

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С ИНТЕНСИФИКАТОРАМИ ТЕПЛООБМЕНА

В. М. Молочников, Н. И. Михеев, А. А. Паерелий

Исследовательский центр проблем энергетики Казанского научного центра РАН, Казань, Россия

Введение

В последние годы интерес к проблеме интенсификации теплообмена при ламинарном течении существенно вырос. Это вызвано необходимостью решения практических задач, возникающих при разработке компактных и ультракомпактных теплообменников, режим течения в которых априори ламинарный. Такие теплообменники находят применение для охлаждения элементов электроники, радарных устройств, лопаток турбин и т.д. Использование интенсификаторов теплообмена наиболее эффективно именно при ламинарном режиме течения [1]: в интенсифицированных каналах удается добиться увеличения коэффициента теплоотдачи в 2...6 раз по сравнению с гладким каналом, тогда как при турбулентном режиме – не более, чем в 1,26 раза. При этом отношение энергетических коэффициентов интенсифицированного и гладкого каналов (универсальный критерий Кирпичева, учитывающий затраты на прокачку теплоносителя) для ламинарного течения составляет 2...3,7, а для турбулентного – 1,08...1,1.

Систематизированное сопоставление эффективности промышленно перспективных типов интенсификаторов теплоотдачи при ламинарном течении было проведено в работе [2]. Для этих целей при расчете теплоотдачи и сопротивления интенсифицированных каналов использовались соответствующие уравнения подобия, полученные опытным путем и справедливые лишь в ограниченном диапазоне геометрических параметров интенсификаторов, свойств теплоносителей и условий течения. Несмотря на несомненную практическую значимость представленных в работе материалов, общая картина содержит еще множество "белых пятен" и плохо изученных областей. Так, практически не изучен целый ряд размеров и диапазонов взаимного положения интенсификаторов, крайне мало информации об автоколебательных режимах в каналах с интенсификаторами теплообмена, недостаточно данных о возникновении ламинарно-турбулентного перехода в таких каналах и последствиях этих явлений с позиций эффективности теплообмена. Картина течения и механизм интенсификации теплообмена в подобных каналах изучены недостаточно. В принципе, ламинарные течения сравнительно легко поддаются численному моделированию, но работа в этом направлении для интенсифицированных каналов только разворачивается. Имеющиеся на сегодняшний день расчетные методики не обеспечивают необходимой для практики степени достоверности прогнозирования параметров течений в каналах с элементами дискретной шероховатости. В сложившейся ситуации основным путем получения достоверной информации о характеристиках течения и теплообмена в этих условиях является эксперимент.

Как правило, обтекание интенсификаторов теплообмена сопровождается формированием локальных областей отрыва и присоединения потока. Несмотря на то, что априори отрыв ламинарного потока считается более простым как для экспериментального изучения, так и для численного моделирования, преобладающее

большинство исследований отрывных течений выполнено для случая турбулентного отрыва потока [3–5].

Исследование ламинарного отрыва потока тесно связано с другой важнейшей проблемой гидродинамики – определением границ ламинарно-турбулентного перехода под влиянием сильных возмущений, источником которых являются элементы дискретной шероховатости. Отрыв потока, который реализуется в интенсифицированных каналах при обтекании элементов дискретной шероховатости, является одним из факторов, стимулирующих возникновение турбулентности в пристенной области течения [6]. Поэтому даже при малых числах Рейнольдса, соответствующих номинально ламинарному режиму течения, после отрыва потока может происходить нарастание возмущений и последующий переход к турбулентности. Несмотря на очевидный прогресс в изучении проблемы ускоренного ламинарно-турбулентного перехода в дискретно шероховатых каналах, многое остается невыясненным. В литературе явно недостаточно экспериментальных данных о влиянии формы, размеров и взаимного положения элементов дискретной шероховатости, числа Рейнольдса на положение границ ламинарно-турбулентного перехода и характеристики потока в переходной области. Не ясно, при каких условиях переход происходит в пределах отрывной области, а при каких – ниже точки присоединения потока, и какое влияние оказывают эти явления на основную область течения в интенсифицированных каналах. Крайне мало результатов исследований динамики поведения областей отрыва потока за интенсификаторами теплообмена различной формы на ламинарном и переходном режимах течения, практически отсутствуют результаты визуализации потока в этих условиях. Нет данных о критических значениях параметров подобия, при которых в каналах с элементами дискретной шероховатости происходит ламинарно-турбулентный переход.

В настоящей работе представлены результаты визуализации и комбинированных измерений параметров потока в отрывном течении за единичным выступом и системой выступов (элементов дискретной шероховатости) в канале при номинально ламинарном режиме течения.

1. Экспериментальное оборудование и методика исследований

Схема экспериментальной установки, на которой проводились исследования, представлена на рис.1. Рабочий участок 2 установки имел прямоугольное поперечное сечение высотой 20 мм и шириной 50 мм со светопрозрачными стенками, был снабжен плавным входом, выполненным по лемнискате Бернулли, и располагался внутри герметичного корпуса 1. Расход воздуха в установке обеспечивался вакуумным насосом 6, который при помощи гибкого шланга 7 соединялся с выходным патрубком 8 рабочего участка. Воздух в корпус 3 и рабочий участок установки поступал через критические сопла 4, установленные на фланце 5 корпуса.

Для расширения диапазона изменения чисел Рейнольдса предусматривалась возможность создания в тракте установки необходимого разрежения. С этой целью в разьеме 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. Разрежение в рабочем участке контролировалось вакууметром 18. В экспериментах использовались поверенные критические сопла, обеспечивающие погрешность задания и измерения объемного расхода не более 0,25%.

Два светопрозрачных герметичных окна 10 и 12 с фланцами на боковой стенке корпуса 3 служили для установки устройства подсветки потока и выполнения

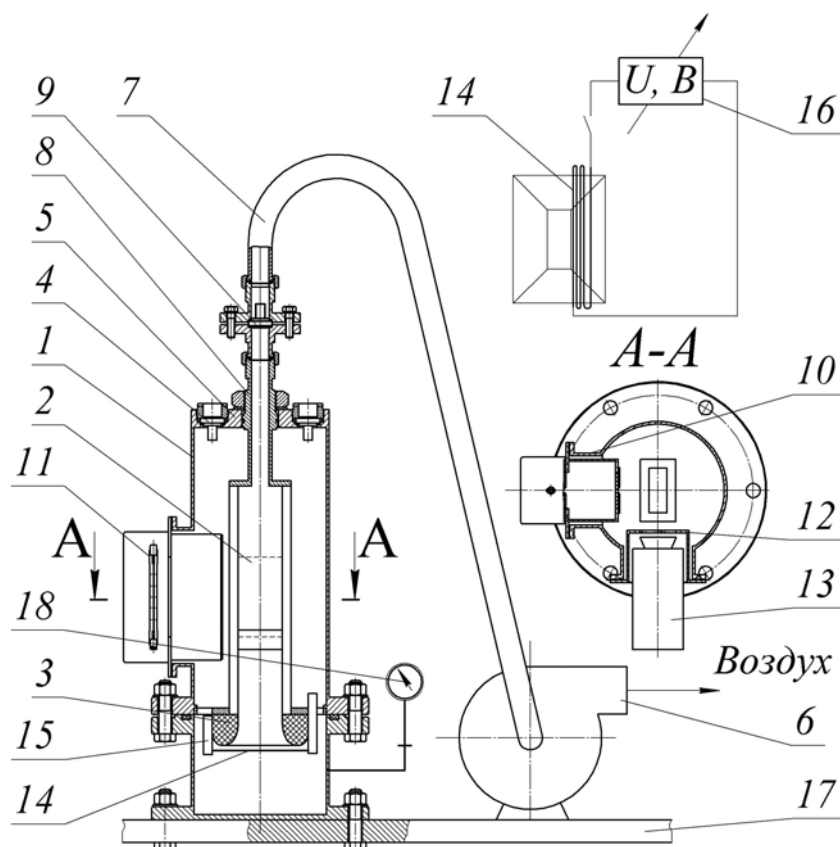


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – корпус; 2 – рабочий участок; 3 – входное устройство; 4 – критические сопла; 5 – фланец; 6 – вакуумный насос; 7 – гибкий шланг; 8 – выходной патрубок рабочего участка; 9 – критическое сопло; 10 – окно для установки устройства подсветки; 11 – лампа; 12 – окно для выполнения наблюдений; 13 – видеокамера; 14 – нихромовые проволочки; 15 – натяжитель нитей; 16 – регулятор напряжения; 17 – монтажный стол; 18 – вакуумметр

наблюдения и видеосъемки исследуемого течения. Подсветка выполнялась методом светового «ножа» с помощью лампы 11.

В исследованиях использовались два рабочих участка одинаковых размеров и идентичной конфигурации. Один из них был предназначен для проведения визуальных исследований, другой – для выполнения измерений.

Визуализация течения проводилась методом «дымящейся» проволочки: пять нихромовых проволочек 14 диаметром 0,2 мм каждая были установлены вблизи входного устройства рабочего участка. При пропускании через них импульса тока в результате быстрого испарения (сжигания) масла на проволочке образовывался узкий концентрированный дымовой след.

Рабочий участок, предназначенный для выполнения измерений параметров течения, был оснащен термоанемометрическими датчиками скорости потока, установленными на оси канала вблизи его входного и выходного сечений и термоанемометрическими датчиками для измерения продольной компоненты вектора поверхностного трения (рис.2).

Скорость потока измерялась нитяными термоанемометрическими датчиками с диаметром нити 5 мкм и длиной – 2 мм. Измерение продольной компоненты вектора поверхностного трения выполнялись с использованием трехниточного пристеночного датчика [7], все три нити которого были выполнены из вольфрамовой проволоки диаметром 5 мкм и установлены на высоте 0,1 мм от стенки рабочего участка

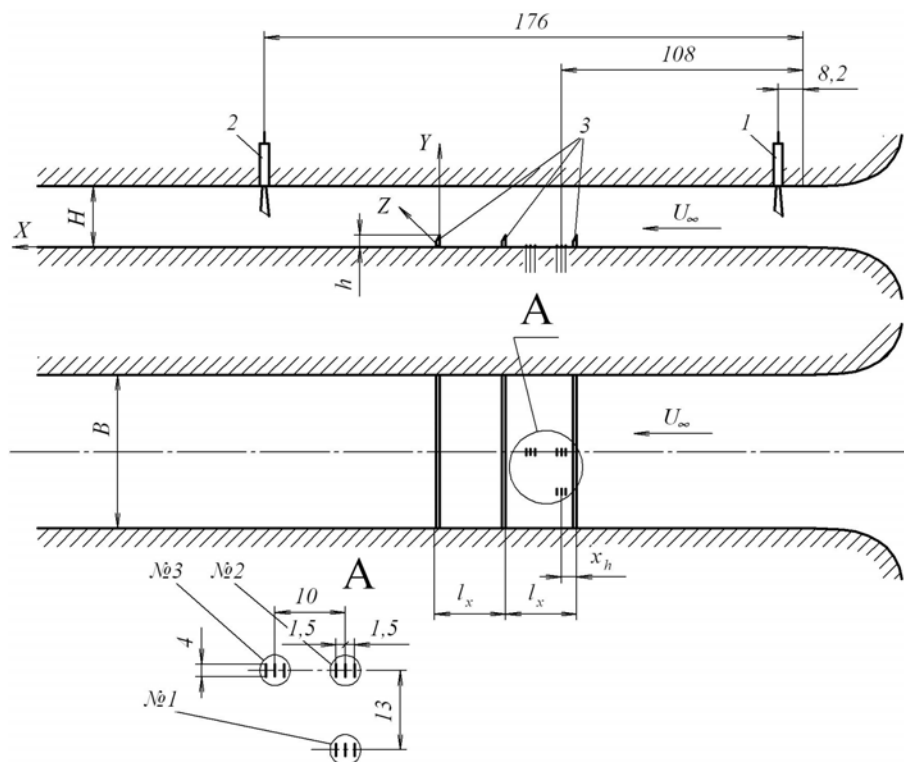


Рис.2. Схема расположения выступов и датчиков в рабочем участке: 1, 2 – датчики скорости потока; 3 – выступ; №№1, 2, 3 – датчики продольной компоненты вектора поверхностного трения

параллельно друг другу (см. рис.2). Длина нитей – 2 мм. Центральная нить использовалась в качестве нагревательного элемента и одновременно служила для определения мгновенной величины продольной компоненты вектора поверхностного трения. Две боковые нити, расположенные на расстоянии 1,0 мм от центральной, служили для определения мгновенного направления потока по тепловому следу от центральной нити. Работа датчика поддерживалась новой термоанемометрической аппаратурой ИРВИС-ТА5, разработанной авторами [8]. Аппаратура позволяла измерять мгновенную разность температуры двух нитей, по знаку которой однозначно определялось направление пристенного течения.

Скорость потока и степень разрежения в рабочем участке варьировалась при помощи комбинации критических сопел, установленных на входе в установку и выходе из рабочего участка. В качестве объектов исследования были выбраны одиночный выступ высотой $h = 4$ и $2,3$ мм и система из двух выступов высотой 4 мм каждый. Схема расположения выступов в рабочем участке и используемая в экспериментах система координат показаны на рис.2.

В экспериментах число Рейнольдса, вычисленное по скорости невозмущенного потока и высоте канала H , варьировалось в диапазоне $Re_H = 94 \dots 4240$. Расстояние между выступами изменялось от 2 до 8 высот выступа.

Визуализация течения выполнялась в плоскости xOy (плоскости симметрии рабочего участка установки) и в плоскости xOz , расположенной параллельно стенке рабочего участка, на которой был установлен выступ в непосредственной близости от нее. Съёмки проводились с использованием цифровой видеокамеры.

2. Результаты исследования

По результатам визуализации удалось получить приемлемую для анализа картину течения при скорости невозмущенного потока в рабочем участке U_0 не более 0,8 м/с, что соответствует числу Рейнольдса $Re_h \leq 280$, рассчитанному по высоте выступов h и среднерасходной скорости потока в зазоре между выступами и стенкой канала при атмосферном давлении в рабочем участке.

Анализ результатов визуализации показал, что в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса при номинально ламинарном потоке перед выступом (системой выступов) течение в пределах рециркуляционной области за выступом и между ними является трехмерным. Отрывная область по ширине канала имеет выраженную трехъячеистую структуру, совершающую низкочастотные колебательные движения. С увеличением числа Рейнольдса в диапазоне $Re_h = 24 \dots 280$ продольный размер области отрыва потока за единичным выступом возрастает, что согласуется с общепринятыми представлениями.

При величине шага расположения выступов до $(4 \dots 5)h$ структура течения между ними состоит из одиночного крупномасштабного вихря, который при вращении совершает низкочастотные колебательные движения. С увеличением шага вихрь вытягивается в продольном направлении, а перед расположенным ниже по потоку выступом формируется вторичный вихрь существенно меньших размеров. Более отчетливо описанная эволюция вихревой структуры проявляется при меньших числах Рейнольдса. На рис.3–4 показаны полученные после обработки соответствующего видеоизображения фрагменты (стоп-кадры) результатов визуализации картины течения при обтекании системы из двух выступов при $Re_h = 59$ для двух последовательных моментов времени и трех значений расстояния между выступами.

Выявленные в результате визуализации особенности пространственно-временной структуры течения подтверждаются данными измерений продольной компоненты вектора поверхностного трения за единичным выступом. Измерения проводились при числах Рейнольдса $Re_h = 24 \dots 1060$, т.е. в более широком диапазоне, чем визуальные исследования. Установлено, что продольный размер отрывной области X_R изменяется по трансверсальной координате (по ширине канала). Здесь X_R – расстояние от выступа до точки, в которой среднее значение продольной компоненты вектора поверхностного трения τ_x обращается в нуль. Наиболее значительные различия X_R в плоскости

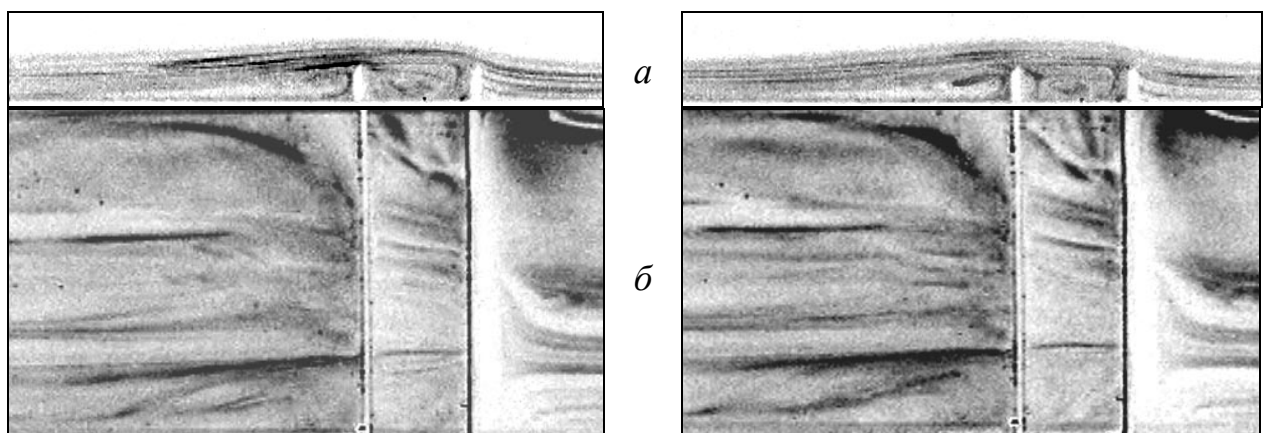


Рис.3. Структура течения за выступами ($l_x = 3,7h$) в два последовательных момента времени при $Re_h = 116$ (направление потока – справа налево): *a* – в вертикальной плоскости, *б* – в горизонтальной плоскости вблизи стенки

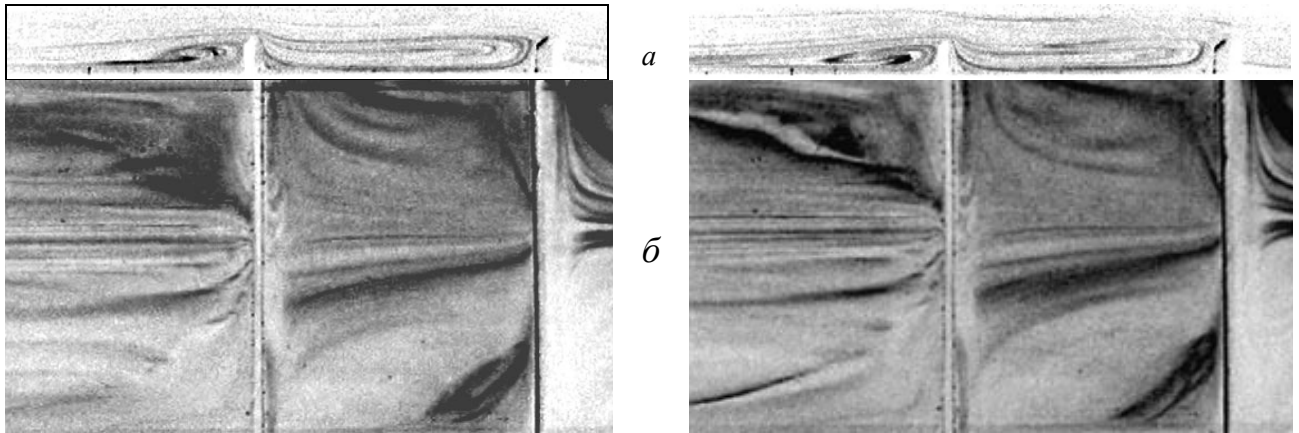


Рис.4. Структура течения за выступом ($l_x = 8,8h$) в два последовательных момента времени при $Re_h=116$ (направление потока – справа налево): *а* – в вертикальной плоскости, *б* – в горизонтальной плоскости вблизи стенки

симметрии канала (датчики трения №2 и 3, рис.2) и на расстоянии 10 мм от нее по ширине канала (датчик №1) наблюдаются в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_h = 50 \dots 310$ и составляют $(4 \dots 5)h$ (рис.5). Отличие значений X_R можно оценить и по распределению вероятности обратного течения γ (доля от всего времени измерений, в течение которого направление потока вблизи стенки противоположно внешнему течению), полученному по результатам измерений мгновенных локальных значений продольной компоненты вектора трения. Распределение $\gamma(x/h)$ для $Re_h = 125$ показано на рис.6. Одной из возможных причин выявленного эффекта, на наш взгляд, является существенная (в ламинарном течении) неравномерность профиля скорости потока перед выступом (системой выступов) по трансверсальной координате. Отметим, что с увеличением числа Рейнольдса различие в значениях X_R по ширине канала существенно снижается и практически исчезает приблизительно при $Re_h \geq 400$ (рис.7).

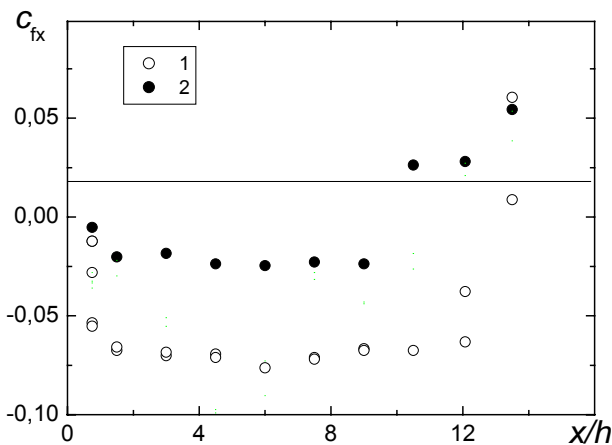


Рис.5. Распределение продольной компоненты вектора поверхностного трения за выступом при $Re_h=125$: 1 – в плоскости симметрии рабочего участка; 2 – на расстоянии 13 мм по ширине участка от плоскости симметрии

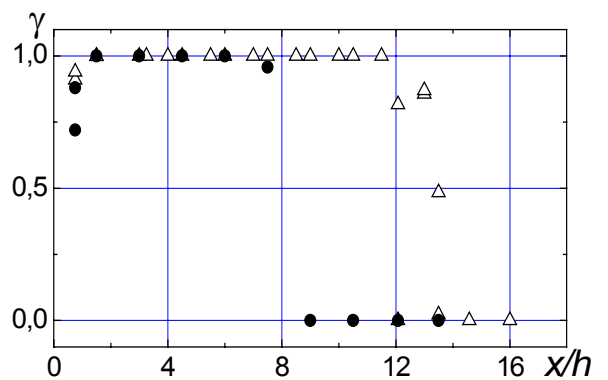


Рис.6. Распределение вероятности обратного течения за выступом при $Re_h=125$. Обозначения те же, что и на рис.5

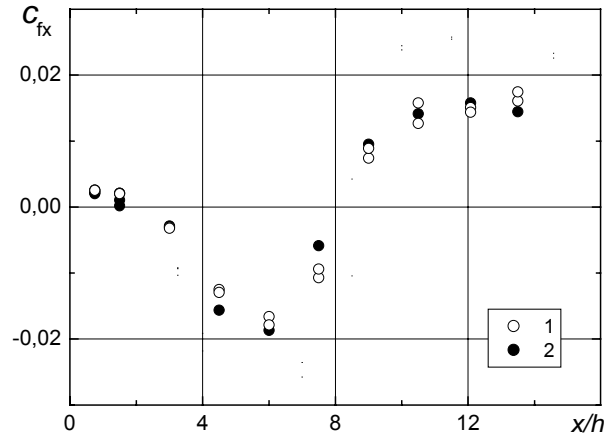


Рис.7. Распределение продольной компоненты вектора поверхностного трения за выступом при $Re_h=1060$. Обозначения те же, что и на рис.5.

Как показали данные измерений скорости потока на оси канала, в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса при отсутствии выступов режим течения в канале – ламинарный. При наличии единичного выступа уже при $Re_h \approx 160$ вниз по течению от выступа появляются низкочастотные колебания скорости потока. Этот результат получен для обоих значений высоты выступа $h = 2,3$ и 4 мм. Таким образом, критическое число Рейнольдса, при котором отрыв потока за выступом инициирует начало перехода к турбулентному режиму течения в канале, составляет $Re_h \approx 160$. Развитие возмущений с увеличением числа Рейнольдса можно проследить по приведенным на рис.8 осциллограммам скорости потока для $h = 4$ мм. Как видно из рисунка, с ростом Re_h частота пульсаций скорости существенно возрастает и при $Re_h = 1060$ режим течения в канале приобретает черты развитой турбулентности. Об этом свидетельствует тот факт, что при этом значении Re_h в распределении энергии пульсаций скорости по волновым числам можно выделить инерционный интервал, т.е. диапазон частот, в котором выполняется так называемый «закон $-5/3$ » [9] (рис.9). При меньших числах Рейнольдса инерционный интервал существенно уже.

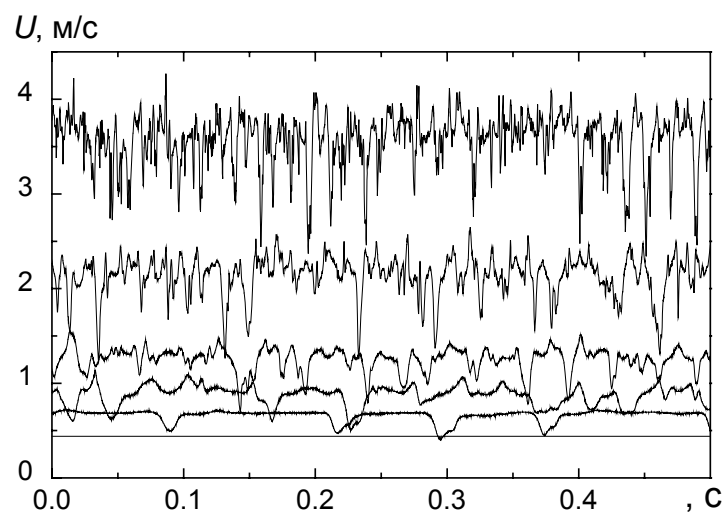


Рис.8. Осциллограммы скорости потока на оси канала вниз по течению от выступов для $Re_h = 93; 160; 230; 325; 460; 740$ и 1060

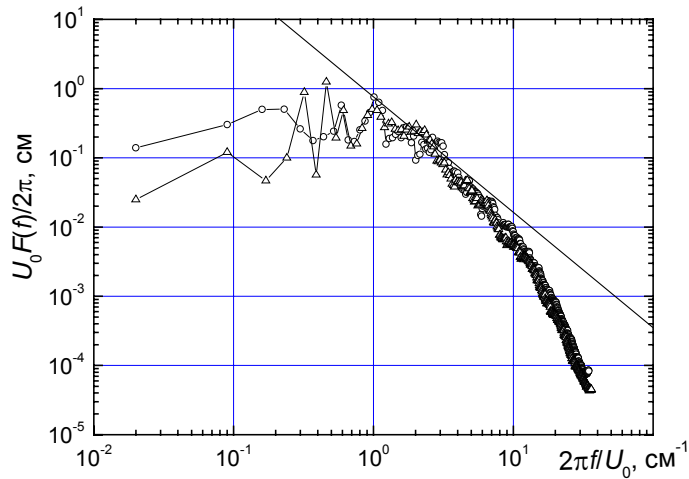


Рис.9. Спектральные плотности продольных пульсаций скорости потока в рабочем участке вниз по течению от выступа при $Re_h=1060$. Точки – эксперимент, линия – $F(f) \sim f^{5/3}$

На рис.10 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} были определены с использованием корреляционного анализа в предположении, что энергонесущие пульсации переносятся со среднерасходной скоростью течения. Как видно из рисунка, в диапазоне $Re_h = 160 \dots 1060$ L_{int}/H мало изменяется и составляет приблизительно $0,35 \dots 0,45$ 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.

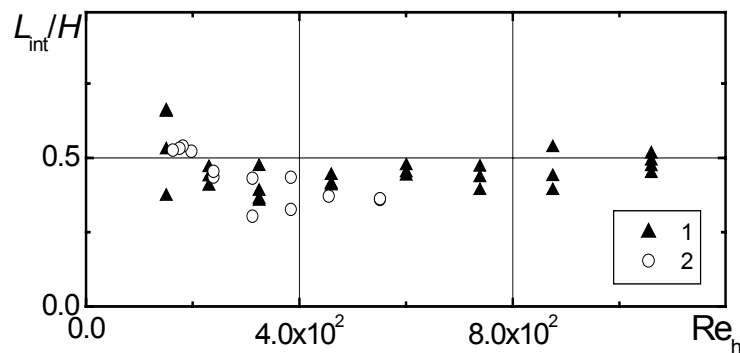


Рис.10. Зависимость относительного линейного масштаба продольных пульсаций скорости потока на оси канала от числа Рейнольдса: 1 – $h = 4$ мм; 2 – 2,3

Выводы

Таким образом, визуализация течения и термоанемометрические комбинированные измерения параметров потока в отрывном течении за выступом и системой выступов в канале при номинально ламинарном режиме течения позволили установить, что течение в областях отрыва потока является существенно трехмерным и нестационарным с выраженной ячеистой структурой и наличием зон с движением в трансверсальном направлении. Изменение внутренней структуры отрывных областей сопровождается низкочастотными колебательными движениями потока. Линия присоединения потока при $Re_h < 225$ значительно искривлена по ширине канала.

Отрыв потока за выступом инициирует более ранний переход к турбулентному режиму течения в канале. Критическое число Рейнольдса, соответствующее началу развития неустойчивости, составляет $Re_h \approx 160$.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№№06-08-00521, 07-08-00330) и ведущей научной школы (грант НШ-8574.2006.8).

Литература

1. Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В., Байгалиев Б.Е. Теплогидравлический расчет и проектирование оборудования с интенсифицированным теплообменом. Казань: Изд-во Казан. Гос. техн. ун-та, 2004. 432 с.
2. Леонтьев А.И., Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В., Попов И.А. Эффективные интенсификаторы теплоотдачи для ламинарных (турбулентных) потоков в каналах энергоустановок // Изв. РАН. Энергетика.– 2005.– №1.– С.75-91.
3. Итон Д.К., Джонстон Дж.П. Обзор исследований дозвуковых турбулентных присоединяющихся течений // Ракетная техника и космонавтика.- 1981.- Т.19, №10.- С.7-19.
4. Козлов А.П., Михеев Н.И., Молочников В.М., Сайкин А.К. Характеристики вектора поверхностного трения в турбулентных отрывных и присоединяющихся течениях // Известия РАН. Энергетика.-1998. -№4. -С.3-31.
5. Simpson R.L., Chen Y.-T., Shivaprasad B.G. The structure of a separating turbulent boundary layer. Part 1,2 // J. Fluid Mech.- 1981.- Vol.113.- P.23-73.
6. 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.
7. Алемасов В.Е., Глебов Г.А., Козлов А.П. Термоанемометрические методы исследования отрывных течений. - Казань: Казанский филиал АН СССР.- 1990.- 178 с.
8. Davletshin I.A., Kratirov D.V., Mekeshkin S.M., Miheev N.I., Molochnikov V.M., Naumasonov 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
9. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Ч.2. М.: Наука. 1967. 720 с.