

УДК 629.113.01

XXIII Российская школа по проблемам науки и технологий. Краткие сообщения. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 481 с.

В сборник кратких сообщений включены работы, представленные на XXIII Российскую школу по проблемам науки и технологий (24-26 июня 2003 года, г. Миасс) в качестве стендовых докладов.

Исследования авторов настоящих сообщений посвящены актуальным проблемам применения неоднородных материалов и конструкций, аэрогидродинамики и тепломассообмена, динамики и прочности, конструирования и производства, динамики и управления, экономики и управления.

**Редакционная коллегия**

Анфилов В.Н., Бархатов В.И., Васильев В.В., Верзакова Г.А. (ответственный секретарь), Вяткин Г.П., Григориади В.С., Гришай Б.Н., Гуревич С.Ю., Дегтярь В.Г., Ершов П.Н. (главный редактор), Ершов П.Н. (заместитель главного редактора), Заноха В.И., Лашманов Г.П., Немировский Ю.В., Новик В.Л., Панов В.В., Соколовский М.И., Стружанов В.В., Телегин А.И., Уфимцев С.А.

**Ответственные за выпуск**  
Верзакова Г.А., Ершов П.Н.

**Адрес редакции**  
456304, г. Миасс Челябинской обл., ул. Калинина, 37,  
Межрегиональный совет по науке и технологиям,  
тел. (35-135) 2-07-16

Ф.С.Занько, Н.И.Михеев

Отдел энергетики КазНЦ РАН (г.Казань)

## СТРУКТУРА ПОЛЕЙ ТРЕНИЯ И СКОРОСТИ В ТУРБУЛЕНТНОМ ОТРЫВНОМ ТЕЧЕНИИ ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ\*

Турбулентное отрывное течение за обратным уступом традиционно является тестовой задачей для апробирования численных методов расчета сложных турбулентных потоков. Такая конфигурация течения нередко встречается и в инженерной практике: в ядерных реакторах, газовых турбинах, камерах сгорания, электронной аппаратуре и других технических устройствах. Несмотря на свою относительную простоту (наличие одной фиксированной точки отрыва) это течение считается чрезвычайно сложным физическим феноменом, многие черты которого до сих пор не получили должного объяснения.

Аппарат статистических характеристик вообще и корреляционные характеристики в частности являются ценным инструментом научного описания гидродинамических явлений. Среди достоинств статистического метода как особого математического языка можно выделить его универсальность и сравнительную простоту. В то же время описание турбулентности, существенно неслучайного процесса, только с помощью статистических характеристик будет весьма ограниченным. Для более глубокого проникновения в структуру турбулентного потока необходимы более "тонкие" методы, например техника условного усреднения, техника ВИТА, вейвлет-анализ и т.п.

Целью настоящей работы было получение новых экспериментальных данных о структуре турбулентного отрывного течения за обратным уступом и их анализ с помощью аппарата корреляционных функций и техники условного усреднения.

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе разомкнутого типа. Рабочий участок имел прямоугольное поперечное сечение  $0,1 \times 0,13 \text{ м}^2$ . Измерения проводились при двух режимах по скорости потока на входе в рабочий участок:  $U_\infty = 10,1; 17,2 \text{ м/с}$ . На стенках рабочего участка был развитый турбулентный пограничный слой. В качестве тела обтекания использовался выступ высотой  $h = 20 \text{ мм}$  со скругленной передней кромкой, который при принятых форме и геометрических размерах можно условно считать обращенным назад уступом. Уступ устанавливался на стенке рабочего участка и занимал всю ширину канала. Число Рейнольдса, вычисленное по высоте уступа и средней скорости у кромки уступа составляло  $Re_h = U_0 h / \nu = 1,7 \times 10^4$  и  $2,9 \times 10^4$ .

Для измерения полей скорости и трения применялись обычный термоанемометрический одноструйный датчик скорости и шестиниточный датчик

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 02-02-16719, 03-02-16867) и программы "Студенты, аспиранты и молодые ученые - малому наукоемкому бизнесу" Ползуновские гранты" (12-2.35).

мгновенного вектора поверхностного трения, разработанный в Лаборатории гидродинамики и теплообмена (КазНЦ РАН - КГТУ им.А.Н.Туполева). Для измерения пространственно-временных корреляционных функций поверхностного трения и скорости в потоке использовались одновременно оба этих датчика, расположенные в одном сечении один над другим. Расстояние между датчиками изменялось путем перемещения датчика скорости в вертикальном направлении. Изменение продольной координаты измерительной точки осуществлялось путем перемещения обратного уступа относительно рабочего участка.

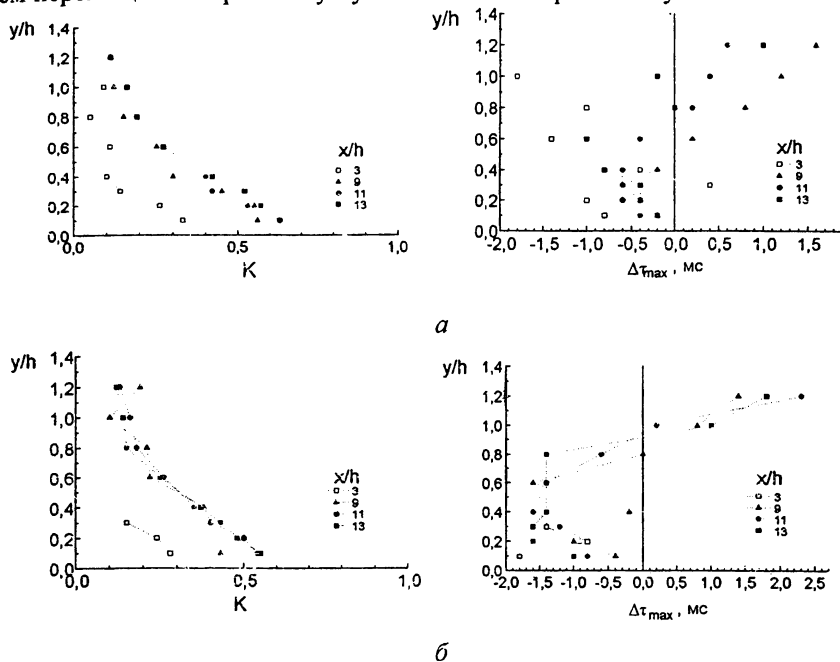


Рис.1. Величины максимумов ( $K$ ) пространственно-временных корреляционных функций  $R_{\tau,u}(t_1, t_2)$  и их положение относительно нуля на временной оси  $\Delta\tau_{\max}$  для случая присоединившегося сдвигового слоя ( $x=9...13 h$ ) и зоны рециркуляции ( $x=3 h$ ):  
 а -  $U_\infty=17,2$  м/с; б -  $U_\infty=10,1$  м/с

На рис.1 показаны величины максимумов ( $K$ ) пространственно-временных корреляционных функций (ПВКФ)  $R_{\tau,u}(t_1, t_2)$  и их положение относительно нуля на временной оси ( $\Delta\tau_{\max}$ ) для случая присоединившегося сдвигового слоя ( $x=9...13 h$ ) и в одном сечении рециркуляционной зоны ( $x=3 h$ ). Отрицательная задержка по времени свидетельствует о том, что информация о возмущении в потоке сначала достигает датчика скорости и только потом - датчика трения. Величина максимума ПВКФ характеризует меру статистической связи продольной компоненты вектора трения на стенке с продольной компонентой скорости в потоке. Из рисунка следует, что величина задержки по времени с

удалением от стенки сначала увеличивается в отрицательном направлении, а затем, уменьшаясь, достигает нуля и становится положительной по знаку. Величина максимума коэффициента корреляции ПВКФ убывает с ростом расстояния между датчиками.

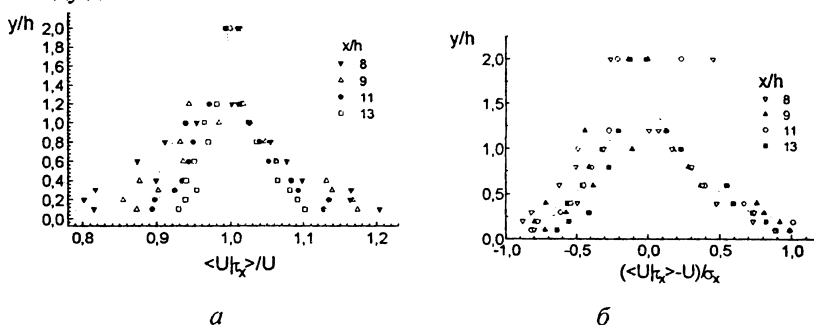


Рис.2. Условно усредненные профили скорости в присоединившемся сдвиговом слое ( $U_\infty=10,1$  м/с) по условиям  $\langle U | \tau_x \geq \tau_x + \sigma_x \rangle$  и  $\langle U | \tau_x \leq \tau_x - \sigma_x \rangle$ : а - нормированные по средней скорости  $U$ ; б - нормированные по интенсивности пульсаций скорости  $\sigma_x$

Для оценки связи пульсаций продольной составляющей вектора поверхностного трения с профилем скорости в присоединившемся сдвиговом слое были построены условно усредненные профили скорости (только для случая  $U_\infty=10,1$  м/с). Условия были выбраны в следующем виде:  $\langle U | \tau_x \geq \tau_x + \sigma_x \rangle$  и  $\langle U | \tau_x \leq \tau_x - \sigma_x \rangle$ . Сигналы по скорости и по трению относительно друг друга по времени не сдвигались. Полученные результаты показаны на рис.2 в виде относительного отклонения условно усредненного профиля скорости от собственно среднего. Указанное отклонение нормировалось по величине средней скорости и  $\sigma_x$ . На рис.2,а отчетливо видно, что пульсации трения на стенке статистически связаны с изменениями профиля скорости в присоединившемся сдвиговом слое вплоть до высоты  $y=1,2h$ . На высоте  $y=2h$  относительное отклонение условного профиля скорости  $\langle U | \tau_x \geq \tau_x + \sigma_x \rangle / U$  мало. Однако, если в качестве нормирующей величины взять  $\sigma_x$  (рис.2,б), соответствующую данной высоте над стенкой, то отклонение условно усредненного профиля скорости от среднего даже на высоте  $y=2h$  может достигать значения  $0,2\sigma_x$  (достаточно существенного, если сравнивать с  $\sigma_x$  вблизи стенки).

Очевидно, что в смысле статистической связи разных по высоте слоев жидкости в отрывной зоне друг с другом рециркуляционная область является таким же единым целым как и обычный турбулентный пограничный слой, т.е. разделение этого течения на зоны (рециркуляционный вихрь, оторвавшийся сдвиговой слой и т.д.) является достаточно условным. Условно усредненные профили скорости, изображенные на рис.2,б, отражают сравнительное влияние на мгновенный профиль скорости "внутренней" (не наложенной) нестационарности (всплески, пульсации всей отрывной области) по отношению к средней интенсивности турбулентности.