

ЗАВИСИМОСТЬ СТРУКТУРЫ ПЕРЕХОДНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ ЗА ПОПЕРЕЧНЫМ ВЫСТУПОМ ОТ ФОРМЫ ВЫСТУПА

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

Исследовательский центр проблем энергетики Казанского научного центра РАН,

г. Казань, Россия, ул.Лобачевского 2/31, e-mail: vmolochnikov@mail.ru

Представлены результаты комплексных экспериментальных исследований обтекания полуцилиндрического выступа и тонкого поперечного выступа (ребра) в канале на ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения. Эксперименты включали дымовую визуализацию, термоанемометрические измерения локальных значений скорости и PIV-измерения мгновенных векторных полей скорости и завихренности потока за выступом. Получены данные об эволюции кинематической и вихревой структуры потока и полей статистических параметров течения в канале с поперечным выступом в зависимости от формы выступа. Особое внимание уделяется процессам формирования крупномасштабных вихревых структур в слое смешения за выступом на поздних стадиях перехода к турбулентности. Выполнена оценка линейного интегрального масштаба этих структур, частоты их образования и скорости конвективного переноса. Представлено описание наиболее вероятных сценариев эволюции крупных вихрей в области присоединения потока. Обсуждаются вопросы эффективности использования полуцилиндрических выступов для интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования и систем охлаждения на номинально ламинарных режимах течения.

Введение

На сегодняшний день и в ближайшие десятилетия теплоэнергетика останется базовой отраслью производства энергии. В этих условиях важнейшей задачей является увеличение коэффициента полезного действия генерирующего энергетического оборудования. Одним из основных направлений решения этой задачи является увеличение тепловой нагрузки на элементы энергетических установок, что влечет за собой необходимость использования высокоэффективных способов охлаждения теплонапряженных элементов установок при помощи различных способов интенсификации теплообмена. Не менее важной задачей является

рациональное использование произведенной энергии, решение которой связано с повышением теплогидравлической эффективности теплообменников и систем охлаждения, применяемых на всех этапах транспортировки, распределения и использования энергии.

К наиболее эффективным способам увеличения теплоотдачи относится использование пристенных интенсификаторов теплообмена. Несмотря на значительное внимание, уделяемое проблеме повышения в ведущих научных центрах и большое количество экспериментальной информации о результатах применения различных типов интенсифицированных каналов, задача повышения теплогидравлической эффективности теплообменного оборудования далека от разрешения [1].

Номинально ламинарные режимы течения теплоносителя являются весьма привлекательными с точки зрения интенсификации теплоотдачи. Именно на этих режимах пристенные интенсификаторы позволяют обеспечить существенно более высокий, по сравнению с турбулентным режимом течения, прирост теплогидравлической эффективности каналов теплообменного оборудования. При этом лучшие результаты получены при использовании в качестве интенсификаторов теплоотдачи поперечных выступов [2]. Форма выступов оказывает существенное влияние на структуру течения в пристенной области и, как следствие, теплоотдающую способность поверхности теплообмена [3-6]. С точки зрения снижения затрат на прокачку теплоносителя плавно очерченные поперечные выступы представляются наиболее оптимальными. Однако эффективность выступов такой формы в условиях перехода к турбулентности неочевидна. Неясно даже, сопровождается ли переход к турбулентности при обтекании плавно очерченных выступов формированием крупномасштабных вихревых структур, роль которых в переносе тепла значительна.

В настоящей работе представлены результаты сравнительных экспериментальных исследований обтекания полуцилиндрического и тонкого поперечного выступа (ребра) в канале в диапазоне чисел Рейнольдса, охватывающем ламинарный, переходный и турбулентный режимы. Эксперименты включали дымовую визуализацию потока, выполненную с использованием скоростной видеокамеры, термоанемометрические измерения

локальных значений скорости в канале за выступом и PIV-измерения мгновенных векторных полей скорости и завихренности.

1. Экспериментальное оборудование и методика проведения исследований

Исследования проводились в рабочем участке прямоугольного поперечного сечения 20×50 мм и длиной 250 мм, снабженном плавным входом, выполненным по лемнискате Бернулли (рис.1). На широкой стенке участка на расстоянии 100 мм от его входного сечения устанавливалось препятствие в форме тонкого поперечного выступа (ребра) высотой $h = 4$ мм, либо плавноочерченного выступа полуцилиндрической формы радиусом (высотой) 3 мм. Выступ занимал всю ширину рабочего участка. Движение воздуха в рабочем участке обеспечивалось вакуумным насосом. Значение расхода на соответствующем режиме течения задавалось при помощи критических сопел с погрешностью не более 0,25%. Критический перепад давления на соплах контролировался вакуумметром.

Для визуализации течения использовался метод дымящейся проволоочки, в котором тонкие нихромовые проволоочки с нанесенным на них слоем масла устанавливались вблизи образующей плавного входа I (рис.1) рабочего участка. При пропускании через проволоочки

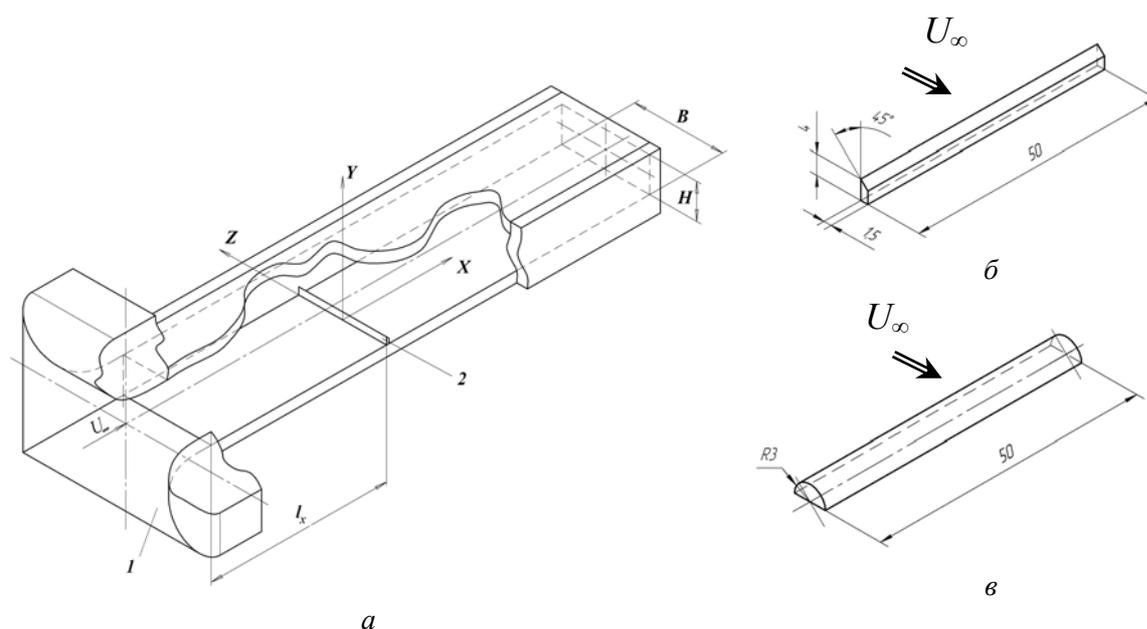


Рис.1. Схемы рабочего участка (а) и тонкого (б) и полуцилиндрического (в) выступов: I – плавный вход; 2 – выступ

тока масло испарялось, и в потоке формировалась струйка дыма. Видеосъемка картины обтекания выступов проводилась высокоскоростной монохромной видеокамерой Fastec HiSpec, снабженной светосильным объективом Navitar 1''F/0.95 с фокусным расстоянием 25 мм и ручным управлением фокусировкой. Скорость съемки составляла 506 кадр/с при разрешении кадра (1280×1024 пикселя), а продолжительность съемки – 3,2 с.

Мгновенные локальные скорости потока измерялись при помощи двух нитяных термоанемометрических датчиков, один из которых устанавливался на расстоянии 176 мм вниз по потоку от входа в рабочий участок (76 мм от выступа) на оси канала, а второй – на расстоянии 134 мм от входа (34 мм от выступа) на 2 мм от нижней стенки канала. Положение второго датчика приблизительно соответствовало области присоединения потока. Работа датчиков поддерживалась термоанемометрической аппаратурой DISA 55M.

Измерения мгновенных векторных полей скорости потока выполнялись системой «ПОЛИС», в которой реализован метод цифровой трассерной визуализации PIV (Particle Image Velocimetry). В качестве трассеров использовался водный раствор глицерина. Характерный размер сетки векторов составлял 128×128 узлов.

В экспериментах число Рейнольдса, вычисленное по высоте выступа, изменялось в диапазоне $Re_h = U_1 h / \nu = 66 \dots 3134$, где U_1 – скорость в зазоре между выступом и стенкой канала.

2. Результаты исследований и обсуждение

Анализ результатов визуализации течения показал, что отрыв потока за препятствием с ростом числа Рейнольдса сопровождается потерей устойчивости сдвигового слоя и формированием крупномасштабных поперечных вихревых структур. Значение числа Рейнольдса $Re_{h\text{кр}1}$, ниже которого течение в отрывной области за препятствием сохраняет ламинарный характер, составляет для ребра $Re_{h\text{кр}1} \approx 130$, а для полуцилиндрического выступа $Re_{h\text{кр}1} \approx 105$. При достижении некоторого значения числа Рейнольдса $Re_{h\text{кр}2}$ в сдвиговом слое как за ребром, так и за полуцилиндрическим выступом начинается формирование крупномасштабных поперечных вихревых структур. Для ребра $Re_{h\text{кр}2} \approx 150$, а для полуцилиндрического выступа $Re_{h\text{кр}2} \approx 170$. Таким образом, полученные данные убедительно

свидетельствуют, что крупномасштабные вихревые структуры, роль которых в процессах переноса импульса и тепла значительна, формируются на поздних стадиях перехода к турбулентности и при обтекании плавноочерченных выступов. Существенным отличием обтекания полуцилиндрического выступа является то обстоятельство, что диапазон изменения числа Рейнольдса, в пределах которого происходит развитие неустойчивости сдвигового слоя, заканчивающееся формированием крупномасштабных квазипериодических вихревых структур, существенно шире, чем в случае тонкого выступа (ребра). Для полуцилиндрического выступа этот процесс можно проследить по представленным на рис.2 результатам дымовой визуализации течения. Поперечные колебания струек дыма за выступом, свидетельствующие о первых признаках конвективной неустойчивости сдвигового слоя, проявляются при $Re_h > 105$. С увеличением числа Рейнольдса амплитуда этих колебаний возрастает (рис.2,б), затем струйки приобретают форму гребешков (рис.2,в), а при $Re_h = Re_{h\text{кр}2} = 170$ в сдвиговом слое начинается формирование крупномасштабных поперечных вихревых структур (рис.2,г). Полученные результаты позволяют утверждать, что процесс формирования крупномасштабных вихревых структур в отрывном течении на поздних стадиях ламинарно-турбулентного перехода имеет конвективную природу. Можно предположить, что образование вихрей в сдвиговом слое «запускает» механизм обратной связи, и дальнейшее развитие этого процесса обусловлено уже глобальной неустойчивостью всей отрывной области. Именно этот механизм получил в литературе название «неустойчивость к сходу вихря».

Визуализация течения позволила выявить и описать основные сценарии эволюции крупномасштабных вихревых структур в области присоединения потока, для каждой формы выступа определить диапазоны чисел Рейнольдса, в пределах которых реализуются эти сценарии, а также получить некоторую количественную информацию о процессе формирования вихрей.

Согласно первому сценарию, крупные вихри, сформированные в сдвиговом слое, сносятся в направлении внешнего течения, двигаясь на некотором удалении от стенки и практически не взаимодействуя друг с другом. При развитии второго сценария один из сформированных в сдвиговом слое вихрей приближается к стенке, теряет скорость и под

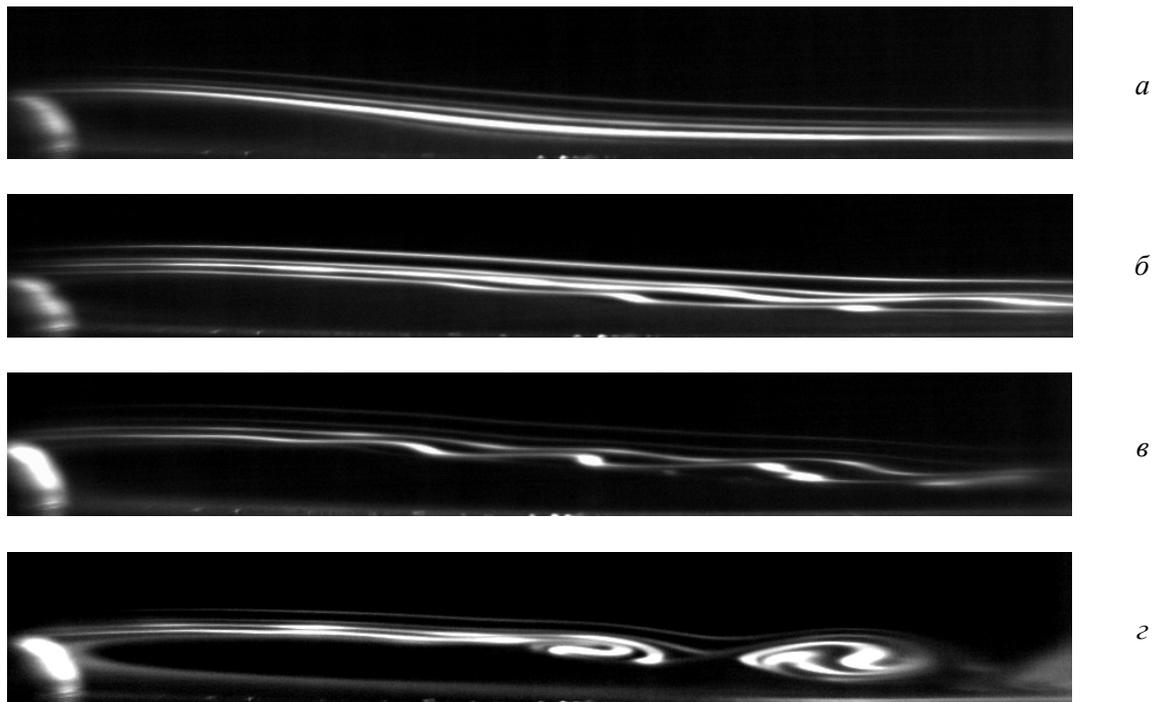


Рис.2. Развитие течения за полуцилиндрическим выступом при переходе к турбулентности: *a* – $Re_h=100$; *б* – 163; *в* – 196 – 230

действием движущегося над ним следующего вихря вытягивается в направлении потока, затем разделяется на две части меньших размеров (причем для разных вихрей эти части могут иметь разные пропорции), одна из которых продолжает движение с внешним потоком, а вторая попадает в область возвратного течения и перемещается вблизи стенки в сторону выступа. Описанные сценарии реализуются в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_h \approx 150 \dots 325$ для тонкого поперечного выступа и $Re_h \approx 170 \dots 750$ включительно – для полуцилиндрического выступа. Следует отметить, что, наряду с описанными сценариями, для выступов обеих форм наблюдались и единичные факты слияния пар поперечных вихрей в сдвиговом слое при $Re_h > 230$ для полуцилиндрического выступа и $Re_h > 320$ – для ребра. Важным различием обтекания выступов с точки зрения влияния их формы на теплоперенос является то обстоятельство, что относительный размер вихрей за ребром выше, чем за полуцилиндрическим выступом, однако в последнем

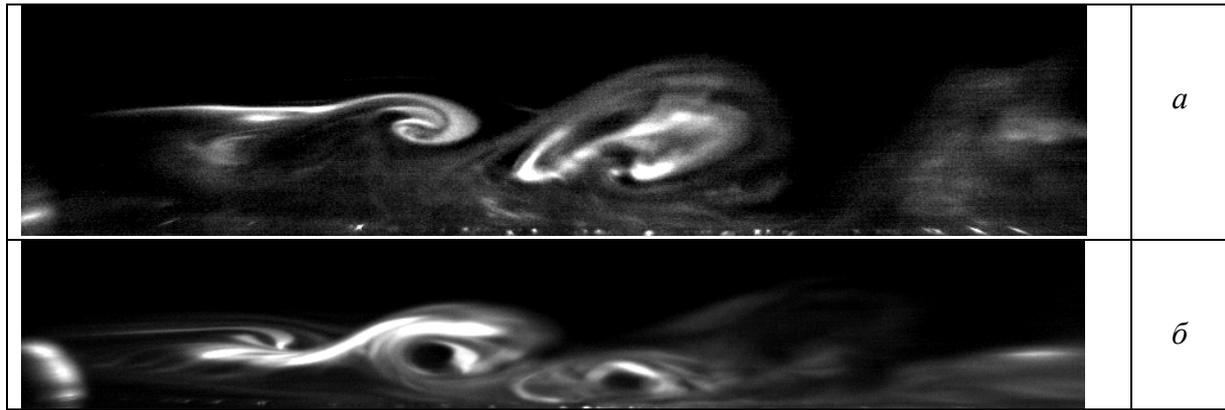


Рис.3. Формирование крупномасштабных вихревых структур за ребром (а) и полуцилиндрическим поперечным выступом (б) при $Re_h = 320$

случае вихри движутся ближе к стенке (рис.3).

По данным визуализации также установлено, что частота f образования вихрей при увеличении числа Рейнольдса растет: для ребра – от $f = 12 \dots 13$ Гц при $Re_h = 130$ до $f \approx 60$ Гц при $Re_h = 330$; а для полуцилиндрического выступа – от $f = 55 \dots 60$ Гц при $Re_h = 170$ до $f \approx 240$ Гц при $Re_h = 460$. Скорость конвекции U_k крупномасштабных вихревых структур в начальной стадии их формирования составляет приблизительно 0,6 скорости невозмущенного потока и увеличивается вниз по течению до 0,9...0,95 этой скорости.

Результаты термоанемометрических измерений подтвердили данные визуализации течения в части критических значений числа Рейнольдса: при $Re_h \geq Re_{h\text{кр}2}$ максимумы в спектрах пульсаций скорости в основном соответствуют частотам формирования вихрей, определенным по результатам визуализации.

Мгновенные векторные поля скорости u и завихренности потока $\omega_z = (\partial v / \partial x - \partial u / \partial y)$, полученные с помощью метода PIV, хорошо согласуются с результатами визуализации течения, что является дополнительным подтверждением достоверности

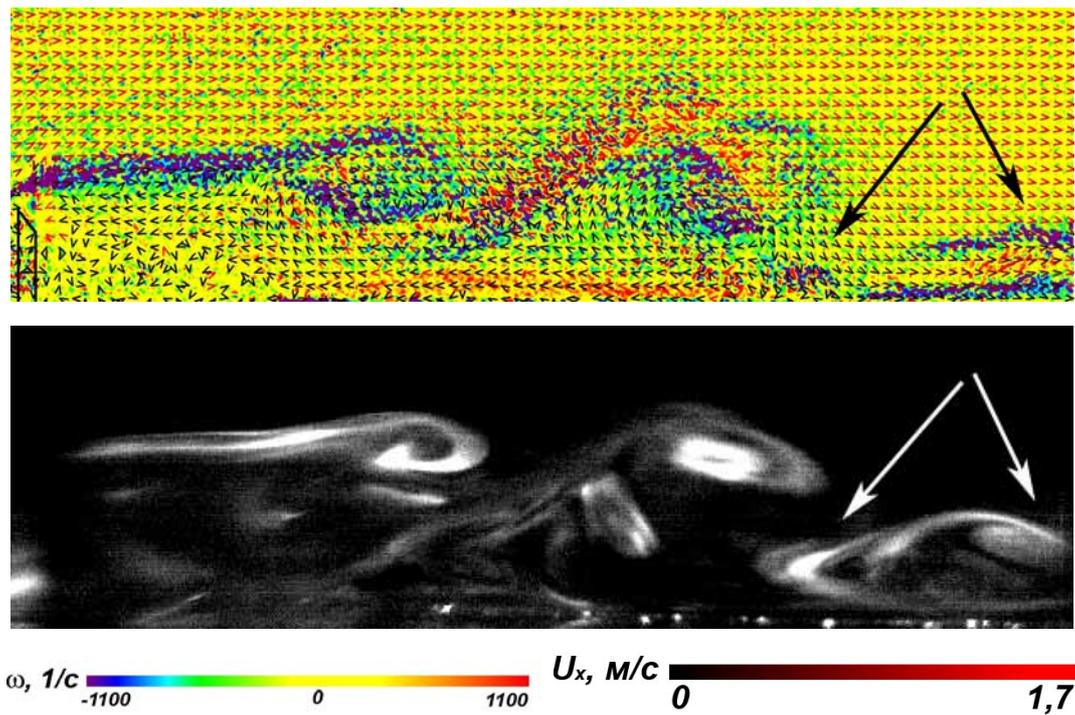


Рис.4. Сопоставление фрагментов визуализации течения за ребром и данных PIV-измерений мгновенного векторного поля скорости и завихренности при $Re_h=325$

полученных данных. Сравнение характерных фрагментов поля течения за ребром на одинаковых режимах приведены на рис.4. Обработка результатов измерения мгновенных векторных полей скорости потока за выступами обеих форм позволили выявить некоторые закономерности распределения статистических характеристик полей скорости потока за выступами в условиях ламинарно-турбулентного перехода. Статистические параметры течения оценивались по результатам осреднения данных 1000 измерений. Установлено, что уровень вторых моментов пульсаций скорости $\langle u'u' \rangle$ и $\langle u'v' \rangle$ возрастает с увеличением числа Рейнольдса. При этом для полумонокрилического выступа относительное расстояние от стенки, на которой установлен выступ, до максимумов $\langle u'u' \rangle$ или $\langle u'v' \rangle$ несколько меньше, чем для ребра: $(1...1,3)h$ – для полумонокрилического выступа и $(1,5...2)h$ – для ребра (рис.5).

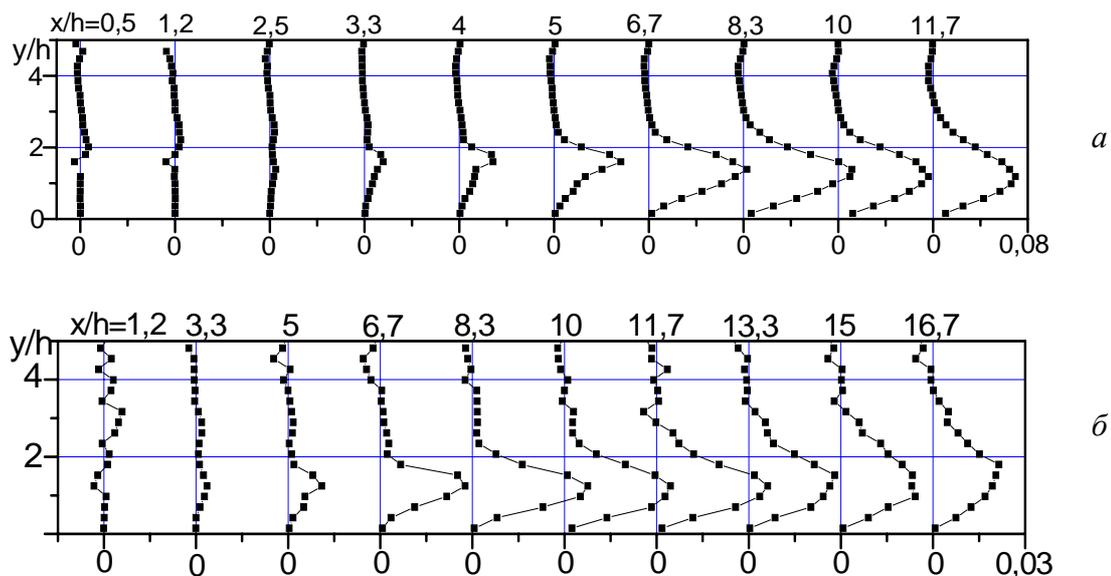


Рис.5. Профили корреляций компонент скорости потока $\langle u'v' \rangle$ за ребром (а) и полуцилиндрическим выступом (б) в плоскости симметрии канала при $Re_h=325$

По результатам PIV измерений была определена зависимость безразмерной величины интегрального линейного масштаба поперечных вихревых структур $\Omega_z/(U_1/h) = U_y/r_x - (U_x - U_k)/r_y$ от числа Рейнольдса (рис.6). Здесь U_1 – скорость в зазоре между выступом и противоположной стенкой канала; U_x и U_y – скорости потока на контуре крупномасштабного вихря, выделенного на мгновенном векторном поле потока, r_x и r_y – продольный и поперечный размеры вихря, U_k – скорость конвекции вихря, вычисленная по данным визуализации потока. Как видно из рисунка, безразмерный интегральный масштаб вихревых структур с ростом числа Рейнольдса резко возрастает, а затем становится практически постоянным.

К характерным отличиям распределения статистических характеристик течения за выступами рассматриваемых форм можно отнести и положение максимальных значений вторых моментов $\langle u'u' \rangle$ и $\langle u'v' \rangle$ относительно точки присоединения потока (X_R). Установлено, что для ребра значения максимумов располагаются левее точки присоединения в пределах рециркуляционной области и практически не меняют своего

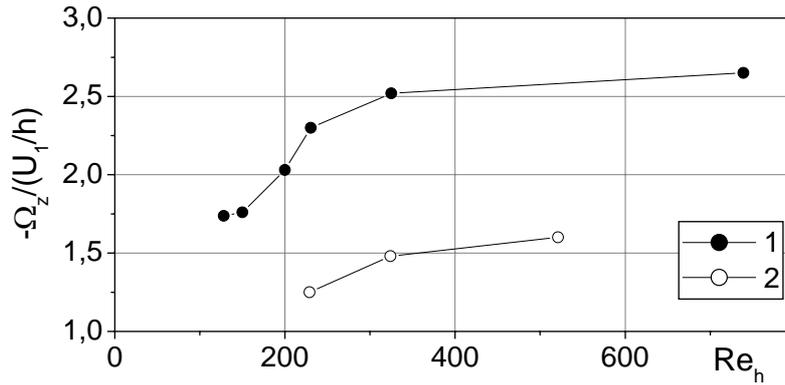


Рис.6. Изменение безразмерного интегрального масштаба крупномасштабных вихревых структур в начальной стадии их формирования от числа Рейнольдса

положения по продольной координате, а в случае полумоцилиндрического выступа максимумы корреляций $\langle u'v' \rangle$ во всем диапазоне исследованных режимов находятся ниже по потоку от точки присоединения, а для максимумов $\langle u'u' \rangle$ характерно смещение вверх по потоку от X_R , начиная с $Re_H=1300$.

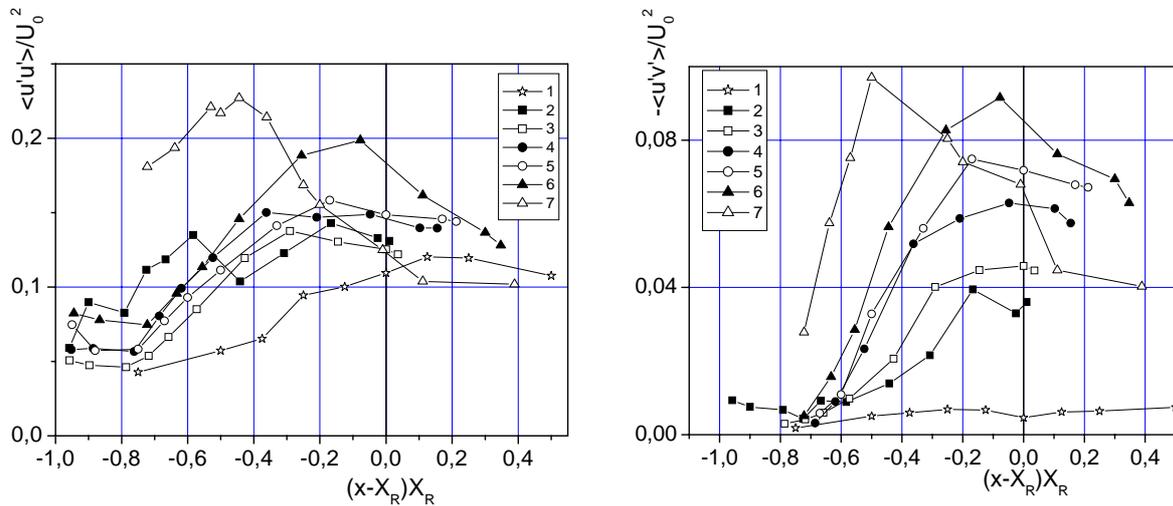


Рис.6. Положение максимумов корреляций $\langle u'u' \rangle$ и $\langle u'v' \rangle$ относительно точки присоединения за тонким выступом (ребром) в плоскости симметрии канала 1 – $Re_h = 93$; 2 – 128; 3 – 150; 4 – 200; 5 – 230; 6 – 325; 7 – 740

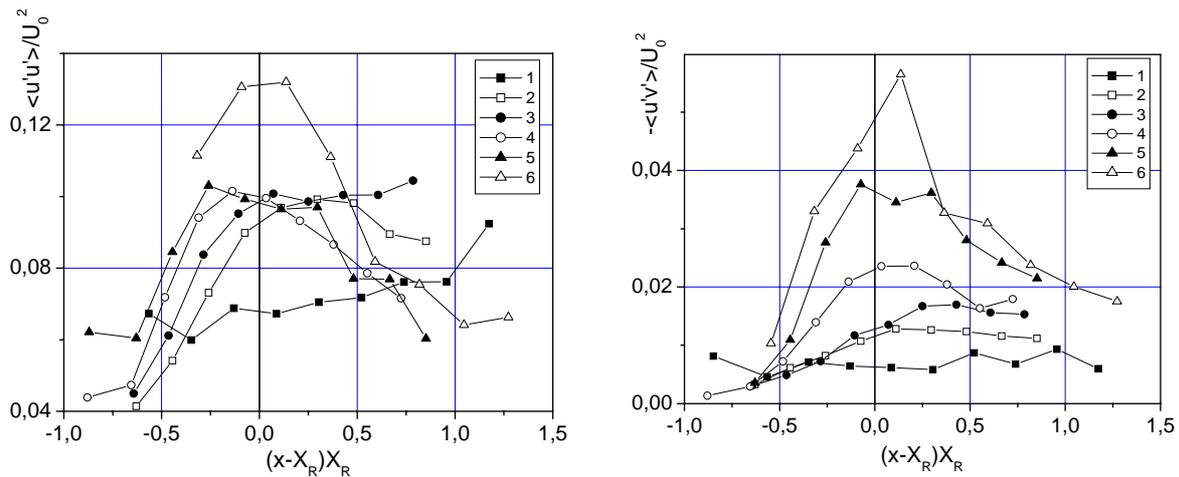


Рис.7. Положение максимумов корреляций $\langle u'u' \rangle$ и $\langle u'v' \rangle$ относительно точки присоединения за полуцилиндрическим выступом в плоскости симметрии канала $l - Re_h = 107; 2 - 163; 3 - 200; 4 - 230; 5 - 325; 6 - 520$

Таким образом, на основании комплексных экспериментальных исследований получены данные о зависимости структуры переходного течения в канале с поперечным выступом от формы выступа. Выявлено влияние формы поперечного выступа на критическое значение числа Рейнольдса, соответствующее началу ламинарно-турбулентного перехода в канале. Показано, что при обтекании плавно очерченного (полуцилиндрического) выступа на поздних стадиях перехода к турбулентности в сдвиговом слое формируются крупномасштабные поперечные вихревые структуры.

Выявлены наиболее вероятные сценарии эволюции крупных вихрей в области присоединения потока. Для каждой формы выступа определен диапазон чисел Рейнольдса, в пределах которого реализуются эти сценарии. Для выступов обеих форм обнаружены факты попарного слияния вихрей. Определены частоты формирования вихревых структур и скорости их конвекции в зависимости от числа Рейнольдса.

На основе PIV-измерений получены основные закономерности распределения статистических характеристик скорости потока в канале за выступами исследуемой формы. Показано, что максимумы корреляций $\langle u'u' \rangle$ и $\langle u'v' \rangle$ по продольной координате для тонкого выступа располагаются левее точки присоединения потока и практически не меняют своего положения по продольной координате, а для полуцилиндрического выступа во всем диапазоне исследованных режимов находятся ниже по потоку от точки присоединения. Определена величина интегрального линейного масштаба вихревых структур и его зависимость от числа Рейнольдса.

Открытым остается вопрос об интерференции отрывных течений при расположении чередующихся с некоторым шагом выступов и взаимосвязи выявленных особенностей структуры течения с процессами переноса тепла в интенсифицированных каналах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 10-08-00426, № 10-08-00428), ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2007-2013 годы».

Литература

1. 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.
2. Назмеев Ю.Г. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в дискретно-шероховатых каналах. М.: Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.
3. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока.// Теплофизика высоких температур 2005, Т. 43. №2. с. 223-230.
4. Chandra P.R., Han J.-C. Effect of rib profiles on turbulent channel flow heat transfer // AIAA J. Thermoph. Heat Transfer. 1998, Vol. 12, pp. 116-118.
5. Wang L., Sunden B. Experimental investigation of local heat transfer in a square duct with various-shaped ribs // Heat Mass Transfer. 2007. Vol. 43, pp. 759-766.
6. Eisama-ard S., Changcharoen W. Analysis of turbulent heat transfer and fluid flow in channels with various ribbed internal surfaces // J. of Thermal Science. 2011. Vol. 20, pp. 260-267.