

ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛООБМЕНА В ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЯХ**АННОТАЦИЯ**

Представлено современное состояние исследований в области теплообмена в отрывных течениях при наличии большого спектра осложняющих факторов таких как повышенная внешняя турбулентность, вдув или отсос газа на поверхности, влияние предьстории потока перед отрывом и т.д. Проанализировано влияние угла наклона боковых стенок траншей на особенности формирования структуры потока и теплообмен. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований обтекания системы ребер, расположенных перпендикулярно к потоку, а также при вариации угла их скоса к основному потоку. Найдены значения углов, при которых достигается максимальная теплоотдача. Проанализировано воздействие высокой внешней турбулентности на структуру отрывных потоков и степень интенсификации теплообмена.

Рассмотрено влияние пористости стенки (пористого вдува или отсоса) на масштаб зоны присоединения при вариации поперечной скорости на стенке. Даны особенности развития отрыва на пористой стенке в ограниченном канале и неограниченном потоке.

Обсуждаются результаты воздействия тепловой и динамической предьстории на характеристики ламинарного и турбулентного отрывного течения при отрыве за уступами, в кавернах с различной геометрией. Анализируются первые экспериментальные результаты по теплообмену от сферических каверн, обтекаемых импактными закрученными и незакрученными струями. Обсуждаются вопросы управления теплообменом в отрывных потоках с использованием различных факторов.

1. ВВЕДЕНИЕ

С момента публикации подобного обзора, посвященного проблемам управления теплообменом в отрывных потоках, прошло пять лет [1]. За этот относительно небольшой промежуток времени появился ряд серьезных работ как экспериментального, так и теоретического плана, которые в существенной мере расширили представления о сложных взаимосвязанных процессах аэродинамики и тепло-массообмена в отрывных течениях. Результаты этих исследований, которые будут обсуждаться ниже, могут быть использованы в приложениях для создания новых эффективных методов управления тепло-массообменом.

Актуальность проблемы теплообмена в отрывных потоках в последние годы еще более возросла. Об этом свидетельствует нарастающий поток публикаций, посвященных методам регулирования теплообмена, как интенсификации, так и его подавления. Имеющиеся способы управления теплообменом многочисленны, а требуемые практикой диапазоны изменения коэффициентов теплоотдачи очень широкие. При этом стержневым условием прием-

лемости того или иного метода интенсификации является оптимизация отношения интенсификации теплообмена к росту гидравлических потерь. Эти вопросы подробно обсуждаются в работах [2-4], в которых сопоставлены характеристики большого числа интенсификаторов теплообмена.

Возрос интерес к ламинарным отрывным потокам [4-7]. На первый взгляд это кажется удивительным, поскольку в большинстве энергоустановок имеет место отрыв турбулентного потока. Однако современные тенденции перехода теплообменной аппаратуры на мини- и микроканалы в итоге стимулировали развитие исследований в этом направлении, поскольку в подобных каналах, как правило, реализуется ламинарный режим течения. Поэтому проведение подробных исследований на макрообъектах в ламинарном режиме течения и перенос их на микроканалы представляет одну из важных задач современной теплофизики и аэродинамики.

В докладе представлены результаты экспериментальных и численных исследований турбулентных и ламинарных отрывных течений, полученные преимущественно в последнее пятилетие в Институте теплофизики СО РАН автором с коллегами.

2. КАВЕРНЫ С НАКЛОННЫМИ СТЕНКАМИ

Каверны с наклонными стенками (рис.1) являются типичным элементом компактных теплообменников. Исследования в этой области практически отсутствуют и некоторые аспекты этой проблемы рассматривались в работах [8-11].

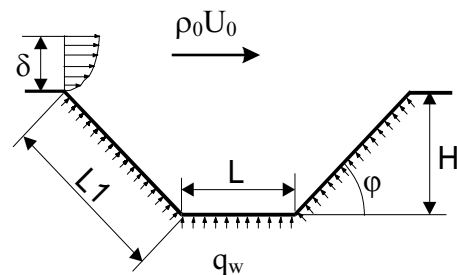


Рис. 1. Схема обтекания каверны.

Наклонные каверны отличаются от прямоугольных наличием асимметрично приложенных касательных напряжений. Это явление близко к тому, которое исследовалось авторами работы [12] для малых скоростей. В их опытах сдвиговый слой в каверне создавался движущейся верхней крышкой. Кроме того, с равной скоростью в противоположных направлениях двигались две боковые стенки. При опреде-

ленных значениях скоростей была зафиксирована смена одноячейстой структуры основного вихря на двухячейстую, известную под названием “кошачьи глазки”. При этом под действием асимметричных касательных напряжений в каверне возникала неустойчивость, названная авторами эллиптической. Трехмерная эллиптическая неустойчивость свободных сдвиговых слоев, включая и турбулентные, как и трехмерное разрушение вихрей Толмина-Шлихтинга, приводящее к трехмерным лямбда-вихрям в плоском пограничном слое, может вызывать трансформацию неустойчивого двумерного течения в каверне к устойчивому трехмерному состоянию в виде ячеистых структур. Наличие ячеистых структур в траншеях при турбулентном обтекании отмечалось неоднократно [13-16]. Количество возникающих ячеек зависит от соотношения геометрических параметров прямоугольной каверны. Трехмерность течения в сильной степени влияет на неравномерность распределения коэффициентов давления и теплоотдачи по размаху каверны. Однако возникает вопрос, влияет ли неустойчивость типа эллиптической при изменении вихревой структуры течения на процессы теплопереноса.

Проведенные ранее авторами эксперименты [17] по изучению теплоотдачи вынужденной конвекцией от дна каверн с прямоугольными и наклонными стенками ($\varphi=45^\circ$ и 60°) дали неожиданный результат повышенной теплоотдачи при угле в 60° по сравнению с остальными двумя случаями. Неадекватность полученного результата требовала более детального исследования.

Каверна имела глубину $H = 60$ мм, ширину у дна полости $L = 60$ мм и небольшую протяженность по размаху $S=180$ мм, так что $S/L=3$. Экспериментально рассмотрены случаи с углами наклона боковых стенок $\varphi = 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; 70^\circ; 80^\circ$ и 90° .

Эволюция картины течения у дна каверны при разных углах φ , полученная методом саже-масляной визуализации, для $Re_H = 4 \cdot 10^4$ представлена на рис.2. Визуализационные картины были получены также по всей поверхности полости для $Re_H = 8 \cdot 10^4$ и $1,2 \cdot 10^5$. На рис.2 видно, что при $\varphi = 80^\circ$ и 90° основной вихрь расположен ближе к задней стенке в виде одной ячейки. При дальнейшем раскрытии каверны усиливается асимметрия касательных напряжений, что вызывает неустойчивость. При $\varphi < 70^\circ$ в центре полости возникает мощный поток массы от задней стенки к передней и основной вихрь распадается на две ячейки. Двухячейстая структура сохраняется при $\varphi=30^\circ; 45^\circ$ и 60° . При угле $\varphi=70^\circ$ из-за сильной неустойчивости картина вихреобразования на рис.2 довольно смазанная. Смена режимов течения от неустойчивого одноячейстого к устойчивому двухячейстому зависит также от значения числа Рейнольдса. Для $Re_H = 4 \cdot 10^4$ распад вихря осуществляется при угле, близком к $\varphi = 60^\circ$, для $Re_H = 8 \cdot 10^4$ - при $\varphi = 70^\circ$, а для $Re_H = 1,2 \cdot 10^5$ - ближе к углу $\varphi = 80^\circ$. При $\varphi = 70^\circ$ с ростом числа Re_H поток массы от задней стенки к передней ослабевает. При двухячейстой структуре вихря начинает возрастать роль уг-

ловых вихрей и наблюдается отеснение основного вихря от стенок.

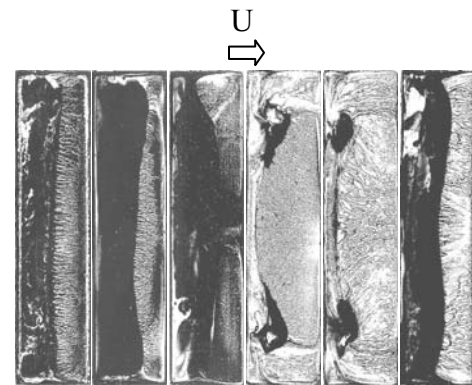


Рис. 2. Эволюция вихреобразования на дне каверны. $\varphi=30, 45, 60, 70, 80, 90^\circ$.

Динамической картине течения идентичны распределения температурных полей, полученные термографическим методом с помощью тепловизионной техники.

Характерное распределение локальных коэффициентов теплоотдачи $\alpha_i = (q_{ст} - q_{пi}) / (T_{ст} - T_0)$ в центральном сечении по потоку на передней стенке, дне и задней стенке каверны при $Re_H = 8 \cdot 10^4$ и различных величинах угла φ представлено на рис. 3.

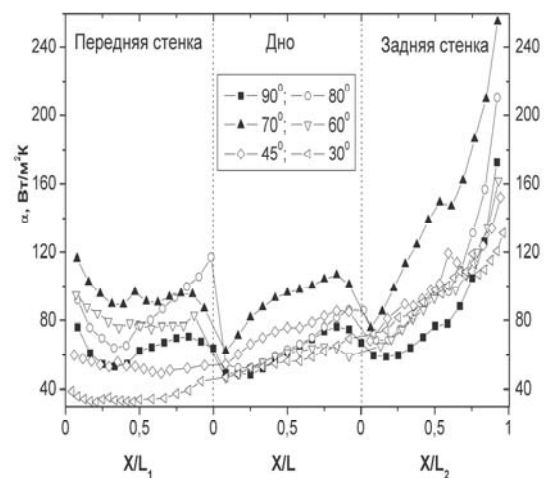


Рис. 3. Распределение локальных коэффициентов теплоотдачи вдоль центрального сечения по потоку на боковых стенках и дне траншеи при $Re_H = 8 \cdot 10^4$ и различных углах наклона стенок φ

Наглядно видно, что на всех стенках, в особенности на задней, при $\varphi = 70^\circ$ в сравнении с прямоугольной полостью наблюдается ярко выраженная интенсификация теплообмена. При $\varphi = 30^\circ$ и 45° увеличения теплоотдачи практически не наблюдается, а на передней стенке можно отметить небольшое её понижение. Резко отличный характер распределения α на передней стенке имеет место при $\varphi = 80^\circ$. В этом случае интенсивность теплоотдачи на линии соединения передней стенки и дна самая вы-

сокая и связана с началом перестройки вихреобразования.

Одним из важных параметров, характеризующих интегральный теплообмен между потоком и поверхностью каверны, является интенсивность теплопереноса через условную поверхность, разделяющую область каверны и внешний поток (разделительная поверхность). Такие данные показаны на рис.4 в зависимости от угла наклона боковых стенок.

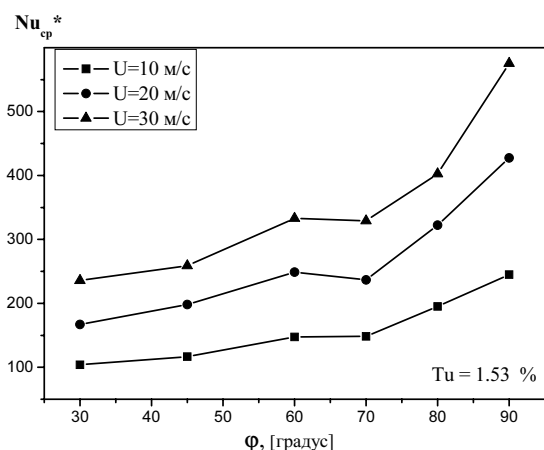


Рис. 4. Интенсивность теплообмена в наклонной каверне по разделительной поверхности

С увеличением угла наклона ϕ теплообмен непрерывно нарастает, и наиболее интенсивный обмен тепловой энергией наблюдается для квадратных каверн ($\phi = 90^\circ$). Это обусловлено главным образом уменьшением разделительной поверхности с ростом угла. В области углов $\phi = 60 \div 70$ наблюдаются характерные изломы, обусловленные перестройкой течения в этом диапазоне углов наклона.

3. ТЕЧЕНИЕ ЗА ПЛОСКИМ РЕБРОМ ПОД РАЗЛИЧНЫМИ УГЛАМИ К ПОТОКУ

Отрывное турбулентное течение за плоской преградой, ориентированной под углом к потоку, отличается рядом особенностей по сравнению с перпендикулярной преградой, в том числе усилением теплообмена [18-21]. В последнее время это явление все шире используется в технике, например для эффективного охлаждения лопаток турбин или повышения теплоотдачи в теплообменниках. Течение из-за скоса препятствия к набегающему потоку является обычно трехмерным. Численный расчет трехмерных отрывных турбулентных течений даже для современного уровня расчетных методов требует огромных вычислительных ресурсов и не дает необходимой точности в отношении теплообмена. При моделировании скошенных течений встает вопрос о существовании областей и направлений, где могут реализовываться инвариантные параметры как динамических, так и тепловых характеристик.

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 работе [22] 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 [23] изучались средние и пульсационные касательные напряжения. Показано, что существует инвариантность для продольных пристенных касательных напряжений при тех же условиях, что и в [22]. Авторы [24] исследовали обтекание препятствия под острым углом к потоку в 20° . Исследовались среднескоростные характеристики, а также коэффициенты давления и трения. В опытах было найдено автомодельное распределение давления вдоль ребра. В работах [25, 26] анализировалось течение в достаточно узком канале при наличии системы скошенных ребер на его дне и противоположной стенке. Работа [27] посвящена обсуждению совместного влияния угла ориентации ребер и высоты канала.

Эксперименты по изучению структуры отрывного потока и теплоотдачи было проведено на стенде, схематично изображенном на рис.5.

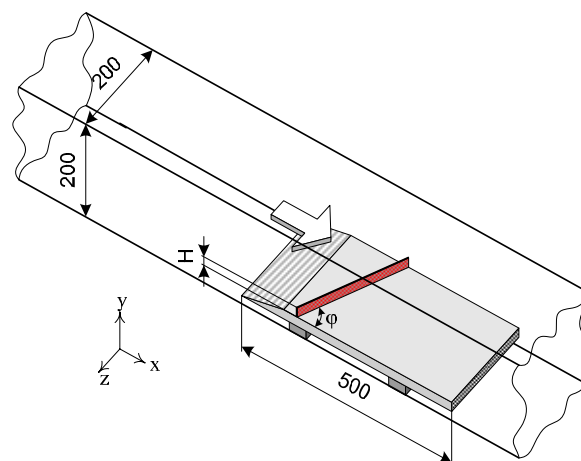


Рис.5. Схема рабочего участка

Адиабатические ребра различной высоты ($H=6-20$ мм) устанавливались под углом к потоку в диапазоне $\phi = 50 - 90^\circ$ с интервалом в 10° .

В работе [28] на аналогичной модели была проведена визуализация течения за ребром, установленным перпендикулярно потоку (рис. 6,а). Течение в этом случае симметрично, имеется два угловых ярко выраженных вихря и линия присоединения практически параллельна ребру. В отличие от этого случая при уменьшении угла ориентации ребра до 70° течение становится несимметричным, на остром угле наблюдается один концевой вихрь, на тупом угле вихрь размывается. Разделительная линия, на которой происходит раздвоение течения на обратное и присоединенное, становится непараллельной

ребру, что связано с усиленным влиянием боковых стенок. Угол наклона разделительной линии становится на несколько градусов меньше угла ориентации преграды. При $\varphi=60^\circ$ угловая вихрь еще больше уменьшается, а линия растекания по центральному сечению отдалается от стенки. Так при $\varphi=50^\circ$ (рис. 6б) за ребром высотой $H=20$ мм расхождение со случаем $\varphi=90^\circ$ было максимальным, при этом угол между линией присоединения и основным потоком равнялся примерно 45° . Картина течения демонстрирует четко выраженную застойную зону у тупого угла.

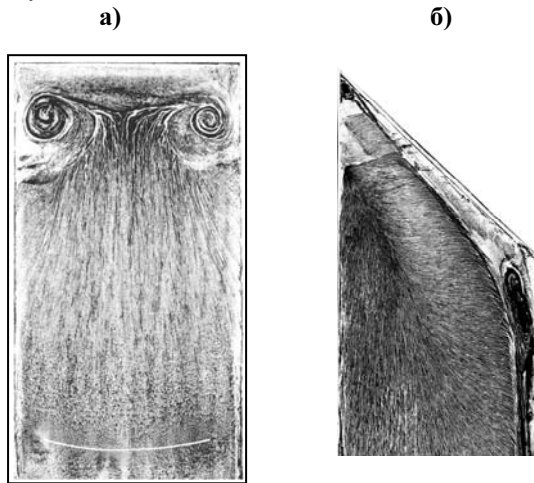


Рис. 6. Структура отрывного потока за ребрами: а – $\varphi = 90^\circ$; б – $\varphi = 50^\circ$.

Распределение коэффициента давления вдоль направления потока в различных продольных сечениях пластины показывает отсутствие подобия в профилях $C_p = 2\Delta P / \rho U^2$. Из рис.7 следует, что непосредственно за ребром имеется характерное плато постоянного C_p , где течение инвариантно к его направлению. Область наибольшего разрежения располагается у острого угла, где и происходит формирование интенсивного вихревого течения. При этом значения давления существенно различаются в поперечном направлении к потоку.

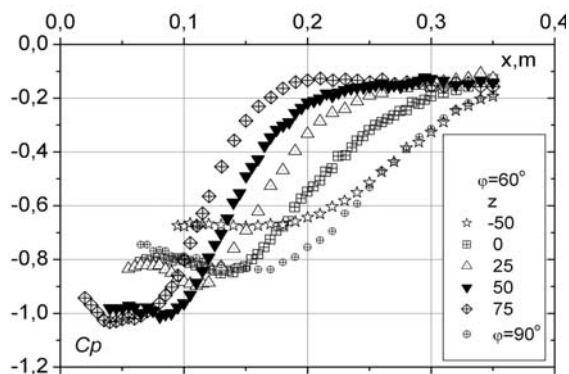


Рис.7. Приведенный коэффициент давления в пяти продольных сечениях по ширине канала для различных углов $\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = 60^\circ$

Характер распределения теплоотдачи во многом сходен с визуализационными картинками и профилями давления. Уменьшение угла между направле-

нием потока и ребром (рис. 8) приводит к значительному росту теплообмена. Смещается к ребру и координата максимума теплоотдачи, что говорит об эффективности расположения ребер под углом к потоку для интенсификации теплоотдачи.

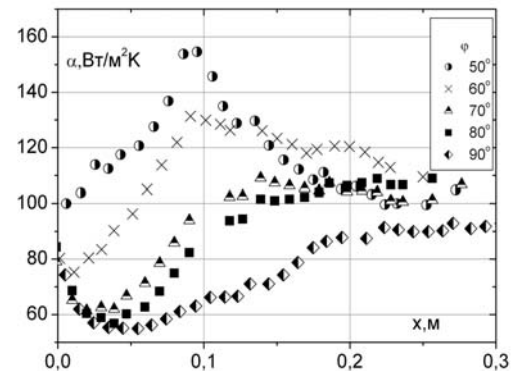


Рис. 8 Распределение теплоотдачи при вариации угла скоса

4. ТЕПЛООБМЕН В СИСТЕМЕ РЕБЕР

Этой проблеме посвящено большое число экспериментальных [29-32] и расчетных [33-35] исследований. Отрывные течения за ребрами, уступами и в поперечных полостях сильно подвержены влиянию внешних условий и особенно предыстории потока. В межреберной ячейке, как было показано в работе [36], формирование потоков существенно отличается от течения в прямоугольной каверне тех же размеров. К сожалению, мало исследований по структуре потока и теплоотдаче на начальных участках поверхности с поперечными ребрами. Именно на этих участках влияние внешних условий на отрывное течение максимальное и оно может формировать последующие особенности обтекания всей поверхности. Интересно также проследить, когда течение на ребренной поверхности становится автомодельным. Принципиальным отличием наших исследований была большая высота ребра, сопоставимая с размером межреберной ячейки. Подобные системы являются весьма эффективными в системах охлаждения, когда потери давления не играют определяющей роли, а также в узких каналах, высота которых соизмерима с масштабом интенсификаторов. Изучалась система, состоящая из пяти последовательно расположенных ребер.

Наиболее интересным результатом является обнаружение сильной неустойчивости течения во второй межреберной ячейке, что связано интерференцией отрывного потока от первого ребра и возвратного течения из третьей ячейки. Подобная картина наблюдалась и при большем числе ребер.

Распределение коэффициента теплоотдачи вдоль теплообменной поверхности с системой квадратных ячеек представлено на рис. 9. Видно, что в первой ячейке теплообмен снижается, а в последующих ячейках он постепенно нарастает. На последних ячейках распределение становится подобным и уже

слабо зависит от её расположения, что говорит о переходе к стабилизированному режиму течения и теплоотдачи.

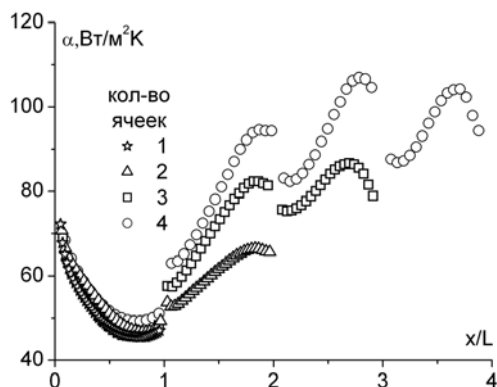


Рис 9. Продольное распределение локальных коэффициентов теплоотдачи, осредненных в поперечном направлении, для систем из разного количества ребер

5. ТЕПЛООБМЕН В КАВЕРНАХ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Интерес к поверхностям со сферическими углублениями в качестве интенсификаторов теплообмена в последние годы значительно усилился. Появился ряд монографий и обзоров [37-41]. Активно подобные исследования начали проводиться за рубежом [42-44]. Полученные результаты настолько обширные, что требуют специального детального обсуждения. Здесь же остановимся на одном, относительно мало исследованном случае взаимодействия импактных струй со сферическими кавернами. Такой метод интенсификации оказался эффективным при охлаждении лопаток газовых турбин [45-47].

Значительный интерес представляет изучение локальной структуры течения и теплообмена при взаимодействии импактной струи с преградой в виде сферической лунки. Подобных экспериментальных исследований ранее не проводилось, за исключением работы [48]. Еще одно важное приложение импактных струй, натекающих на сферические преграды, имеет место в генераторах низкотемпературной плазмы [49]. При подобной форме анода наблюдается его минимальная эрозия, обусловленная своеобразием, аэродинамической структуры формирующегося внутри лунки вихревого ячеистого течения.

Экспериментальные исследования [50,51] показали, что интенсивность теплообмена на поверхности лунки значительно (в 2-3 раза) ниже, чем при натекании струи на плоскую преграду (рис. 10). В области лунки теплоотдача практически нулевая, поскольку выбрасываемая из лунки масса газа не взаимодействует с окружающей лунку поверхностью α , движется навстречу импактной струе и тем самым оттесняет ее от теплообменной поверхности.

Суммарная теплоотдача от лунки вследствие возрастания площади теплообмена у сферической поверхности остается примерно такой же, как и на

плоской стенке. При этом на границе лунки обнаружены крупномасштабные пульсации теплового потока, свидетельствующие о наличии когерентных структур. Однако, детальное их описание требует дальнейших исследований.

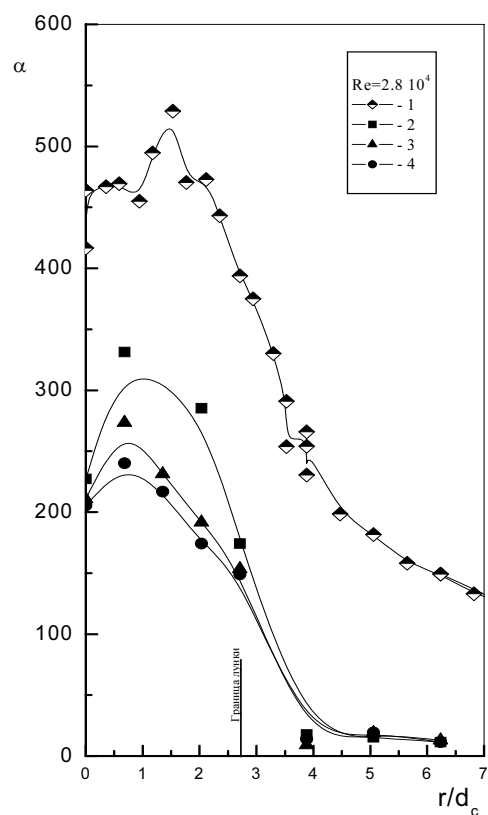


Рис. 10. Радиальное распределение коэффициента теплоотдачи. 1 - плоская преграда. 2, 3, 4 - преграда с лункой $\Delta/D_k = 0.5$; 2 - $S/d_c = 0$; 3 - 2; 4 - 6

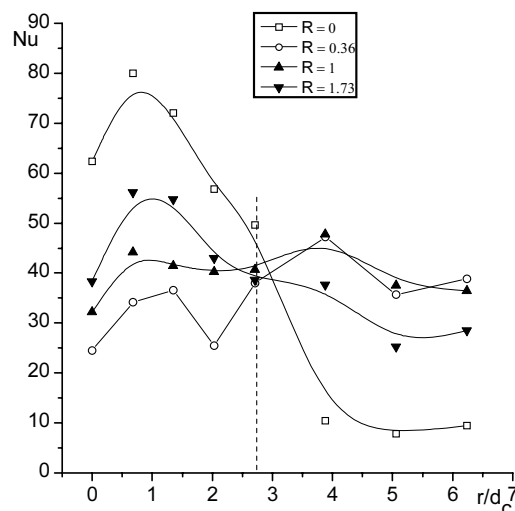


Рис. 11. Локальная теплоотдача при натекании импактных струй на преграду со сферической каверной $Re_d = 2.8 \cdot 10^4$; $L/d_c = 10$

Закрутка импактной струи приводит к коренной перестройке течения и теплообмена. С ростом па-

раметра закрутки R , увеличиваются её эжекционные свойства, поэтому распределение теплоотдачи по поверхности становится более равномерным. Это следует из рис. 11, где представлены опытные данные по теплообмену для импактных струй с различной интенсивностью закрутки. В области каверны теплообмен становится еще ниже, чем для незакрученной струи, а в периферийной зоне, наоборот, теплоотдача возрастает. При этом в распределении коэффициента теплоотдачи появляются дополнительные экстремумы, вызванные сложным механизмом влияния числа Рейнольдса струи, соотношения диаметра сопла и каверны, степени закрутки струи и других факторов. Поэтому, представленные результаты можно считать начальным этапом исследований этого сложного явления.

6. ОТРЫВ ПОТОКА НА ПРОНИЦАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Число работ по отрыву и присоединению потока к проницаемой поверхности, несмотря на их актуальность, весьма ограничено [52 - 57]. Причем, как расчетные, так и экспериментальные работы посвящены изучению турбулентного режима течения и только для случая пористого вдува; влияние отсоса на характеристики отрывного течения и теплообмена ранее не рассматривалось.

Общим для всех упомянутых работ является установление сильного влияния пористого вдува на размеры отрывной зоны, форму профилей скорости и, соответственно, на распределения трения и теплообмена. Однако результаты проведенных исследований противоречивы.

Так, по данным [52, 53] увеличение скорости вдува приводит к удалению точки присоединения от места отрыва, а по данным [54] - к сокращению отрывной зоны. Сильное влияние, согласно опытам [55], на координату точки присоединения потока оказывает температура набегающего потока. Нет качественного соответствия и в результатах измерений теплоотдачи. Так, по данным [52] вдув приводит к снижению интенсивности теплообмена, как это имеет место в безотрывном потоке, в то же время результаты работы [55] свидетельствуют о росте теплоотдачи с увеличением скорости вдувания газа через пористую стенку. Эти противоречия могут объясняться многими причинами, и прежде всего влиянием массоподвода на основное течение. При интенсивных вдувах или отсосах в каналах ограниченных размеров это влияние может быть существенным, поэтому при изменении геометрии канала аэродинамика и тепломассообмен могут коренным образом измениться. Об этом свидетельствуют данные для более простых условий [58], когда на поверхности отсутствует массообмен, а степень расширения канала $ER = H/h$ приводит к кардинальной перестройке течения и теплоотдачи (здесь h и H - высота канала до и после отрыва потока, рис. 12).

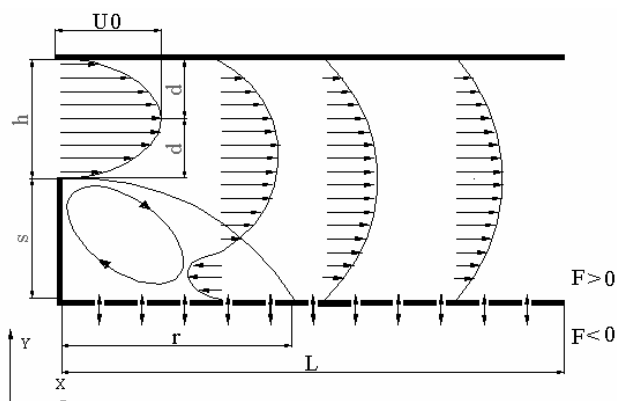


Рис. 12. Схема отрывного течения за обратным уступом с проницаемой поверхностью:

Для выявления основных особенностей влияния вдува - отсоса на параметры отрывного течения были проведены численные исследования ламинарного течения при вариации большого числа параметров - числа Рейнольдса, относительной скорости вдува - отсоса и стесненности канала [59]. Результаты расчета длины зоны присоединения в зависимости от относительной скорости вдува - отсоса представлены на рис.13.

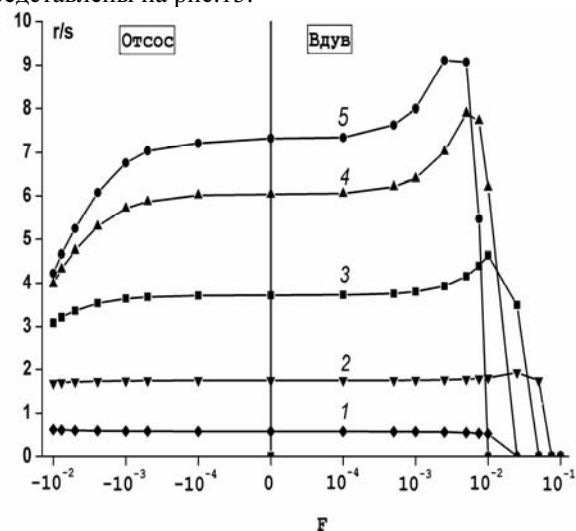


Рис. 13. Длина отрывной зоны при наличии массообмена на поверхности: 1 - $Re_s = 10$; 2 - 50; 3 - 200; 4 - 600; 5 - 1000

При малых числах Рейнольдса ($Re < 100$) вдув и отсос слабо влияют на протяженность рециркуляционной зоны и только при больших вдувах ($F \approx 0,1$) происходит отщепление отрывного пузыря от стенки и, как показали расчеты линии тока оторвавшегося слоя замыкаются на переднюю стенку и вихревое течение существует только непосредственно за стенкой уступа. С возрастанием числа Рейнольдса при интенсивных вдувах наблюдается увеличение длины рециркуляционной области, и отрывной пузырь как бы «всплывает» над поверхностью. Затем, с увеличением вдува он резко разрушается и классическое отрывное течение перестает существовать. Это интересное явление важно как с

практической точки зрения для управления течением и теплообменом, так и для выявления достаточно сложного механизма аэродинамических и тепловых процессов при отрыве потока на проницаемой поверхности.

Рассматриваемая картина еще более усложняется, когда отрыв происходит в ограниченном канале. В этом случае действует дополнительный фактор – измерение среднemasовой скорости в канале за счет подвода или отвода массы через стенку.

На рис. 14 в качестве примера демонстрируется изменение коэффициента поверхностного трения по длине канала при различных интенсивностях вдува - отсоса. Сложный, немонотонный характер поведения трения говорит о необходимости более глубокого анализа причин, приводящих к таким закономерностям трения и, как показывают расчеты, и теплообмену. Особый интерес представляет изучение отрыва на проницаемой поверхности при турбулентном режиме течения.

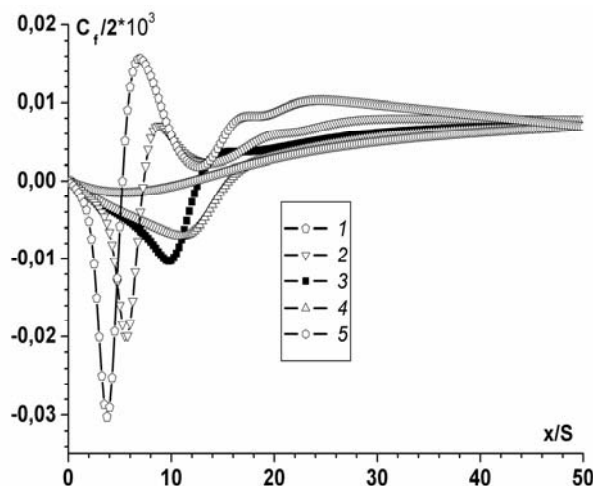


Рис. 14. Распределение коэффициента трения по длине проницаемой поверхности: течение в канале, $ER = 2$, $Re_s = 400$: 1 - $F = -0,01$; 2 - $-0, -1$; 3 - 0 ; 4 - $0,001$; 5 - $0, 01$

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 04-02-160070).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терехов В.И. Отрывные течения. Механизмы формирования и возможности управления процессами теплообмена // Труды 13-ой школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и теплообмена в энергетических установках». С – Петербург. 2001. М.: Изд-во МЭИ. Т.1.С.15-21.
2. Гортышев Ю.Ф., Олимпиев В.В., Попов И.А. Эффективность промышленно перспективных интенсификаторов теплоотдачи // Известия РАН, Энергетика. 2002. №3. С.102-118.

3. Леонтьев А.И., Гортышев Ю.Ф., Олимпиев В.В., Попов И.А. Эффективные интенсификаторы теплоотдачи для ламинарных (турбулентных) потоков в каналах энергоустановок // Известия РАН. Сер.: Энергетика. 2005. № 1. С.75-91.
4. Ligrani P.M., Oliveira M.M., Blaskovich T. Comparison of heat transfer augmentation techniques // AIAA Journal. 2002. V.41. No.3. P.337-362.
5. Chung Y.M., Tucker P.G. Numerical studies of heat transfer enhancements in laminar separated flows // Int/Journal Heat and Fluid Flow. 2004. V.25. P.22-31.
6. Iwai H., Nakabe K., Suzuki K. Flow and heat transfer characteristics of backward – facing step laminar flow in a rectangular duct // Int. Journal Heat and Mass Transfer. 2000. V.43. P.457-471.
7. Nie J.H., Armaly B.F. Reattachment of three dimensional flow adjacent to backward – facing step // Trans. ASME, J. of Heat Transfer. 2003. V. 125. P.422-428.
8. Халатов А.А., Коваленко Г.В., Кобзарь С.Г. Моделирование гидродинамики и теплообмена при обтекании воздухом поверхностей с канавками различной формы. Промышленная теплотехника. 2004. Т. 26. №5. С. 20 – 26.
9. Terekhov, V.I., Yarygina, N.I., D'yachenko, A.Yu., Turbulent heat transfer in a cross flow cavity with inclined sidewalls. Proc. of the Twelfth International Heat Transfer Conference, Grenoble, France. August 18-23, 2002. Heat Transfer 2002. V.2. P.615-619.
10. Дьяченко А.Ю., Терехов В.И., Ярыгина Н.И. Теплообмен в поперечной траншее с наклонными стенками в турбулизированном потоке // Тр. V Минского международного форума по теплообмену ММФ-V, 24-28 мая 2004, Минск: ИТМО. CD-диск: № 1-29. 9 с.
11. Митяков В.Ю. Возможности градиентных датчиков теплового потока на основе висмута в теплотехническом эксперименте: Диссертация д-ра технических наук. Ст.-Петербург. 2005. 239 с.
12. Kuhlman H.C., Wanschura M. and Rath H.J. Elliptic instability in two-sided lid-driven cavity flow // Eur.J.Mech. B/Fluids. 1998. V.17. N 4. P. 561-569.
13. Maull D.J. and East L.F. Three-dimensional flow in cavities // J.Fluid Mech. 1963. V.16. N 4. P. 620-632.
14. Kistler A.L. and Tan F.C. Some properties of turbulent separated flows // The physics of fluids supplement. 1967. V.10. N 9 (2). P. 165-173.
15. Hiwada M., Mabuchi I. and Kumada M. Three-dimensional flow and heat transfer in a rectangular cavity // Heat Transfer Jap. Res. 1985. V.14. N 1. P. 75-96.
16. Терехов В.И., Ярыгина Н.И., Шапорин А.В. Теплоотдача в трехмерном отрывном течении прямоугольной каверны // Промышленная теплотехника. 1999. Т.21. № 2-3. С. 22-25.
17. Terekhov V.I. and Yarygina N.I. Forced-convection heat transfer from the bottom of trenches with rectangular or inclined walls // Experimental Heat Transfer. 1996. V. 9. P. 133-148.
18. Olsson C.-O. and Sunden B., Experimental study of flow and heat transfer in rib-roughened rectangular channels // J. Experimental Thermal and Fluid Science. 1998. V. 16 № 4. P. 349 – 365.
19. Gao X. and Sunden B., Heat transfer and pressure drop measurements in rib-roughened rectangular channels // J. Experimental Thermal and Fluid Science. 2001. V. 24 P. 25 – 34.
20. Han J.C. and Park J.S., Developing heat transfer in rectangular channels with rib turbulators // Int. J. Heat Mass Transfer. 1988. V. 31. № 1. P. 183 – 195.
21. Kiml R., Mochizuki S. and Murata A., Effects of rib arrangements on heat transfer and flow behavior in a rec-

- tangular rib-roughened passage: Application to cooling of gas turbine blade trailing edge // *J. Heat Transfer*. 2001. V. 123. P. 675 -682.
22. **Hancock P.E. and McCluskey F.M.**, Spanwise-invariant three-dimensional separated flow // *J. Exp. Thermal and Fluid Sci.* 1999. V. 14. P.25 – 34.
 23. **Hancock P.E.**, Measurements of mean and fluctuating wall shear stress beneath spanwise-invariant separation bubbles // *Experiments in Fluids*. Springer-Verlag. 1999. V. 27. P. 53 – 59.
 24. **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. V. 67. № 655. P. 645 – 650.
 25. **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.
 26. **Mahmood G., Ligrani P.M.** and 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. V. 125. P. 769 – 778.
 27. **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. V. 2. P. 291 – 308.
 28. **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. V. 46. P. 4535 – 4551.
 29. **Wong T.T., Leung C.W., Li Z.Y., Tao W. Q.** Turbulent convection of air-cooled rectangular duct with surface-mounted cross-ribs // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2003. V. 46. P. 4629-4638.
 30. **Han J.C.** Square channels with parallel, crossed, and V-chapped angled ribs // *J. Heat Transfer*. 1991. V.113. P.590-596.
 31. **Liou T.-M., Chen C.-C., Tsai T.-W.** Heat transfer and fluid flow in a square duct with 12 different Shaped vortex Generator // *J. Yean Transfer*. 2000. V. 122. P.327-335.
 32. **Chau 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 // *Experimental Heat Transfer*. 1989. V.2. P.291-308.
 33. **Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е.** Расчет конвективного теплообмена в трубе с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока // *ТВТ*. 2005. Т.43. №2. С.223 – 230.
 34. **Iaccarino G., Ooi A., Durbin P.A., Behnia M.** Conjugate heat transfer prediction in two-dimensional ribbed passages // *Int. J. Heat Fluid Flow*. 2002. V.23. P.340-345.
 35. **Liou T.M., Hwang J.J., Chen S.H.** Simulation of measurements of enhanced turbulent heat transfer in a channel with periodic ribs on one principal wall // *Int. Journal Heat and Mass Transfer*. 1993. V.36. No.2. P. 507-517.
 36. **Терехов В.И., Третьяков С.П., Ярыгина Н.И.** Теплоотдача в турбулентных отрывных течениях за крупными препятствиями // *Тепломассообмен, ММФ-92: Труды Минского международного форума*. Минск: ИТМО БАН. 1992. Т. 1. Ч. 1. С. 10-13.
 37. **Щукин А.В., Козлов А.П., Агачев Р.С., Чудновский Я.П.** Интенсификация теплообмена сферическими выемками при воздействии возмущающих факторов // *Казань: Изд-во КГТУ*. 2003. 142 с.
 38. **Халатов А.А.** Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок) // *Киев: «Контур-Т»*. 2005. 76 с.
 39. **Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И.** Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб // *Ст.-Петербург: Судостроение*. 2005. – 390 с.
 40. **Щукин А.В., Козлов А.П., Агачев Р.С., Чудновский Я.П.** Интенсификация теплообмена сферическими выемками // *Известия РАН. Сер.: Энергетика*. 1998. № 3. С.47-64.
 41. **Терехов В.И., Калинина С.В.** Структура течения и теплообмен при обтекании единичной сферической каверны. Состояние вопроса и проблемы (обзор) // *Теплофизика и аэромеханика*. 2002. Т.9, № 4. С. 497-520.
 42. **Mahmood G.I., Ligrani P.M.** Heat transfer in a dimpled channel: combined influences of aspect ratio, temperature ratio, Reynolds number, and flow structure // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2002. V. 45. Pp. 2011-2020.
 43. **Park J., Desam P.R., Ligrani P.M.** Numerical predictions of flow structure above a dimpled surface in a channel // *Numerical Heat Transfer. Part A*. 2001. V.44. P.1 -20.
 44. **Burgess N.K., Ligrani P.M.** Effects of dimple depth on channel Nusselt and friction factors // *J. of Heat Transfer - Transactions of the ASME*. 2005. 127 (8): 839-847 AUG 2005.
 45. **Azad G.S., Huang Y.H., Han J.C.** Impingement heat transfer on dimpled surfaces using a transient liquid crystal technique // *J. of Thermophysics and Heat Transfer*. 2000. 14(2): 186-193 Apr.-Jun.
 46. **Ekkad S.V., Kontorovitz D.** Jet impingement heat transfer on dimpled target surfaces // *Int. J. Heat and Fluid Flow*. 2002. V. 23. P. 22-28.
 47. **Kanokjaruvijit K., Martinez – botas R.F.** Jet impingement on a dimpled surface with different cross flow schemes // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2005. V. 48. P.161-170.
 48. **Hrycak P.** Heat Transfer and Flow Characteristics of Jets Impinging on a Concave Hemispherical Plate // *Proc. 7th Int. Heat Trans. Conf. Munchen*, 1982. V. 3. P. 357-362.
 49. *Плазмотроны. Исследования. Проблемы: Сб. трудов* // Под ред. Жукова М.Ф. Новосибирск, 1995
 50. **Терехов В.И., Барсанов В.Л., Калинина С.В., Мшвидобадзе Ю.М.** Исследование структуры течения и теплоотдачи при нормальном струйном обтекании сферической каверны // *Труды XXVII Сибирского теплофизического семинара, ИТ СО РАН, Новосибирск, 2004. CD-ROM. № 143.*
 51. **Терехов В.И., Барсанов В.Л., Калинина С.В., Мшвидобадзе Ю.М.** Экспериментальное исследование структуры течения и теплоотдачи при струйном обтекании преграды в форме сферической каверны. *ИФЖ*. 2006. Т.79. № 4.
 52. **Шишов Е.В., Роганов П.С., Заболоцкий В.П., Атаян Р.Ш.** Распределение коэффициентов поверхностного трения и чисел St за обратным уступом при наличии пористого вдува // *Инженерно-физический журнал*. 1987. Т.53. №4. С.666-667.
 53. **Yang J.-T., Tsai B.B., Tsai G.L.** Separated-reattaching flow over a back step with uniform normal mass bleed. // *ASME Journal of Fluid Engineering*. 1994. V. 116. P.29-35.
 54. **Yue-Tzu Y., Chung-Lun K.** Numerical study of a backward – facing step with uniform normal mass bleed // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1997. V. 40. No.7. P.1677-1686.

55. **Yang J.-T., Gu J.-D., Ma W.-J.** Transient cooling effect by wall mass injection after backstep in high temperature flow field // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2001. V. 44. P.843-855.
56. **Ying –Tang Y., Chun-Hung T.** High temperature heat transfer of separated flow over a sudden-expansion with base mass injection. // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1996. V. 39. P. 2293-2301.
57. **Abu-Hijleh B. A. A.** Heat transfer from a 2D backward facing step with isotropic porous floor segments // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2000. V. 43. P. 2727-2737.
58. **Батенко С.Р., Терехов В.И.** Влияние динамической предыстории потока на аэродинамику ламинарного отрывного течения в канале за обратным прямоугольным уступом // *ПМТФ*. 2002. Т.43. №6. С. 84-92.
59. **Батенко С.Р., Терехов В.И.** Трение и теплообмен в ламинарном отрывном потоке за прямоугольным уступом при наличии пористого вдува или отсоса // *ПМТФ*. 2006. №1. С.18-28.