

УДК 533.6.011.32:532.526.5

СТРУКТУРА ОТРЫВНОГО ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАВЕРНЫ НА СТЕНКЕ ПЛОСКОГО КАНАЛА

© 2022 г. М. А. Зубин^{а,*}, А. Ф. Зубков^{а,**}

^а МГУ им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт механики, Москва, Россия

*E-mail: zubinma@mail.ru

**E-mail: 9392998@mail.ru

Поступила в редакцию 15.09.2021 г.

После доработки 21.09.2021 г.

Принята к публикации 21.09.2021 г.

Представлены результаты экспериментального исследования обтекания турбулентным дозвуковым потоком протяженной каверны на пластине или на стенке плоскопараллельного канала. Каверна представляет собой цилиндрическую траншею конечного размаха с закругленными сферическими торцами. Получены распределения коэффициента давления и визуализированы картины линий тока на поверхности каверны в зависимости от угла наклона ее продольной оси к набегающему потоку и относительной глубины. Обсуждается влияние этих параметров на интенсивность отрывного закрученного течения в каверне.

Ключевые слова: турбулентный поток, отрывные течения, обтекание каверны, коэффициент давления

DOI: 10.31857/S0568528122010121

Поиску эффективных искусственных рельефов, формируемых на стенках каналов, для интенсификации теплообмена посвящено большое количество статей и ряд монографий, обширная библиография отражена в [1]. Среди публикаций последнего времени доминирующее место занимают численные исследования обтекания одиночных и систем овально-траншейных лунок (ОТЛ), представляющих собой протяженные цилиндрические каверны со сферическими закруглениями на концах. Результаты численных исследований [2–9] ламинарного и турбулентного обтекания периодических рельефов, составленных из наклонных ОТЛ, прогнозируют исключительную эффективность таких рельефов на стенках узких каналов, выражающуюся в формировании зон течения со скоростью в 1.5 раза и более превосходящей среднемассовую скорость потока в канале и в повышении коэффициента теплообмена на десятки процентов по сравнению с гладким каналом. Эти эффекты объясняются “аномальной интенсификацией отрывного обтекания наклонных ОТЛ” [2–9], которая, в свою очередь, связана со специфическим распределением давления в ОТЛ. При этом в литературе практически нет экспериментальных данных о фактических распределениях давления по поверхности ОТЛ, что явилось мотивацией проведения настоящего исследования, в котором получены экспериментальные данные о влиянии угла наклона (атаки) и относительной глубины одиночной ОТЛ на стенке плоскопараллельного канала или уединенной пластины на структуру течения в ней.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ, МЕТОДИКИ И МОДЕЛИ

Исследования распределения давления по поверхности одиночной овально-траншейной лунки, расположенной на стенке плоского канала, проводились на установке ВИЯ НИИ механики МГУ. Установка представляет собой малую аэродинамическую трубу прямого действия, в которой поток создается нагнетающим вентилятором. Рабочий участок имеет длину 600 мм и прямоугольное поперечное сечение 200 × 50 мм (рис. 1а).

На нижней стенке в центре канала размещался поворотный диск диаметром 180 мм с выполненной в нем овально-траншейной лункой. Поворотом диска задается необходимый угол φ между направлением потока и продольной осью лунки. Для измерения статических давлений на поверхности, полного и статического давления во входном сечении канала применялись диффе-

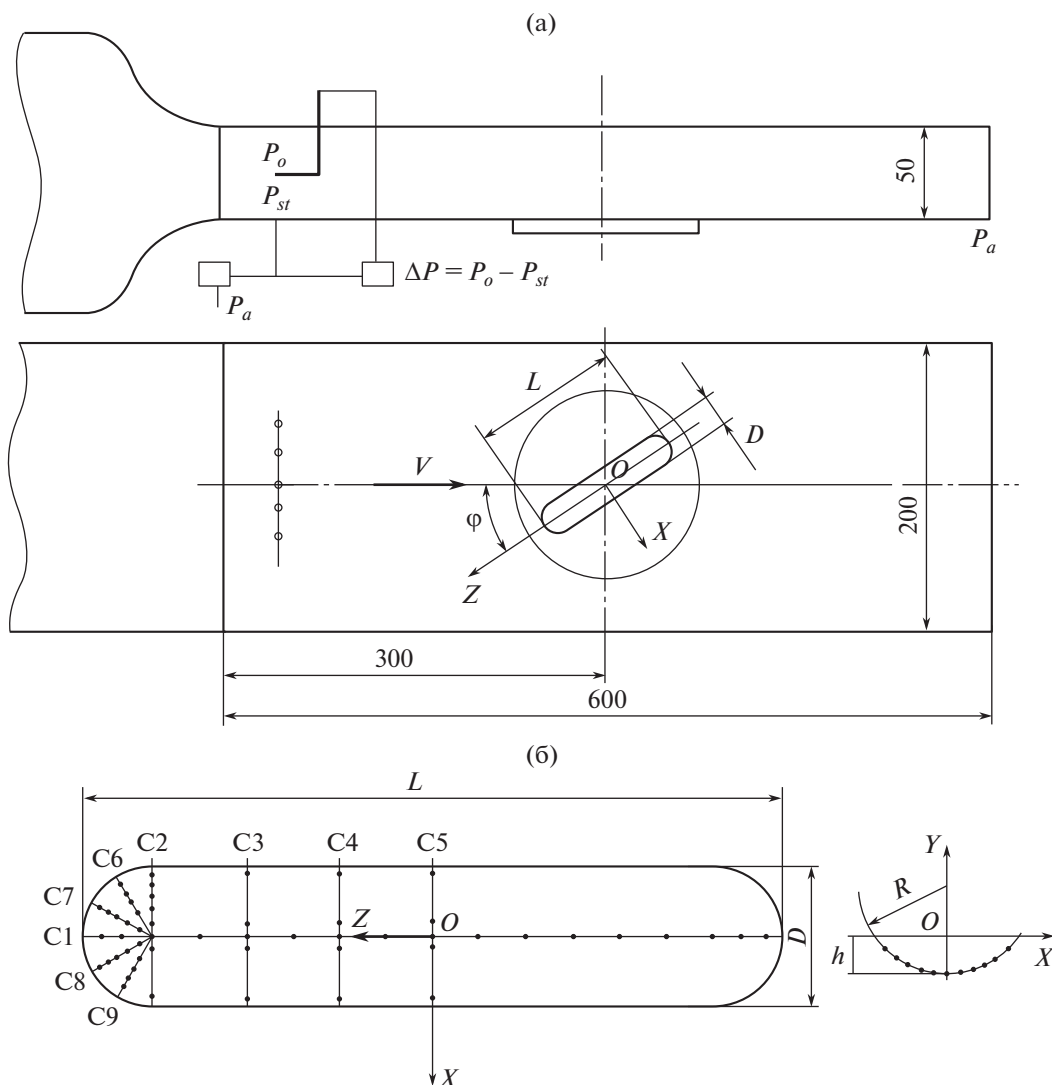


Рис. 1. Схема эксперимента (а); система координат и схема расположения дренажных сечений (б).

ренциальные датчики давления MPXV7002 фирмы Freescale с погрешностью 0.25%. В качестве опорного давления при измерении статических давлений использовалось атмосферное давление. Скоростной напор во входном сечении канала $q = \rho V^2/2 = P_o - P_{st}$ определялся с помощью датчика, измеряющего непосредственно перепад давления между полным P_o и статическим P_{st} давлениями в этом сечении.

В экспериментах использовались две модели овально-траншейных лунок, геометрия которых полностью определяется тремя параметрами их цилиндрической части: h – глубина, D – ширина, $L-D$ – длина, где L – полная длина входного сечения ОТЛ. По этим параметрам вычисляются радиус кривизны цилиндрической и сферической частей $R = h/2 + D^2/(8h)$ и все другие характерные размеры ОТЛ. Параметры моделей приведены в табл. 1.

По общепринятой классификации, лунки с относительной глубиной $h \leq 0.25D$ относятся к умеренным и мелким, а при $h \geq 0.25D$ – к глубоким. На рис. 1б представлены карта дренажных сечений для модели № 1 и принятая система координат. Диаметр дренажных отверстий равен 0.7 мм. Дренажные отверстия на моделях располагаются в продольном сечении С1 (17 точек), четырех поперечных С2–С5 (по 11 точек) и четырех радиальных С6–С9 (по 5 точек) на сферической части лунки. Возможность вращения модели лунки с помощью поворотного диска в диапазоне $0-180^\circ$ позволяет использовать дренаж в сечениях С2–С9 в обеих половинках лунки. Координаты дренажных точек на поверхности определяются в связанной декартовой системе

Таблица 1

Номер модели	L , мм	D , мм	h , мм	R , мм	h/D	L/D
1	150	30	7.5	18.75	0.25	5
2	150	30	15	15	0.5	5

координат X , Y , Z с началом в центре входного пятна ОТЛ на плоской стенке $Y = 0$ канала (рис. 1б). При этом ось Z направлена в сторону входного (переднего по потоку) сферического закругления ОТЛ, а полость лунки целиком расположена в области $Y < 0$. Угол φ наклона лунки относительно набегающего потока (угол атаки) варьируется от 0° до 90° .

В экспериментах измерялись непосредственно скоростной напор набегающего равномерного потока $q = P_0 - P_{st}$ во входном сечении канала (вне пограничного слоя) и избыточные давления ΔP_{st} и ΔP_i относительно атмосферного (опорного) давления во входном сечении и в дренажных точках на поверхности модели. При этом регистрировались большие выборки показаний датчиков давления (до 16 тыс. отсчетов при частоте опроса 1000 с^{-1}), по которым определялись средние величины, используемые при расчете значений коэффициента давления $C_p = (P_i - P_{st})/q$.

Сбор и обработка данных измерений давления осуществлялись многоканальной автоматизированной системой на базе ПЭВМ со встроенным АЦП РС1-6225 фирмы National Instruments. Функционирование системы обеспечивалось в программной среде Labview.

Измерения давления на поверхности овально-траншейных лунок установки ВИЯ проводились при скорости набегающего потока $V = 50 \text{ м/с}$, единичном числе Рейнольдса $Re_1 = 3.3 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$ и углах наклона $\varphi = 35, 45, 55, 60, 75, 90^\circ$. Толщина турбулентного пограничного слоя в окрестности передней кромки лунки составляла около 5 мм.

Для визуализации течения на поверхности овально-траншейной лунки использовался метод масло-сажевых покрытий. Эта часть исследования проводилась в аэродинамической трубе А-8 Института механики МГУ [10]. Модель – прямоугольная пластина с вмонтированным поворотным диском, содержащим овально-траншейную лунку заданной геометрии. Пластина устанавливалась на специальном пилоне параллельно направлению потока в рабочей части трубы А-8. Испытания проводились при скорости набегающего потока $V = 150 \text{ м/с}$, соответствующее и единичное число Рейнольдса $Re_1 = 1.04 \times 10^7 \text{ м}^{-1}$. Оценочная толщина турбулентного пограничного слоя в окрестности передней кромки ОТЛ 4 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭСПЕРИМЕНТОВ

В дальнейшем все линейные размеры, координаты дренажных сечений и точек на поверхности ОТЛ нормированы на ширину цилиндрической вставки D . Для идентификации положения дренажных точек в сечениях С1–С9 (рис. 1б) используются безразмерные криволинейные координаты s , t . Параметр s определен для симметричных сечений С1–С5. По абсолютной величине он равен расстоянию вдоль соответствующего контура сечения, начиная от точки симметрии (центра) контура. При этом знак s совпадает со знаком декартовой координаты Z в случае сечения С1 или знаком координаты X в случае сечений С2–С5 (рис. 1б). Параметр $t > 0$ идентифицирует точки на поверхности в сферических частях лунки и равен расстоянию вдоль контуров радиальных сечений сферических закруглений лунки, начиная от центра линий сопряжения цилиндрической вставки с соответствующими сферическими частями ОТЛ (на рис. 1б это сечения С6–С9 и две ветви сечения С2). Угол между данными радиальными сечениями составляет 30° .

На рис. 2а,б построены экспериментальные зависимости распределения коэффициента давления C_p в характерных сечениях ОТЛ с относительной глубиной $h = 0.25$. Они дают общее представление о характере распределений давления в овально-траншейной лунке при различных углах атаки.

При угле атаки $\varphi = 90^\circ$ (поперечное обтекание) наблюдается практически симметричное распределение давления по размаху лунки. При уменьшении угла атаки на стенке головной части лунки появляются явно выраженные области с минимумом давления (рис. 2а). Существование этих областей прослеживается на всех зависимостях изменения давления в поперечном сечении С2 для углов атаки φ из интервала $45\text{--}90^\circ$, где при значениях s в районе -0.2 наблюдаются минимумы давления (рис. 2б). При этом в окрестности нижней по потоку кромки ОТЛ ($s \sim 0.45$) образуются области повышенного давления. Отметим, что в зоне минимальных давлений наблю-

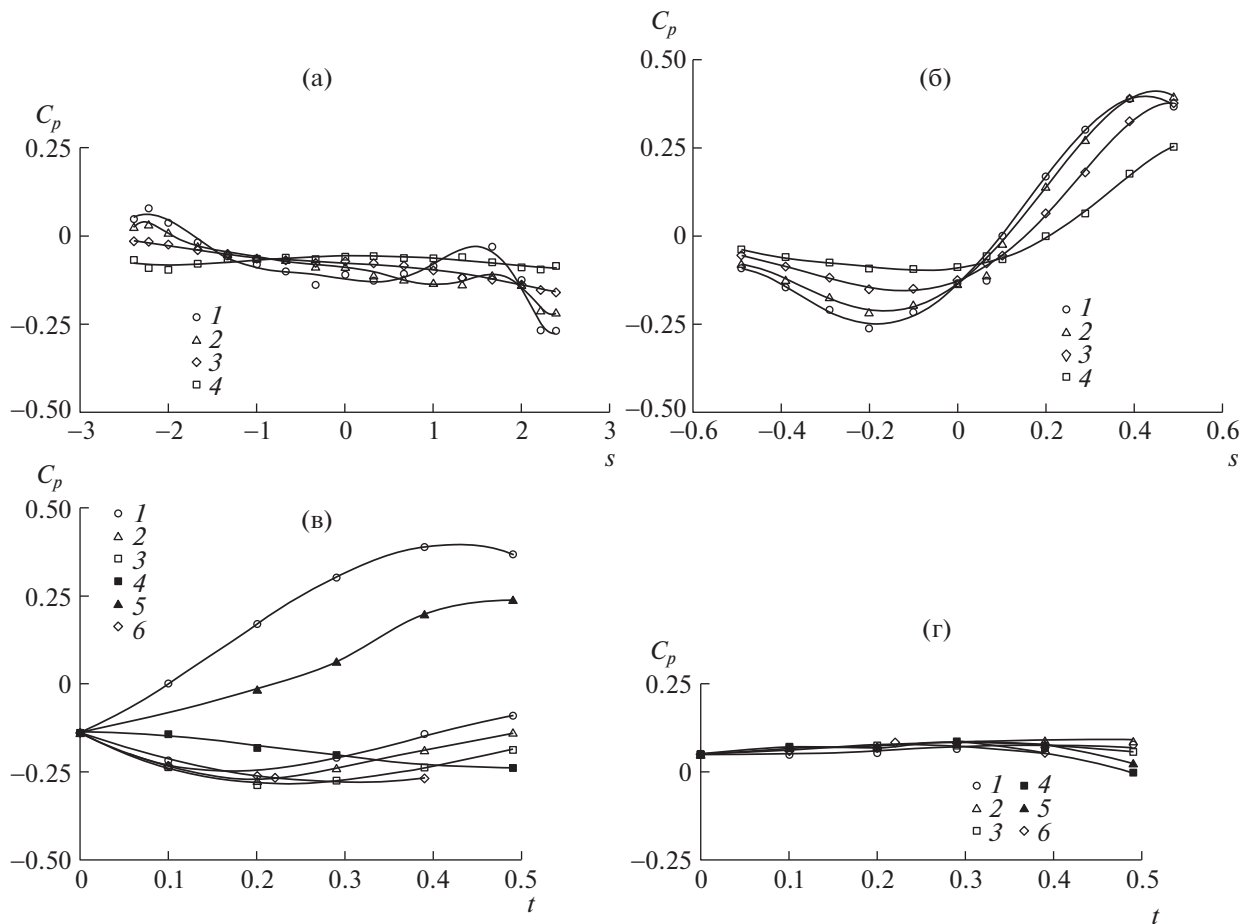


Рис. 2. Распределения коэффициента давления на поверхности ОТЛ при $h = 0.25$ в сечениях С1 (а) и С2 (б) при различных углах атаки: значки 1 – $\varphi = 45^\circ$, 2 – 60° , 3 – 75° , 4 – 90° ; и в радиальных сечениях передней (в) и задней (г) сферических частях ОТЛ при $\varphi = 45^\circ$: значки: 1 – сечение С2, 2 – С6, 3 – С7, 4 – С8, 5 – С9, 6 – С1.

дается более сильное влияние угла атаки на величины указанных экстремумов по сравнению с зоной максимальных давлений. Из сопоставления зависимостей изменения давления в сечениях С1–С9 (рис. 2в) входной (передней сферической) части лунки следует, что область минимальных давлений располагается в ее первой половине. В отличие от передней обтекание задней (выходной) сферической части лунки происходит при практически постоянном давлении по всей ее поверхности, близком к давлению в набегающем потоке (рис. 2г).

В целом приведенные на рис. 2 данные подтверждают результаты расчетов [2, 3, 6–8], показывающих, что при наклонном обтекании ОТЛ возникает своеобразная конфигурация распределения давления в передней сферической части лунки, состоящая из двух локализованных зон высокого и низкого давления. Область повышенного давления локализована у задней (выходной) кромки в окрестности сечения сопряжения С2, а зона минимального давления – в сферической части лунки. Возникновением такой двойной конфигурации при наклонном обтекании ОТЛ объясняется в [2, 3, 6–8] кардинальная перестройка возвратного течения, приводящая по терминологии, принятой в этих работах, к режимам с “аномальной интенсификацией отрывного обтекания ОТЛ” и значительным увеличением теплообмена на стенках канала в окрестности ОТЛ.

Перейдем к рассмотрению результатов визуализации пристеночных течений в ОТЛ и их сопоставлению с данными измерений давления при $h = 0.25$ и $h = 0.5$ (табл. 1). На рис. 3а,б представлены картины визуализации течения при поперечном обтекании мелкой и глубокой лунок, а также графики распределения коэффициента давления для двух характерных сечений С1 и С2 (рис. 1).

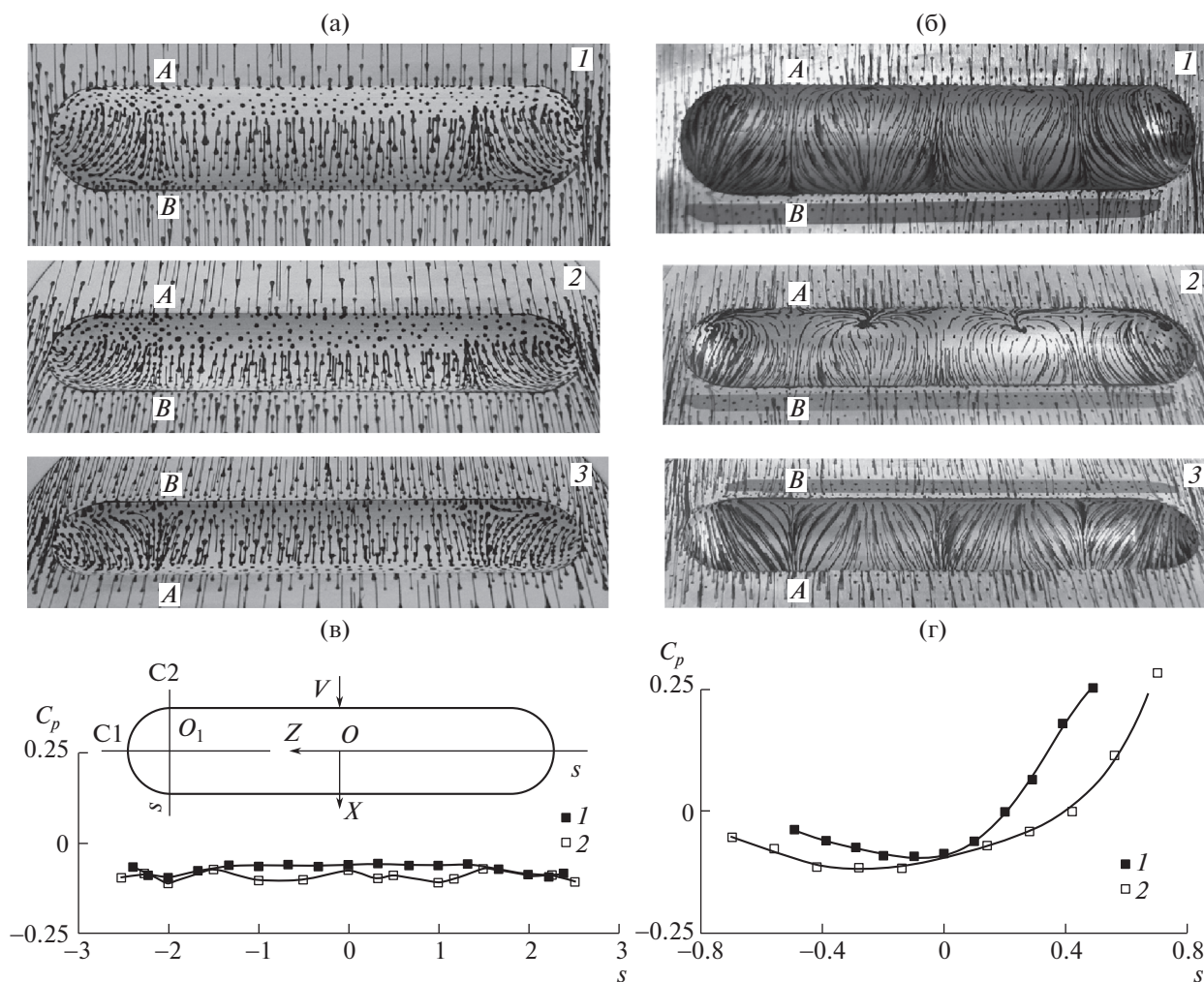


Рис. 3. Обтекание мелкой (а) и глубокой (б) ОТЛ при $\varphi = 90^\circ$ (виды: 1 – фронтальная проекция, 2 – проекция на переднюю кромку А, 3 – проекция на заднюю кромку В). Распределения коэффициента давления в продольном сечении С1 (v) и поперечном сечении С2 (r): значки: 1 – $h = 0.25$, 2 – $h = 0.5$.

На картинах предельных линий тока для мелкой и глубокой лунок наблюдается практически симметричное возвратное течение внутри лунки относительно поперечной оси X , состоящее из 4 фрагментов: двух концевых, располагающихся в сферических концах лунки, и двух центральных в области цилиндрической вставки. Причем при почти равных перепадах давления для мелкой и глубокой лунок в поперечных сечениях С2 (рис. 3г) наблюдается более сложная структура течения в 2 центральных фрагментах глубокой лунки по сравнению с мелкой лункой. Две симметрично расположенные особые точки типа фокус в окрестности передней кромки глубокой лунки (рис. 3б) свидетельствуют о существовании в возвратном течении двух симметричных вихрей с противоположенным вращением, оси которых совпадают с направлением возвратного течения. Появление этих вихрей, по-видимому, связано с потерей устойчивости возвратного течения, развивающегося от линии присоединения, расположенной в окрестности задней кромки, цилиндрической вставки, имеющей большую кривизну, чем в мелкой лунке. Наличие локальных минимумов при $s = \pm 1$ давления в продольном сечении С1 (рис. 3в) соответствует положению фокусов на линии стекания, и также указывает на возможность существования указанных вихревых структур в двух центральных фрагментах возвратного течения в глубокой лунке.

Поворот ОТЛ на угол атаки $\varphi = 45^\circ$ сопровождается значительными изменениями структур отрывного обтекания (рис. 4). При наклонном обтекании мелкой лунки (рис. 4а) наблюдается структура, состоящая из двух фрагментов. Первый – вихревое течение, образующееся при обтекании входной сферической части овально-траншейной лунки, второй – протяженный вихрь,

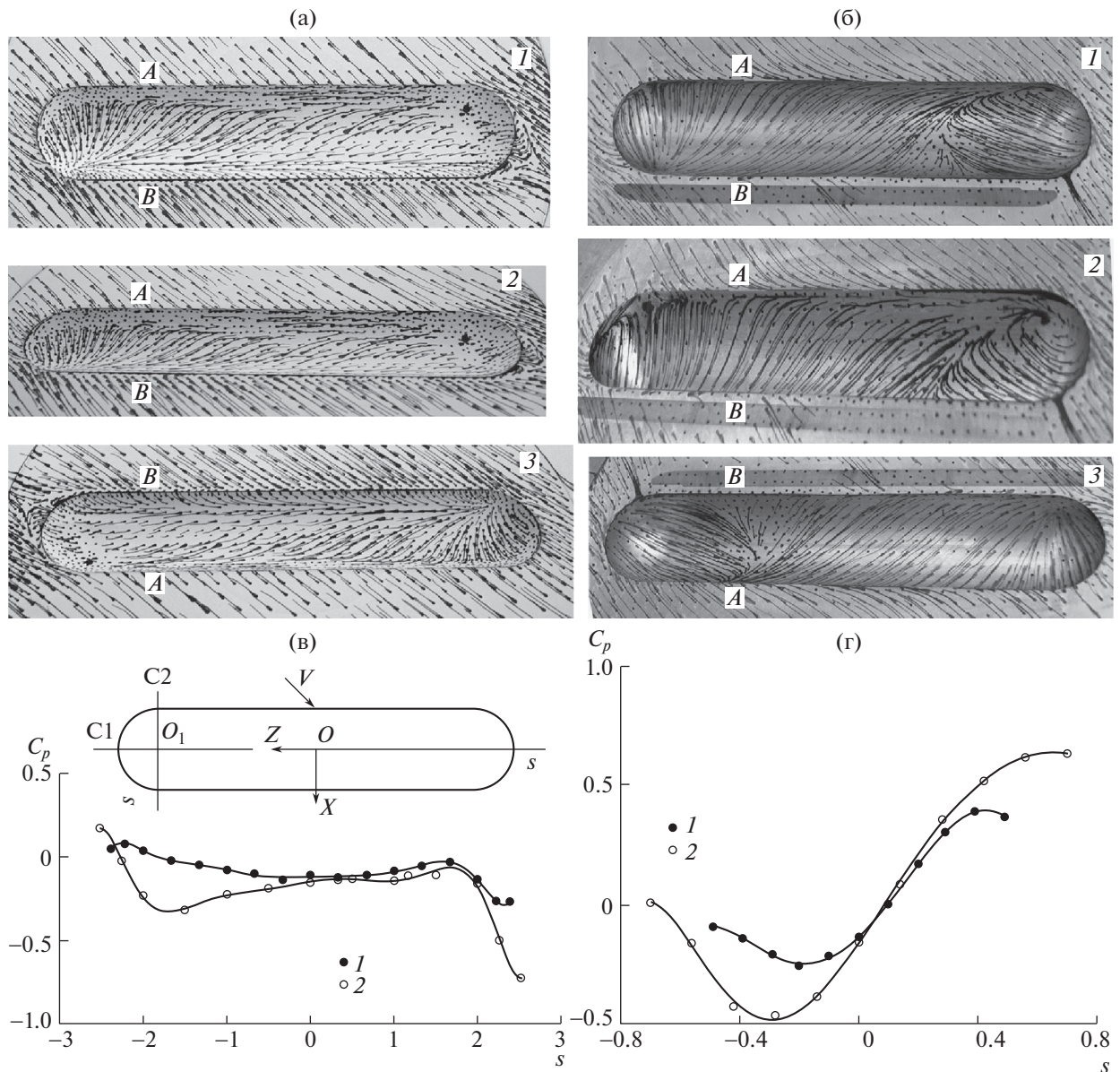


Рис. 4. Обтекание мелкой (а) и глубокой (б) ОТЛ при $\varphi = 45^\circ$ (виды: 1 – фронтальная проекция, 2 – проекция на переднюю кромку А, 3 – проекция на заднюю кромку В). Распределения коэффициента давления в продольном сечении С1 (в) и поперечном сечении С2 (г): значки: 1 – $h = 0.25$, 2 – $h = 0.5$.

распространяющийся по всей остальной части лунки и выходящий во внешний сносный поток в задней сферической части ОТЛ. В глубокой лунке (рис. 4б) реализуется несимметричная структура течения, включающая три вихревых фрагмента, два из которых формируются в сферических концах лунки, а третий протяженный занимает почти всю цилиндрическую часть. Наблюдаемые изменения структуры возвратного течения в мелкой и глубокой лунках находят отражение в характерных изменениях распределений давления. Относительная глубина h оказывает влияние не только на величины максимальных и минимальных давлений в продольном С1 (рис. 4в) и поперечном С2 (рис. 4г) сечениях, но и изменяет вид распределения давления в продольном сечении глубокой лунки. В окрестности $s \approx -1.8$ возникает локальный минимум давления, связанный с обтеканием сферической выходной (задней) части лунки.

На основании анализа картин предельных линий тока на поверхности мелкой и глубокой ОТЛ совместно с данными о распределении давления в характерных сечениях предложены возможные схемы отрывных течений в них. На условных развертках поверхности ОТЛ представле-

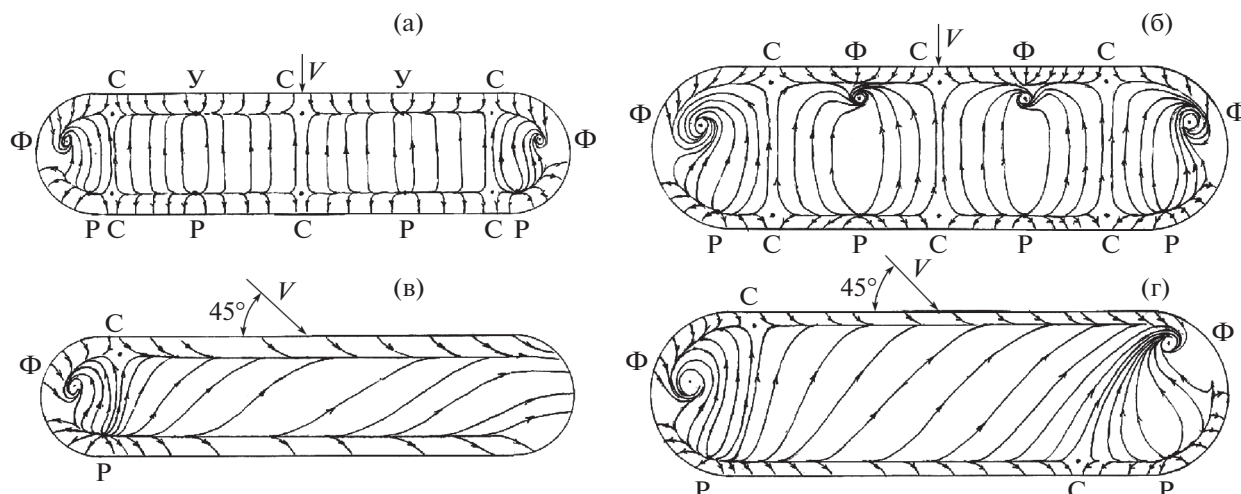


Рис. 5. Схемы течения при обтекании овально-траншейных лунок с различной относительной глубиной: а, б – поперечное обтекание при $\varphi = 90^\circ$; в, г – под углом наклона $\varphi = 45^\circ$; $h = 0.25$ – а, в; 0.5 – б, г.

ны схемы течения (рис. 5), где линиями со стрелками изображены линии тока, а буквами Р, С, У, Ф обозначены соответственно различные типы особых точек, а именно, растекания, седло, узел и фокус.

Отметим практически идентичные схемы при поперечном обтекании мелкой и глубокой лунок за исключением смены узловых точек фокусами на линии стекания (рис. 5а,б). В случае наклонного обтекания влияние относительной глубины ОТЛ более существенное (рис. 5в,г). В мелкой лунке происходит кардинальная перестройка с формированием возвратного течения вдоль поверхностей с меньшей кривизной. Это сопровождается существенными отличиями величин перепадов давления, реализующихся в характерных поперечных сечениях наклонной ОТЛ по сравнению с вариантом ее поперечного обтекания.

На рис. 6 приведены распределения коэффициента давления в различных поперечных сечениях, по размаху глубокой и мелкой ОТЛ (на графиках показаны данные только для нескольких из семи имеющихся сечений, рис. 1). Анализ распределений давления для всех поперечных сечений позволяет заключить, что в обеих овально-траншейных лунках вдоль продольной оси происходит торможение возвратного течения, формирующегося под действием перепадов давления в передней сферической, центральной цилиндрической и задней сферической частях лунки.

В целом можно отметить, что в каждом из поперечных сечений $Z = \text{const}$ цилиндрической части лунки имеются две точки локального экстремума по s зависимостей $C_p = f(s, Z)$. Расстояние и перепад давления между этими точками влияют на интенсивность возвратного течения в соответствующем поперечном сечении. При этом последовательность точки локализации максимумов и минимумов C_p на контуре сечения может быть разной. В мелкой лунке точки максимума располагаются в области $X > 0$ (рис. 1б), а точки минимума в области $X < 0$. В большинстве сечений глубокой лунки это тоже так. Однако в двух сечениях в около $Z = -1$ этот порядок изменился на обратный: точки максимума и минимума поменялись местами (рис. 6б). Это означает, что возвратное течение в зоне указанных сечений испытывает противодействие, что должно приводить к снижению интенсивности возвратного течения и, возможно, к уменьшению закрутки продольного вихря при прохождении зоны данных сечений с реверсным расположением точек экстремума на контуре.

В связи с этим можно предложить критерий

$$K(Z) = \frac{\Delta C_p(s, Z)}{\Delta s}$$

где ΔC_p – перепад между значениями экстремумов коэффициента давления на контуре поперечного сечения ОТЛ с учетом последовательности расположения точек максимума и минимума в данном сечении; Δs – расстояние вдоль контура сечения между соответствующими точками экстремума зависимости $C_p = f(s)$. Величину $K(Z)$ можно использовать как приближенную характе-

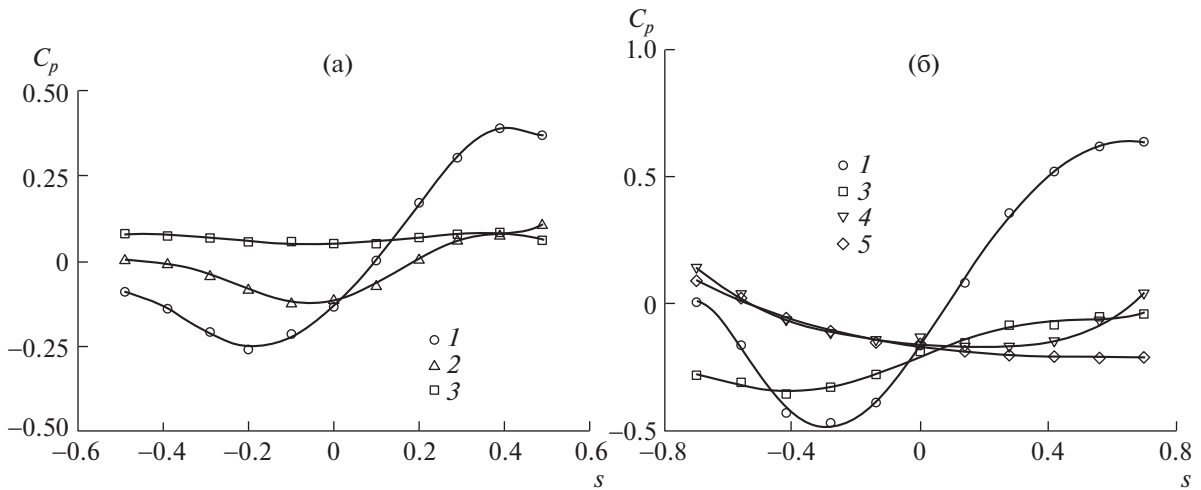


Рис. 6. Распределения коэффициента давления в поперечных сечениях мелкой (а) и глубокой (б) ОТЛ при наклонном обтекании под углом атаки $\varphi = 45^\circ$: значки 1 – сечение $Z = 2$, 2 – $Z = 0$, 3 – $Z = -2$, 4 – $Z = 0.33$, 5 – $Z = -0.33$.

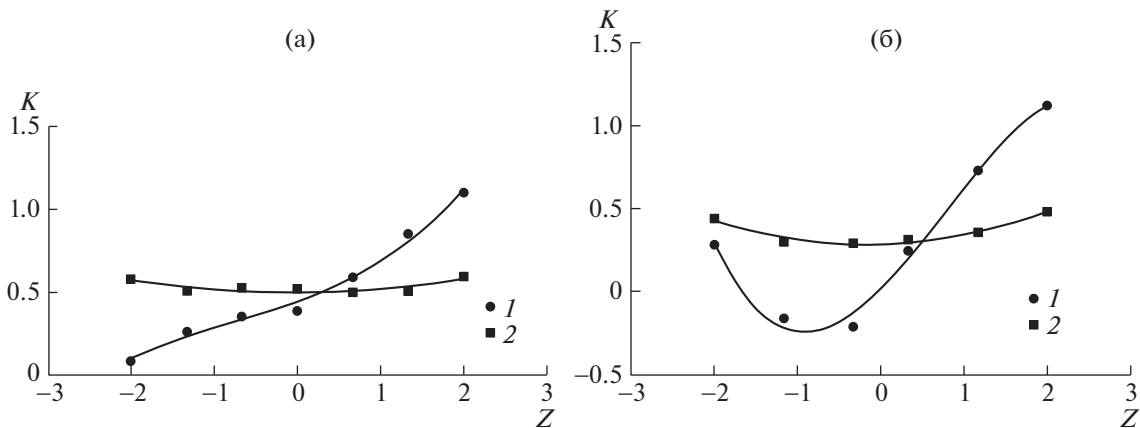


Рис. 7. Изменение критерия $K(Z)$ по длине цилиндрической части мелкой (а) и глубокой (б) ОТЛ при наклонном и поперечном обтекании: 1 – $\varphi = 45^\circ$, 2 – 90° .

ристку интенсивности продольно-вихревого течения (или скорости возвратного течения) в цилиндрической части овально-траншейной лунки (рис. 7). При обычной последовательности точек минимумов и максимумов C_p в сечении $Z = \text{const}$ критерий K принимает положительные значения, а при реверсном расположении этих точек $K < 0$.

Зависимости на рис. 7 ясно показывают, что при переходе от поперечного к наклонному обтеканию как мелкой, так и глубокой ОТЛ значительная интенсификация возвратного течения может достигаться только в верхней по потоку половине лунки ($Z > 0$), а во второй половине – наоборот, вызывающий раскрутку вихря градиент давления слабый или вообще отрицательный. Поэтому утверждения [2, 3, 6–8] о том, что при наклонном обтекании ОТЛ осуществляется “аномальная интенсификация отрывного течения”, можно подтвердить только в отношении передней части лунки. В связи с этим можно предложить V-образную конфигурацию каверны, составленную из первых частей двух наклонных ОТЛ, расположенных симметрично по отношению к направлению набегающего потока. В результате такой трансформации может быть получена V-образная каверна, состоящая из эффективных половин двух наклонных ОТЛ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование обтекания двух овально-траншейных лунок (ОТЛ) с различной относительной глубиной, расположенных на пластине или стенке плоскопараллельного канала, при различных углах наклона их продольной оси к направлению набегающего потока.

Получены распределения давления по поверхности лунок в характерных сечениях и визуализированы картины поверхностных линий тока течений, возникающих при их поперечном и наклонном обтекании. Показано существенное влияние глубины и угла наклона ОТЛ на структуру течения.

Экспериментально подтверждено обнаруженное ранее в численных исследованиях существование в передней сферической части наклонной ОТЛ особого распределения давления в виде двух близко расположенных локализованных зон высокого и низкого давления, определяющего в целом формирование закрученного течения в ОТЛ.

Предложен критерий $K(Z)$, приближенно оценивающий интенсивность возникающего в ОТЛ возвратного течения при ее обтекании под различными углами наклона.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФ (грант 19-19-00259).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонтьев А.И., Алексеенко С.В., Волчков Э.П. и др. Вихревые технологии для энергетики. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 350 с.
2. Isaev S., Schelchikov A.V., Leontiev A.I., Gortyshov Yu.F., Baranov P.A., Popov I.A. Tornado-like Heat Transfer Enhancement in the Narrow Plane-parallel Channel with the Oval-trench Dimple of Fixed Depth and Spot Area // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 109. P. 40–62.
3. Isaev S., Leontiev A., Chudnovsky Y., Popov I. Vortex Heat Transfer Enhancement in Narrow Channels with a Single Oval-trench Dimple Oriented at Different Angles to the Flow // J. Enhanced Heat Transfer. 2018. V. 25. № 6. P. 579–604.
4. Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Попов И.А., Судаков А.Г. Аномальная интенсификация турбулентного отрывного течения в наклоненных однорядных овально-траншейных лунках на стенке узкого канала // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. № 5. С. 797–800.
5. Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Никущенко Д.В. Ускорение турбулентного потока в узком облуненном канале и интенсификация отрывного течения при уплотнении однорядных наклоненных овально-траншейных лунок на стенке // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 5. С. 697–702.
6. Isaev S., Gritckevich M., Leontiev A., Popov I. Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall // Acta Astronautica. 2019. V. 163 (Part A). P. 202–207.
7. Isaev S.A., Leontiev A.I., Milman O.O., Nikushchenko D.V., Sudakov A.G. The effect of anomalous intensification of the separated flow and vortex heat transfer in an inclined oval-trench dimple and the construction of energy-efficient well-structured surfaces // AIP Conference Proceedings. 2020. 2211, 020003.
8. Isaev S.A., Mazo A.B., Nikushchenko D.V., Popov I.A., Sudakov A.G. The influence of the angle of inclination of single-row oval-trench dimples in the stabilized hydrodynamic section of a narrow channel on the anomalous intensification of the separated turbulent flow // Technical Physics Letters. 2020. V. 46. № 11. P. 1064–1067.
9. Исаев С.А., Чулюнин А.Ю., Никущенко Д.В., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Анализ аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена на стабилизированном участке узкого канала с однорядными наклоненными овально-траншейными лунками при использовании различных сеток и моделей турбулентности // Теплофизика высоких температур. 2021. № 1. С. 116–125.
10. Аэродинамические установки Института механики МГУ / Под. ред. Г.Г. Черного, А.И. Зубкова, Ю.А. Панова. М.: Изд-во Московского университета, 1985. 43 с.