence and Combustion. 2003. Vol. 71. P. 297-309.
- [15] Park H., Jeon W.-P., Choi H, Yoo J.Y. Mixing enhancement behind a backward-facing step using tab. Phys. Fluids. 2007. Vol.19, N 10, (105103). pp. 1-12.
- [16] Liou T.-M., Chen C.-C., Tsai T.-W., 1999, Heat transfer and fluid flow in a square duct with 12 different shaped vortex generators. J. Heat Transfer. 1999. Vol. 122. pp. 327-335.

- [17] Zohir A.E., Abdel Aziz A.A., Habib M.A. Heat transfer characteristics in a sudden expansion pipe equipped with swirl generators. *Int. J. Heat Fluid Flow*. 2011. Vol. 32, No 1. pp. 352-361.
- [18] Honami S., Yamagata K., Motosuke M. Separating shear layer development over backward facing step with vortex generator jets injection. *Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF-2008*, September 16-19, 2008 Technical University of Berlin, Berlin, Germany. 8 p.
- [19] Changcharoen W., Eiamsa-ard S. Numerical investigation of turbulent heat transfer in channels with detached rib-arrays. *J. Heat Transfer-Asian Research*. 2011. Vol. 40, N 5. pp. 431-447.
- [20] Miao, J.J., Lee, K.C., Chen, M.H., Chou, J.H. Control of separated flow by a two-dimensional oscillating fence. *AIAA J*. 1991. Vol. 29. pp. 1140-1148.
- [21] Smylsky Ya.I., V.I. Terekhov, Yarygina N.I. Heat transfer in turbulent separated flow behind a rib on the surface of square channel at different orientation angles relative to flow direction. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2012. Vol.55, Is.4. pp. 726–733.
- [22] D'yachenko A.Yu., Terekhov V.I., Yarygina N.I. Vortex formation and heat transfer in turbulent flow past a transverse cavity with inclined frontal and rear walls. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2008. Vol. 51, No 13-14. – pp. 3275-3286.
- [23] D'yachenko A.Yu., Smulsky Ya.I., Terekhov V.I., Yarygina N.I. Control methods for separated flows based on the effects due to inlet turbulence intensity. *Proc. of the 15-th Int. Conf. on Methods of Aerophysical Research – ICMAR 2010, Novosibirsk (ITAM), Russia*. 1-6 November 2010. 9 p.
- [24] Дьяченко А.Ю., Терехов В.И., Ярыгина Н.И. Обтекание турбулентным потоком поперечной каверны с наклонными боковыми стенками. Часть 2. Теплообмен. *Прикладная механика и техническая физика*. 2007. Т.48, № 4. С. 23-29.
- [25] Терехов В.И., Ярыгина Н.И., Смольский Я.И. Особенности теплообмена в отрывном течении за плоским ребром, расположенным под углом к основному потоку, при изменении внешней турбулентности. *Теплофизика и аэромеханика*. 2008. Т.15, №2. С. 219-227.
- [26] Bogatko T.V., D'yachenko A.Yu., Terekhov V.I., Yarygina N.I. Control of heat transfer in separated flows with the help of miniturbulators // *ASME Conf. Proc. of the 14-th Int. Heat Transfer Conf., Washington D.C., USA*. – 8-13 August 2010. Paper IHTC14 - 22153. pp. 303-309.
- [27] Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Молочников В.М. Теплообмен в турбулентной отрывной области при наложенных пульсациях потока. *Теплофизика и аэромеханика*. 2008. Т. 15, № 2. С. 229-236.
- [28] Терехов В.И., Смольский Я.И., Шаров К.А. Интерференция отрывных потоков за обратным уступом при наличии пассивного управления. *Письма в «Журн. техн. физики»*. 2012. Т.38, вып. 3. С. 46-53.
- [29] Buyukalaca O., Ozceyhan V., Gunes S. Experimental investigation of thermal performance in a tube with detached circular ring turbulators. *Heat Transfer Engineering*. 2012. Vol. 33, No 8. pp. 682-692.