

УДК 536.24;532

**ПЕРЕХОД К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В КАНАЛЕ ПРИ ОТРЫВЕ ПОТОКА  
ЗА ПОПЕРЕЧНЫМИ ВЫСТУПАМИ**© 2011 г. **В.М. Молочников<sup>1</sup>, О.А. Душина<sup>1</sup>, А.А. Паерелий<sup>1</sup>, С.А. Колчин<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Исследовательский центр проблем энергетики Казанского научного центра РАН<sup>2</sup>Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева

vmolochnikov@mail.ru

*Поступила в редакцию 16.05.2011*

Исследуется динамика кинематической структуры отрывного течения за поперечными выступами в канале при переходе к турбулентности. Выполнены дымовая визуализация течения с использованием скоростной видеокамеры, термоанемометрические измерения скорости потока и поверхностного трения, а также PIV-измерения мгновенных векторных полей скорости и завихренности потока. Получена информация об особенностях зарождения и основных закономерностях эволюции крупномасштабных вихревых структур, формирующихся в слое смещения при некотором значении числа Рейнольдса. На основе статистической обработки результатов PIV-измерений выявлено влияние формы выступа на распределения осредненных значений продольной компоненты скорости потока и вторых моментов пульсаций компонент скорости в канале за выступами на различных этапах перехода к турбулентности.

*Ключевые слова:* переход к турбулентности, отрывное течение, кинематическая структура, дымовая визуализация, термоанемометрические измерения, PIV-измерения, вихревые структуры, статистические характеристики.

**Введение**

Известно, что при отрыве потока за препятствиями существует некоторый диапазон чисел Рейнольдса, в котором течение в рециркуляционной области, включая зону присоединения потока, имеет ламинарный характер. При увеличении числа Рейнольдса за пределы этого диапазона сдвиговый слой теряет устойчивость и переходит в турбулентное состояние. Переход к турбулентности сопровождается нарастанием возмущений в оторвавшемся слое смещения и формированием квазипериодических крупномасштабных вихревых структур [1–3]. Установлено, что характеристики течения после точки отрыва определяются, главным образом, динамикой этих структур [2–4]. Однако большинство подобных исследований относится к внешнему обтеканию препятствий. Соответствующие данные для внутренних течений единичны и не носят систематического характера. Кроме того, не до конца ясен механизм возникновения крупномасштабных вихрей: связан ли он с конвективной неустойчивостью сдвигового слоя за точкой отрыва или с глобальной неустойчивостью всей отрывной зоны [2, 3]. В настоящей работе представлены результаты комплексных экспериментальных исследований пространственно временной и вих-

ревой структуры отрывного обтекания тонкого и полуцилиндрического поперечных выступов в канале в диапазоне чисел Рейнольдса, охватывающем различные этапы ламинарно-турбулентного перехода.

**Экспериментальное оборудование  
и методика исследований**

Исследования проводились в канале прямоугольного поперечного сечения шириной  $B = 50$  мм и высотой  $H = 20$  мм. На широкой стенке канала устанавливался тонкий поперечный выступ (ребро) высотой  $h = 4$  мм или поперечный полуцилиндрический выступ радиусом 3 мм. Расход воздуха в тракте установки обеспечивался вакуумными насосами и поддерживался постоянным на одном режиме измерений при помощи набора критических сопел с погрешностью не более 0.25%. Визуализация течения проводилась методом «дымящейся проволоки». Съёмки выполнялась высокоскоростной монохромной видеокамерой Fastec HiSpec. Мгновенная локальная скорость потока вниз по течению от выступа и в области присоединения измерялась при помощи нитяного термоанемометрического датчика, а продольная компонента вектора поверхностного трения – трехниточным пристеночным термоанемометричес-

ким датчиком. Измерения двухкомпонентных мгновенных векторных полей скорости потока выполнялись методом PIV. На каждом режиме проводилось 1000 измерений. Исследования выполнялись в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re_H = U_0 H / \nu = 372-8535$ , где  $U_0$  – среднерасходная скорость потока в канале.

**Результаты исследований и обсуждение**

Анализ экспериментальной информации показал, что формирование крупномасштабных вихревых структур в сдвиговом слое за тонким выступом начинается при  $Re_H \approx 500$  ( $Re_h = U_1 h / \nu \approx 130$ , где  $U_1$  – скорость потока в зазоре между выступом и стенкой канала), а за полуцилиндрическим выступом – при  $Re_H \approx 1300$  ( $Re_h \approx 230$ ). Картина вихреобразования является квазипериодической. С увеличением числа Рейнольдса частота формирования вихрей растет, что подтверждается и результатами термоанемометрических измерений, а область начала вихреобразования приближается к выступу. Обнаружены колебания этой области в продольном направлении. Выполнена оценка скорости конвективного переноса вихревых структур, формирующихся в слое смешения, на различных этапах ламинарно-турбулентного перехода. Выявлена возможность реализации двух основных сценариев эволюции вихревых структур в области присоединения потока за выступом. Согласно первому сценарию, поперечные вихри перемещаются на некотором расстоянии от стенки, не взаимодействуя друг с другом. Согласно второму сценарию, вихрь, приближаясь к стенке, теряет скорость и под действием следующего за ним вихря разделяется на две части, одна из которых сносится внешним потоком, а вторая перемещается в сторону выступа. Определены диапазоны чисел Рейнольдса, в пределах которых реализуются эти сценарии. Прослеживается развитие возмущений в сдвиговом слое с увеличением числа Рейнольдса, что выражается в появлении и последовательном увеличении амплитуды колебаний струек дыма в области присоединения потока, которые в дальнейшем принимают форму «гребешков», а затем сворачиваются в вихревые структуры (рис. 1).

Предполагается, что дальнейшая эволюция крупномасштабных вихрей определяется глобальной неустойчивостью всей отрывной области, а нарастающие колебания сдвигового слоя могут являться «спусковым механизмом» этой неустойчивости.

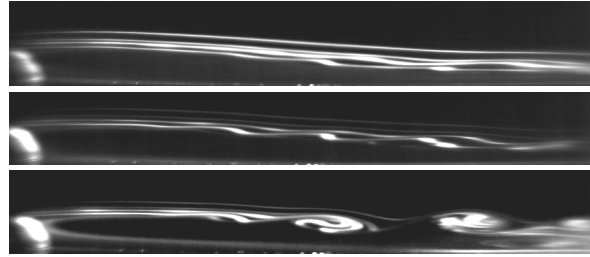


Рис. 1

Получены данные о распределении поверхностного трения и вероятности обратного течения по длине отрывной области за выступом на переходных режимах, а также зависимость длины самой области от числа Рейнольдса и формы выступа. На основе статистической обработки результатов PIV-измерений выявлены некоторые закономерности распределения осредненных значений продольной компоненты скорости потока  $\langle u \rangle$  и вторых моментов пульсаций компонент скорости  $\langle u'u' \rangle$  и  $\langle u'v' \rangle$  в канале за выступами на различных этапах перехода к турбулентности. В частности, установлено положение максимальных значений  $\langle u'u' \rangle$  и  $\langle u'v' \rangle$  (рис. 2) относительно точки присоединения потока: а – за ребром; б – за полуцилиндрическим выступом).

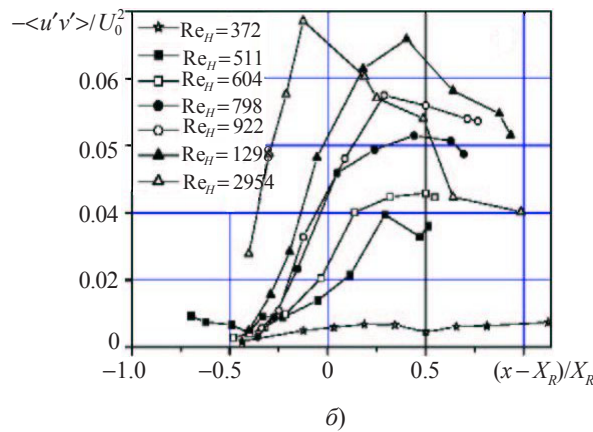
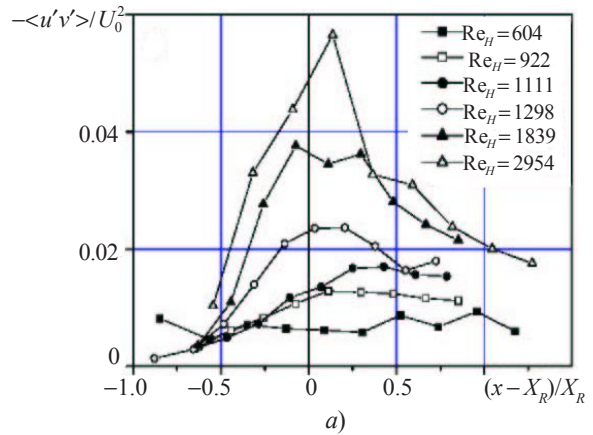


Рис. 2

Показано, что для тонкого выступа они располагаются в пределах рециркуляционной области левее точки присоединения потока, а в случае полумоноцилиндрического выступа находятся ниже по течению от этой точки.

Выполнена приближенная оценка безразмерной величины интегральной завихренности  $\Omega_z^* = \Omega_z / (U_1/h)$  крупномасштабных поперечных вихрей на начальных этапах их формирования. Показано, что значение  $\Omega_z^*$  с увеличением числа Рейнольдса возрастает, а затем стабилизируется вблизи некоторого постоянного значения.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №09-08-00597, 10-08-00428, 10-08-00426) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (ГК № 02.740.11.0071 и П227).*

#### 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. 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.
3. 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.
4. Sigurdson L.W., Roshko A. The structure and control of a turbulent reattaching flow // Turbulence Management and Relaminarization / Eds. H.W. Liepmann, R. Narasimha. Berlin: Springer-Verlag, 1988. P. 497–514.

### TRANSITION TO TURBULENCE IN A CHANNEL WITH FLOW SEPARATION BEHIND THE TRANSVERSAL RIBS

*V.M. Molochnikov, O.A. Dushina, A.A. Paerely, S.A. Kolchin*

Dynamics of the kinematic structure of a separated flow behind transversal ribs at transition to turbulence has been studied. Smoke visualization using a high-speed camera, hot-wire measurements of velocity and skin friction, and PIV-measurements of instantaneous vector fields of flow velocity and vorticity were carried out. The data on the features of origination and main regularities of evolution of large-scale vortices generated in the mixing layer starting from a certain Reynolds number was obtained. Statistical treatment of PIV-measurements revealed the effect of the rib shape on the distribution of an average longitudinal velocity component and the second moments of velocity fluctuations in the channel behind the ribs at different stages of transition to turbulence.

*Keywords:* transition to turbulence, separated flow, kinematic structure, smoke visualization, hot-wire measurements, PIV-measurements, vortical structures, statistical characteristics.