

УДК 536.24: 532

Отрыв потока за выступом в канале при ламинарном режиме течения

В.М. Молочников, Н.И. Михеев, А.А. Паерелий, К.Р. Хайрнасов

Исследовательский центр проблем энергетики Казанского научного центра РАН

E-mail: vmolochnikov@mail.ru

Представлены результаты визуализации и комбинированных измерений параметров потока в отрывном течении за выступом в канале при номинально ламинарном режиме течения. Установлено, что течение в отрывной области является существенно трехмерным и нестационарным с выраженной ячейкой структурой и наличием зон с движением в трансверсальном направлении. Показано, что отрыв потока за выступом инициирует появление низкочастотных колебаний скорости потока и начало перехода к турбулентному режиму течения в канале. Выявлено значение критического числа Рейнольдса, соответствующее началу развития неустойчивости течения в канале. Показано, что при превышении критического числа Рейнольдса линейный интегральный масштаб пульсаций скорости потока в канале определяется размерами канала.

Ключевые слова: комбинированные измерения, визуализация течения, отрыв потока, ламинарно-турбулентный переход, пространственно-временная структура, интегральный масштаб, крупномасштабные вихревые структуры.

ВВЕДЕНИЕ

Отрыв потока относится к одному из наиболее сложных и интересных явлений механики жидкости и газа. Априори считается, что отрыв ламинарного потока является более простым как для экспериментального изучения, так и для численного моделирования. Возможно, именно этим обстоятельством объясняется тот факт, что преобладающее большинство исследований отрывных течений выполнено для случая турбулентного отрыва потока. Между тем, интерес к исследованию ламинарных отрывных течений в последнее время существенно вырос. С одной стороны, это связано с тем, что многие свойства таких течений до настоящего времени изучены недостаточно. Так, отрыв потока является одним из факторов, стимулирующих возникновение турбулентности в пристенной области течения. Поэтому даже при малых числах Рейнольдса, соответствующих номинально ламинарному режиму течения, после отрыва потока может происходить нарастание возмущений и последующий переход к турбулентности [1, 2]. Однако многие вопросы, связанные с особенностями структуры таких течений и механизмами возникновения турбулентности в этих условиях, неясны. С другой стороны, этот интерес вызван необходимостью решения практических задач, возникающих при разработке компактных и ультракомпактных теплообменников (для охлаждения элементов электроники, радарных устройств и т. д.) с каналами малого гидравли-

Воздух в корпус 3 и рабочий участок установки поступал через критические сопла 4, установленные на фланце 5 корпуса. Расход воздуха в тракте установки обеспечивался вакуумным насосом 6, который при помощи гибкого шланга 7 соединялся с выходным патрубком 8 рабочего участка.

Для расширения диапазона изменения чисел Рейнольдса при приемлемых для измерения и визуализации скоростях потока в рабочем участке предусматривалась возможность создания в тракте установки необходимого разрежения. С этой целью в разъеме патрубка 8 рабочего участка также устанавливалось критическое сопло 9. Скорость потока и степень разрежения в рабочем участке варьировались при помощи комбинации критических сопел на входе в установку и выходе из рабочего участка. При этом сопла выбирались таким образом, чтобы на каждом из них перепад давления был не ниже критического. Степень разрежения внутри корпуса установки (в рабочем участке) контролировалась вакуумметром 18. В экспериментах использовались поверенные критические сопла, обеспечивающие погрешность задания и измерения объемного расхода не более 0,25 %.

На боковой стенке корпуса 3 установки под углом 90° друг к другу были выполнены два светопрозрачных герметичных окна с фланцами. Окно 10 служило для установки устройства подсветки потока, которая выполнялась методом светового “ножа” с помощью лампы 11. Устройство подсветки обеспечивало возможность плоско-параллельного перемещения светового ножа. Окно 12 предназначено для выполнения наблюдения и видеосъемок исследуемого течения при помощи видеокамеры 13. На одной из стенок рабочего участка предусмотрена возможность установки препятствий различной конфигурации.

При проведении исследований использовались два рабочих участка одинаковых размеров и идентичной конфигурации. Первый из них предназначался для проведения визуальных исследований, второй — для выполнения измерений.

Для визуализации течения использовался метод “дымящейся” проволоки, в котором узкий концентрированный дымовой след образуется в результате быстрого испарения (сжигания) масла на проволочке при пропускании через нее импульса тока. Пять нихромовых проволочек 14, диаметром 0,2 мм каждая, были установлены вблизи образующей входного устройства рабочего участка. Для компенсации теплового удлинения проволочек служил натяжитель 15. Подвод напряжения питания к проволочкам осуществлялся через герметичные разъемы. Регулирование напряжения питания (интенсивности дымового следа) выполнялось при помощи регулятора 16.

В конструкции установки предусмотрена возможность поворота рабочего участка внутри корпуса 1 относительно его оси для обеспечения возможности визуальных наблюдений структуры течения за исследуемым объектом в различных плоскостях.

Рабочий участок, предназначенный для выполнения измерений параметров течения, оснащался термоанемометрическими датчиками скорости потока, установленными на оси канала вблизи его входного сечения и вниз по течению от препятствия. Такое расположение датчиков скорости потока позволило контролировать режим течения на входе в рабочий участок и определять влияние выступа на характер течения вниз по потоку. Кроме того, на стенке канала за выступом были установлены термоанемометрические датчики для измерения продольной компоненты вектора поверхностного трения. Схема расположения датчиков представлена на рис. 2.

Для измерения скорости потока использовались нитяные термоанемометрические датчики. Диаметр нити датчика составлял 5 мкм, длина нити — 2 мм. Измерение продольной компоненты вектора поверхностного трения проводилось

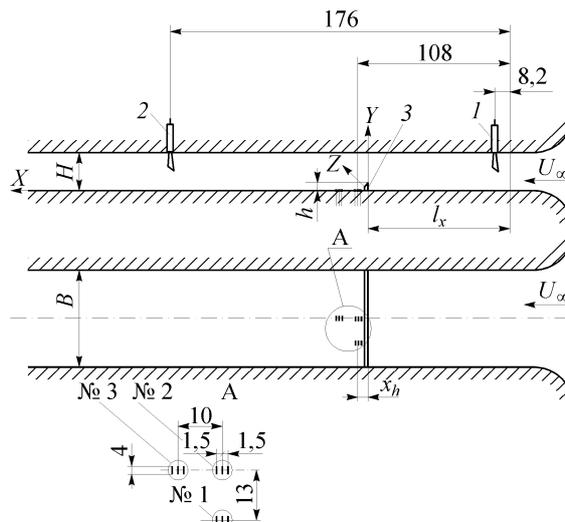


Рис. 2. Схема расположения выступа и датчиков в рабочем участке.

1, 2 — датчики скорости потока, 3 — выступ, №№ 1, 2, 3 — датчики продольной компоненты вектора поверхностного трения.

с использованием трехниточного пристеночного датчика [3], все три нити которого были выполнены из вольфрамовой проволоки диаметром 5 мкм и установлены на высоте 0,1 мм от стенки рабочего участка параллельно друг другу (см. рис. 2). Длина нитей — 2 мм. Центральная нить использовалась в качестве нагревательного элемента и являлась одновременно чувствительным элементом термоанемометра, т. е. служила для определения мгновенной величины продольной компоненты вектора поверхностного трения. Две боковые нити, расположенные на расстоянии 1,5 мм от центральной нити, работали в режиме термометров сопротивления. Они служили для определения мгновенного направления потока по тепловому следу от центральной нити. Работа датчика поддерживалась новой термоанемометрической аппаратурой ИРВИС-ТА5, разработанной авторами работы [4]. Аппаратура позволяла измерять мгновенную разность температуры двух нитей, знак которой однозначно определял направление пристенного течения. Взаимное расположение датчиков поверхностного трения показано на рис. 2 и выбрано из условия получения информации об изменении и взаимосвязи параметров течения по продольной и трансверсальной координатам. Изменение взаимного положения датчиков и выступа достигалось перемещением последнего.

В качестве объекта исследований структуры ламинарного отрыва потока использовался выступ, который занимал всю ширину рабочего участка установки, а его высота составляла 4 и 2,3 мм. Выступ был выполнен из металлической пластины толщиной 1,5 мм с заостренной верхней кромкой. Схема расположения выступа в рабочем участке и система координат, используемая для “привязки” положения светового ножа при проведении визуальных исследований и анализе результатов, показаны на рис. 2.

В экспериментах число Рейнольдса, вычисленное по скорости невозмущенного потока во входном сечении канала U_0 и его высоте H , изменялось в диапазоне $Re_H = 94 \dots 4240$. При этом число Рейнольдса, определенное по высоте выступа h и среднерасходной скорости потока в зазоре между выступом и стенкой канала, составляло $Re_h = 24 \dots 1060$ для $h = 4$ мм и $Re_h = 12 \dots 550$ для $h = 2,3$ мм. Отметим, что при $h = 4$ мм среднерасходная скорость в зазоре между выступом и стенкой канала составляла $1,25 U_0$, а при $h = 2,3$ мм — $1,13 U_0$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Перед проведением визуальных исследований были выбраны и экспериментально апробированы режимы работы системы визуализации, при которых температура воздуха в рабочем участке практически не изменяется, т. е. выделяемое на проволочках тепло расходуется главным образом на испарение масла.

Визуализация течения выполнялась в двух взаимно перпендикулярных плоскостях: xOy (плоскости симметрии рабочего участка установки) и xOz , расположенной параллельно и в непосредственной близости от стенки рабочего участка, на которой был установлен выступ. При этом выступ располагался на расстоянии $l_x = 105$ мм от входного сечения рабочего участка. Съемки проводились с использованием цифровой видеокамеры.

По результатам визуализации удалось получить приемлемую для анализа картину течения при скорости невозмущенного потока на входе в рабочий участок U_0 не более 0,8 м/с, что соответствует числу Рейнольдса $Re_h \leq 280$ при атмосферном давлении в рабочем участке.

Наблюдения за поведением струек дыма показали, что в широком диапазоне чисел Рейнольдса при номинально ламинарном внешнем потоке течение в пределах рециркуляционной области за выступом и перед ним является трехмерным: траектории струек искривляются, появляется движение в трансверсальном направлении. Отрывная область по ширине канала имеет выраженную трехъязычную структуру. Течение в рециркуляционной области не является стационарным. Внутренняя структура этой области постоянно меняется, имеют место низкочастотные колебательные движения потока. По данным визуальных наблюдений, увеличение числа Рейнольдса в диапазоне $Re_h = 24 \dots 280$ приводит к росту продольного размера области отрыва потока, что соответствует общепринятым представлениям. Фрагменты (стоп-кадры) результатов визуализации картины течения за выступом при $Re_h = 59$ для двух последовательных моментов времени $\Delta t = 0,4$ с, полученные после обработки соответствующего видеоизображения, показаны на рис. 3.

Отметим, что трехмерность отрывных течений и образование ячеистой структуры в пристеночной области наблюдалась отечественными и зарубежными исследователями при экспериментальном изучении ламинарного и турбулентного отрыва потока в различных конфигурациях [8–12]. В некоторых работах [8–9] указывается на существование некоторого “критического” числа Рейнольдса, выше которого трехмерная структура отрывного течения наиболее выражена.

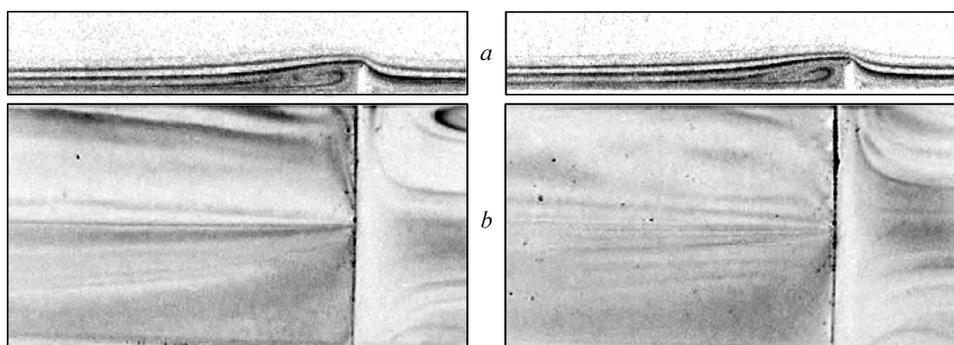


Рис. 3. Структура течения за выступом $h = 4$ мм в два последовательных момента времени при $l_x = 105$ мм и $Re_h = 59$ (направление потока — справа налево): в вертикальной плоскости (а), в горизонтальной плоскости вблизи стенки (б).

Обнаружено существенное влияние удлинения препятствий на формирование и количество вихревых ячеек в рециркуляционной области [11–12]. Высказаны предположения о возможном формировании продольных вихревых структур. Авторы склонны предполагать, что выявленные в настоящем исследовании трехмерные эффекты в значительной степени связаны с влиянием боковых стенок канала, и, следовательно, с поперечной неравномерностью профиля скорости и угловыми эффектами.

Представление о механизме возникновения и развития колебаний скорости потока в канале вниз по потоку от выступа можно составить на основе детального покадрового анализа результатов визуализации течения в плоскости симметрии рабочего участка. При $Re_h < 93$ область отрыва потока замкнута, а ее внутренняя структура слабо изменяется по времени. С увеличением числа Рейнольдса в сдвиговом слое в области присоединения потока появляются возмущения весьма малой амплитуды, которые, судя по приведенным ниже результатам измерений, не приводят к колебаниям скорости потока на оси канала. С увеличением числа Рейнольдса возмущения сдвигового слоя возрастают, а начало зарождения этих возмущений смещается вверх по потоку. При $Re_h = 160$ отчетливо видно, что на некотором расстоянии x_r от выступа сдвиговый слой теряет устойчивость и в нем начинают формироваться крупномасштабные вихревые структуры, которые сносятся вниз по потоку (см. рис. 4, *a*). С увеличением числа Рейнольдса положение начала области формирования этих структур смещается в сторону выступа (см. рис. 4, *b*). Анализ данных визуализации показал, что для $Re_h = 160$ и 230 число Рейнольдса, вычисленное по скорости набегающего потока и расстоянию от выступа до области начала потери устойчивости сдвигового слоя, остается неизменным и составляет $Re_x = x_r U_0 / \nu \approx 710$.

Результаты измерения скорости потока в рабочем участке при отсутствии выступа подтвердили, что во всем исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса в канале сохраняется ламинарный режим течения: на соответствующих осциллограммах пульсации скорости потока практически отсутствуют.

Данные измерений поверхностного трения за выступом подтвердили выводы о существенной трехмерности течения, сделанные по результатам визуальных наблюдений. Продольный размер области отрыва потока (расстояние от выступа до точки, в которой среднее значение продольной компоненты вектора поверхностного трения τ_x равно нулю) изменяется по трансверсальной координате, наиболее существенно — в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_h = 50 \dots 310$. На этих режимах отличие в длине отрывной области в плоскости симметрии канала и на расстоянии 10 мм от нее по ширине канала достигает 4...5 высот уступа. В качестве примера на рис. 5, *a* представлено распределение $c_{i,x} = f(x/h)$ для $Re_h = 125$. Здесь

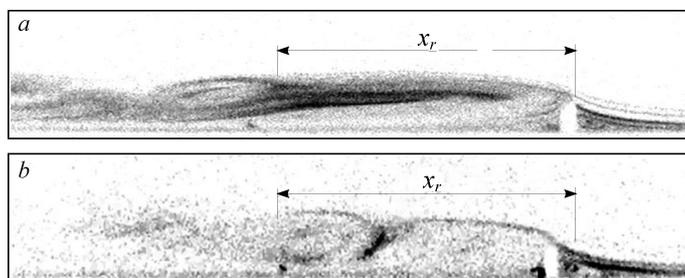


Рис. 4. Структура течения за выступом $h = 4$ мм в вертикальной плоскости при $l_x = 105$ мм: $Re_h = 160$ (*a*), 922 (*b*).

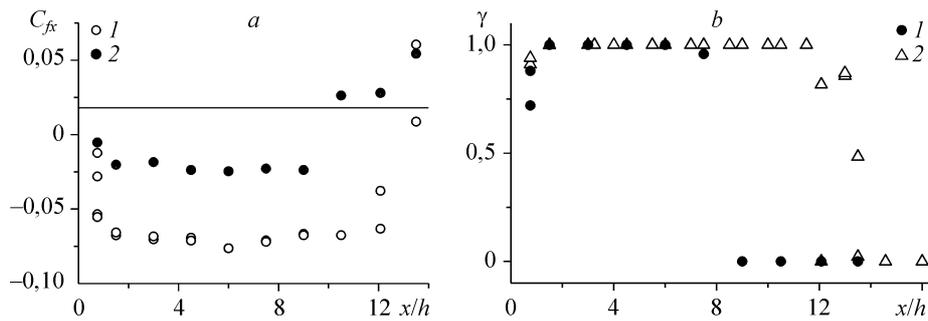


Рис. 5. Распределение продольной компоненты вектора поверхностного трения (а) и вероятности обратного течения γ (b) за выступом $h = 4$ мм при $Re_h = 125$: в плоскости симметрии рабочего участка (1), на расстоянии 13 мм по ширине участка от плоскости симметрии (2).

$c_{fx} = \tau_x / (\rho U_0^2 / 2)$, где ρ — плотность воздуха при рабочих условиях. На рис. 5 видно, что значения коэффициента поверхностного трения (скорости обратного течения вблизи стенки) в рециркуляционной зоне также существенно различаются по ширине канала. Кроме того, почти на всей протяженности области обратного течения, за исключением зоны присоединения потока и зоны вторичного вихря вблизи выступа, скорость потока вблизи стенки, по данным измерений, мало изменяется. Однако, если в некоторой части рециркуляционной области пристенное течение имеет преимущественно трансверсальное направление и вектор скорости потока почти параллелен термоанемометрической нити датчика трения, приведенное на рис. 5, а распределение $c_{fx} = f(x/h)$ может не вполне соответствовать истине, поскольку в описанной ситуации сигнал с датчика не отражает величину продольной компоненты вектора трения.

Распределение вероятности обратного течения γ для $Re_h = 125$ показано на рис. 5, b. Под вероятностью обратного течения понимается доля от всего времени измерений, в течение которого направление потока вблизи стенки противоположно внешнему течению. Отметим, что изменение γ от 1 до 0 происходит в достаточно узкой области по продольной координате, что свидетельствует о весьма малой амплитуде колебаний самой точки присоединения.

С увеличением числа Рейнольдса отмеченное отличие в положении точки присоединения потока по трансверсальной координате уменьшается и при $Re_h = 225$ составляет уже около одной высоты выступа. Снижается и разность в величине напряжения трения в отрывной области. С дальнейшим увеличением числа Рейнольдса различия в распределении $c_{fx} = f(x/h)$ в исследуемых сечениях по трансверсальной координате сначала уменьшаются, а затем исчезают (рис. 6, а).

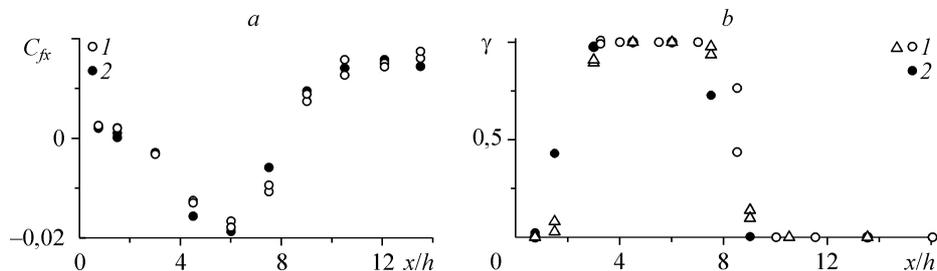


Рис. 6. Распределение продольной компоненты вектора поверхностного трения (а) и вероятности обратного течения γ (b) за выступом $h = 4$ мм при $Re_h = 1060$. Обозначения те же, что и на рис. 5.

Форма этого распределения все больше соответствует турбулентному режиму течения [5, 6]: в области обратного течения появляется выраженный минимум c_{fx} , а величина c_{fx} в этой области существенно изменяется. Распределение вероятности обратного течения $\gamma(x/h)$ соответствует характеру изменения c_{fx} (см. рис. 6, *b*).

Как уже упоминалось, отрыв потока в номинально ламинарном течении может инициировать более ранний переход к турбулентному режиму течения. Анализ результатов измерения скорости потока на оси рабочего участка, с расположенным на стенке канала выступом, показал, что при $Re_h \approx 160$ в канале вниз по течению от выступа появляются низкочастотные колебания скорости потока, частота которых увеличивается с ростом числа Рейнольдса. Осциллограммы скорости потока для $h = 4$ мм при расположении выступа на расстоянии $l_x = 105$ мм от входного сечения рабочего участка (см. рис. 2), показаны на рис. 7. В спектре пульсаций скорости для $Re_h \approx 160$ можно выделить два диапазона частот, в которых имеют место локальные максимумы пульсаций: $f_1 \approx 11 \dots 14$ Гц и $f_2 \approx 22 \dots 30$ Гц. Частота этих пульсаций, нормированная на скорость невозмущенного потока и высоту выступа, составляет в среднем 0,1 и 0,21 соответственно, что согласуется с результатами некоторых экспериментальных исследований [13]. С увеличением числа Рейнольдса отмеченные максимумы размываются и происходит постепенное заполнение более высокочастотной части спектра.

При $Re_h = 1060$ режим течения в канале приобретает черты развитой турбулентности: в распределении энергии пульсаций скорости по волновым числам можно выделить инерционный интервал, т. е. диапазон частот, в котором выполняется так называемый “закон $-5/3$ ” [7] (рис. 8, *b*). При меньших числах Рейнольдса инерционный интервал существенно уже (см. рис. 8, *a*).

На рис. 9 представлена экспериментальная зависимость интегрального линейного масштаба L_{int} пульсаций скорости потока на оси канала вниз по течению от выступа, отнесенного к высоте канала. Значения L_{int} определялись с использованием корреляционного анализа в предположении, что энергонесущие пульсации переносятся со среднерасходной скоростью течения. Как видно на рис. 9, в диапазоне $Re_h = 160 \dots 1060$ L_{int}/H мало изменяется и составляет приблизительно

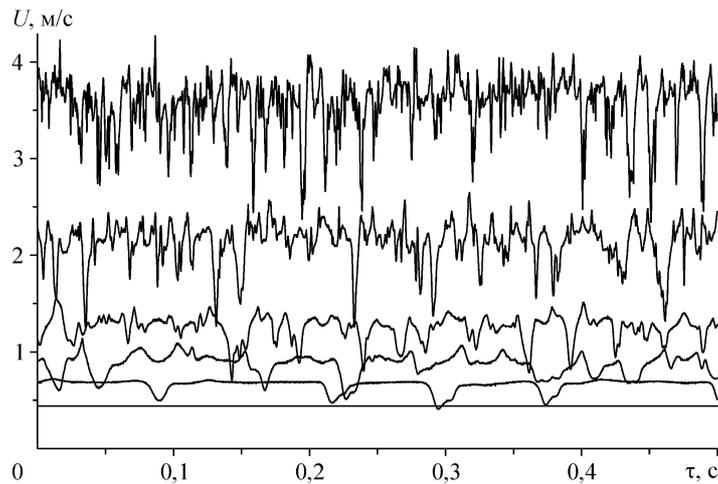


Рис. 7. Осциллограммы скорости потока на оси канала вниз по течению от выступа ($h = 4$ мм, $l_x = 105$ мм) для $Re_h = 93, 160, 230, 460, 740$ и 1060 .

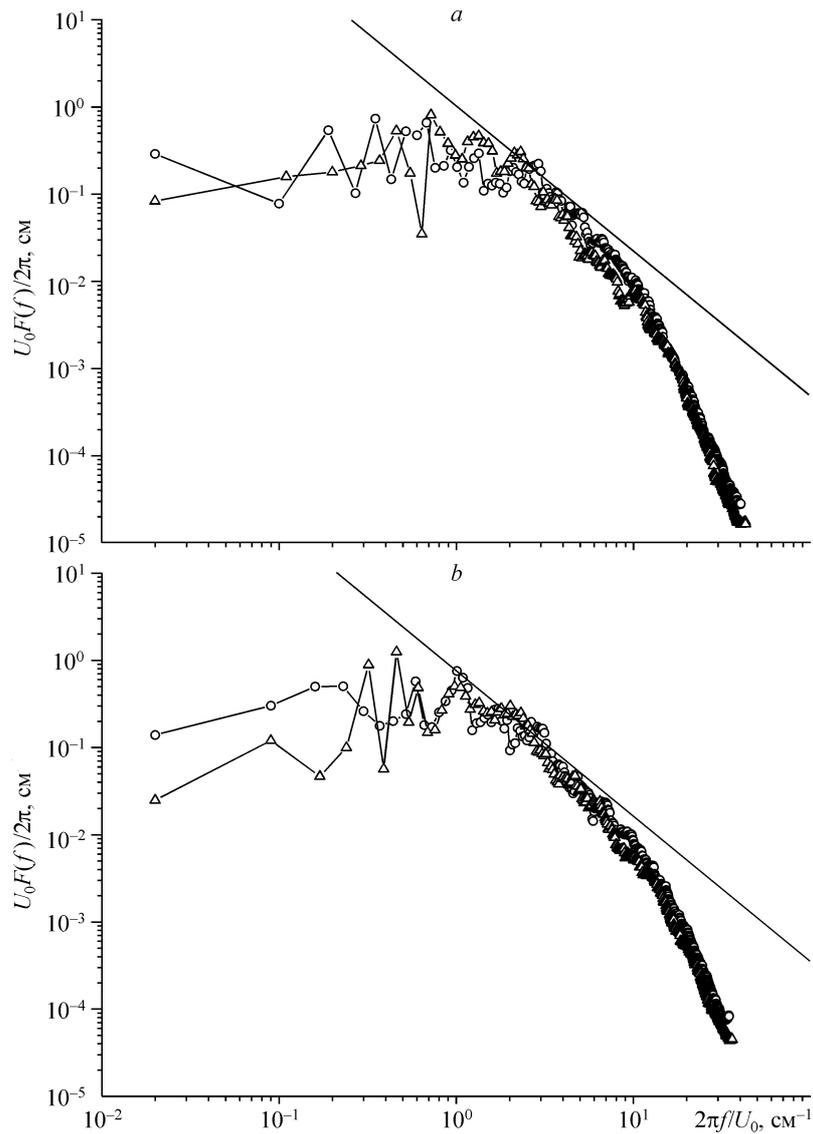


Рис. 8. Спектральные плотности продольных пульсаций скорости потока в рабочем участке вниз по течению от выступа ($h = 4$ мм, $l_x = 105$ мм): $Re_h = 875$ (а), 1060 (б). Точки — эксперимент, линия — $F(f) \sim f^{-5.3}$.

0,35...0,45 высоты канала независимо от высоты выступа. Таким образом, линейный интегральный масштаб пульсаций скорости потока в канале при возникновении и развитии возмущений, вызванных отрывом потока за выступом, определяется размерами (высотой) канала, а число Рейнольдса, при котором отрыв потока инициирует начало неустойчивости и переход к турбулентному режиму течения в канале, определяется высотой выступа.

Следует отметить, что при используемой в эксперименте геометрии канала в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса течение в канале соответствует начальному участку. Однако, как показала оценка, для выступа высотой $h = 4$ мм при $Re_h = 24 \dots 1600$, т. е. в диапазоне чисел Рейнольдса, существенно превышающем критическое значение, при котором в канале нарушается ламинарный режим

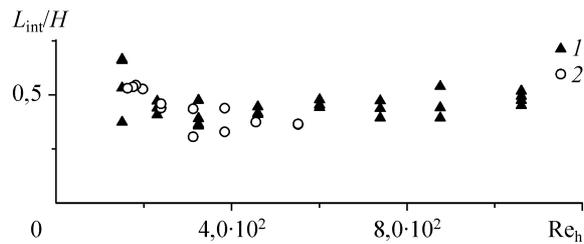


Рис. 9. Зависимость относительного линейного масштаба продольных пульсаций скорости потока на оси канала от числа Рейнольдса: $h = 4$ (1), 2,3 (2) мм.

течения (появляются низкочастотные колебания скорости потока), толщина пограничного слоя в месте установки выступа остается больше, чем высота выступа при всех его перемещениях. При высоте выступа $h = 2,3$ мм во всем исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса локальная толщина пограничного слоя остается больше, чем высота выступа.

3. ВЫВОДЫ

На основе визуальных исследований и термоанемометрических комбинированных измерений параметров потока в отрывном течении за выступом в канале при номинально ламинарном режиме течения, установлено следующее.

Течение в области отрыва потока является существенно трехмерным и нестационарным с выраженной ячеистой структурой и наличием зон с движением в трансверсальном направлении. Внутренняя структура этой области постоянно меняется, имеют место низкочастотные колебательные движения потока. Линия присоединения потока при $Re_h < 225$ значительно искривлена по ширине канала. На этих режимах амплитуда колебаний самой точки присоединения незначительна.

Отрыв потока за выступом инициирует появление низкочастотных колебаний скорости потока и начало перехода к турбулентному режиму течения в канале. Критическое число Рейнольдса, соответствующее началу развития неустойчивости течения в канале, составляет $Re_h \approx 160$. Основные признаки развитого турбулентного течения в канале начинают проявляться при $Re_h \approx 1000$ ($Re_H \approx 4000$). Линейный интегральный масштаб пульсаций скорости потока в канале при $Re_h > 160$ определяется размерами канала и слабо зависит от числа Рейнольдса.

Полученные результаты позволяют составить более ясное представление об эволюции пространственно-временной структуры отрывного течения за выступом в канале при номинально ламинарном режиме течения, в том числе и при развитии возмущений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойко А.В., Грек Г.Р., Довгаль А.В., Козлов В.В. Возникновение турбулентности в пристенных течениях. — Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН. 1999. — 328 с.
2. Довгаль А.В., Сорокин А.М. Неустойчивость течения в зоне отрыва ламинарного пограничного слоя к сходу периодических вихрей // Теплофизика и аэромеханика. — 2001. — Т. 8, № 2. — С. 189–197.
3. Алемасов В.Е., Глебов Г.А., Козлов А.П. Термоанемометрические методы исследования отрывных течений. — Казань: Казанский филиал АН СССР, 1990. — 178 с.

4. Davletshin I.A., Kratirov D.V., Mekeshkin S.M., Miheev N.I., Molochnikov V.M., Hayrnasov K.R. New hot-wire and thermometric apparatus // Proc. 13th Int. Conf. On the Methods of Aerophysical Research. Pt 3. — Novosibirsk: Publ. House "Parallel". — 2007. — P. 70–74.
5. Игон Д.К., Джонстон Дж.П. Обзор исследований дозвуковых турбулентных присоединяющихся течений // Ракетная техника и космонавтика. — 1981. — Т. 19, № 10. — С. 7–19.
6. Козлов А.П., Михеев Н.И., Молочников В.М., Сайкин А.К. Термоанемометрические измерения поверхностного трения в отрывных течениях. — Казань: АБАК, 1998. — 134 с.
7. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Ч. 2. — М.: Наука, 1967. — 720 с.
8. Armaly B.F., Li A., Nie J.H. Measurements in three-dimensional laminar separated flow // Inter. J. Heat Mass Transfer. — 2003. — No. 46. — P. 3573–3582.
9. Stüer H. Investigation of separation on a forward facing step / Schriftenreihe des Instituts für Hydromechanik und Wasserwirtschaft. — Zürich. — 1999. — Band 5. — 170 s.
10. Жак В.Д., Мухин В.А., Накоряков В.Е. Трехмерные вихревые структуры в кавернах // ПМТФ. — 1981. — № 2. — С. 54–58.
11. Терехов В.И., Ярыгина Н.И., Жданов Р.Ф. Особенности течения и теплообмена при отрыве потока за уступом и ребром. 1. Структура течения // ПМТФ. — 2002. — Т. 43, № 6. — С. 126–133.
12. Terekhov V.I., Yarygina N.I., Dyachenko A.Yu. Turbulent heat transfer in a cross flow cavity with inclined sidewalls // Proc. Twelfth Int. Heat Transfer Conf. Grenoble, France.– Aug. 18-23, 2002. — Heat Transfer. — 2002. — Vol. 2. — P. 615–619.
13. Диковская И.Д., Довгаль А.В., Сорокин А.М. Переход к турбулентности и образование регулярных вихрей в зоне отрыва пограничного слоя // Теплофизика и аэромеханика. — 1999. — Т. 6, № 1. — С. 27–36.
14. Довгаль А.В., Сорокин А.М. Экспериментальное моделирование периодического вихреобразования при отрыве течения за уступом поверхности // Теплофизика и аэромеханика. — 2002. — Т. 9, № 2. — С. 193–200.

Статья поступила в редакцию 28 января 2008 г.