

# ПРОБЛЕМЫ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССОБМЕНА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

## Т Р У Д Ы

*XIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов  
под руководством академика РАН А.И. Леонтьева*

*В двух томах*

*26-30 мая 2003 г.  
г. Рыбинск, Россия*

### Том 1

*Расчетные и экспериментальные  
методы исследований турбулентных течений*

*Тепло- и массообмен при течении двухфазных  
и многофазных сред*

*Методы теплофизического эксперимента*



## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕКТОРА ПОВЕРХНОСТНОГО ТРЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ ОТРЫВНОМ ТЕЧЕНИИ ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ

### АННОТАЦИЯ

Проведены термоанемометрические измерения спектральных характеристик вектора поверхностного трения в турбулентном отрывном течении за обратным уступом. Для рециркуляционной зоны отмечено, что роль высокочастотной области спектра трения возрастает с удалением от уступа вниз по течению. Возможно, это связано с постепенным приближением к поверхности проходящего сверху сильно турбулизованного оторвавшегося сдвигового слоя.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Турбулентный отрывной поток за обратным уступом представляет значительный практический интерес. Достаточно упомянуть, что такая конфигурация течения встречается в газовых турбинах, электронной аппаратуре, теплоотдающих устройствах и даже в ядерных реакторах. Тем не менее до сих пор имеет место нехватка экспериментальной информации по этому типу течения. Особенно остро эта проблема стоит по отношению к измерениям пристеночных параметров турбулентности: пульсаций давления на стенке и поверхностного трения.

Важную информацию о структуре течения можно получить из спектральных характеристик параметров турбулентности. И если для пульсаций пристеночного давления такие данные имеются (см., напр. [1]), то по поверхностному трению подобных измерений проводилось гораздо меньше.

Известно, что течение в области отрыва и присоединения за обратным уступом является существенно трехмерным, и мгновенная величина модуля вектора поверхностного трения никогда не равна нулю [2].

Целью данной работы является измерение и анализ спектральных характеристик по двум компонентам вектора поверхностного трения в различных областях турбулентного отрывного течения за обратным уступом.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе разомкнутого типа. Рабочий участок имел прямоугольное поперечное сечение  $0,1 \times 0,13 \text{ м}^2$ . В качестве тела обтекания в работе использовался выступ со скругленной передней кромкой, который при принятых форме и геометрических размерах можно условно считать обращенным назад уступом.

Уступ высотой  $h=20 \text{ мм}$  устанавливался на стенке рабочего участка и занимал всю ширину канала.

В невозмущенном потоке перед обратным уступом течение было двумерным с развитым турбулентным пограничным слоем. Эксперименты проводились для двух режимов по средней скорости потока:  $U_{\infty}=10,1 \text{ м/с}$  (режим II) и  $17,3 \text{ м/с}$  (режим I), а уровень пульсаций скорости составлял около 1%. 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 режимов II и I, соответственно.

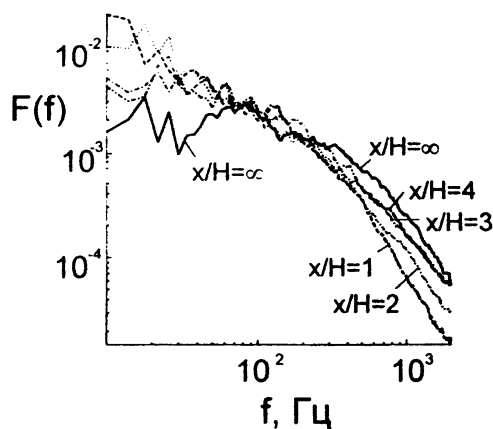
Локальные измерения вектора поверхностного трения проводились в рециркуляционной зоне, зоне присоединения и области присоединившегося сдвигового слоя за обратным уступом с помощью шестиниточного датчика поверхностного трения [3]. Датчик позволяет определять мгновенное значение модуля и направление вектора поверхностного трения. Работа датчика обеспечивалась термоанемометрической аппаратурой DISA 55M. Подробное описание работы датчика, его градуировка и результаты методических испытаний приведены в работе [3]. Изменение продольной координаты измерительной точки осуществлялось путем перемещения обратного уступа относительно рабочего участка.

Сбор и обработка экспериментальной информации проводились при помощи автоматизированной системы, включающей в себя персональный компьютер и восьмиканальный аналого-цифровой преобразователь с параллельным опросом каналов. В каждой измерительной точке время опроса составляло 2 с при частоте дискретизации 5000 Гц.

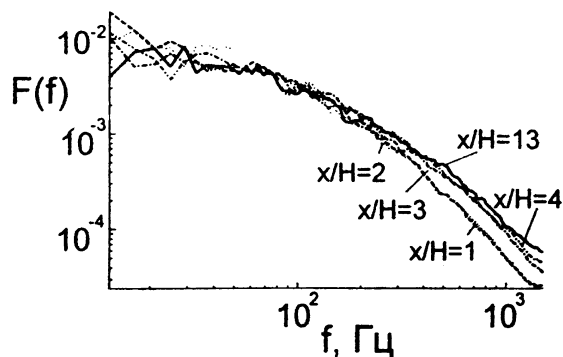
Спектральные характеристики продольной компоненты вектора поверхностного трения рассчитывались по выборкам длиной 16 с (в случае течения за обратным уступом) и 10 с (в случае незагроможденной трубы) при  $U_{\infty}=17,3 \text{ м/с}$  и 18 с (в случае течения за обратным уступом) и 10 с (в случае незагроможденной трубы) при  $U_{\infty}=10,1 \text{ м/с}$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Длина рециркуляционной зоны может быть оценена по изменению вероятности обратного течения  $\gamma$ . Координаты средней точки присоединения при  $U_{\infty}=17,3$  и  $10,1 \text{ м/с}$  оказались очень близкими: 4,7 и 5,1h соответственно.

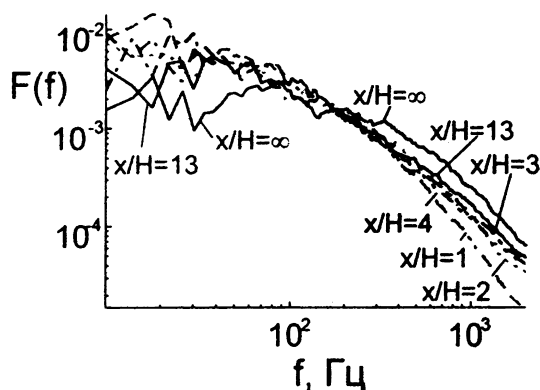


а

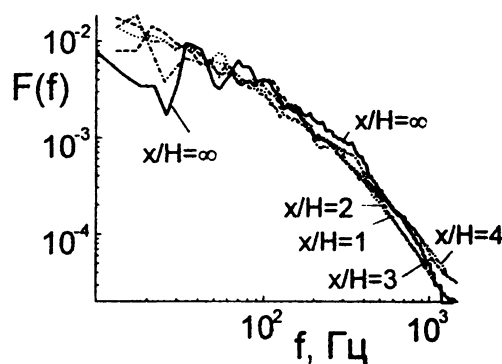


б

Рис.1. Спектральные плотности продольных пульсаций вектора поверхностного трения в рециркуляционной зоне течения за обратным уступом: а -  $U_x=17.2$  м/с; б -  $U_x=10.1$  м/с



а



б

Рис.2. Спектральные плотности поперечных пульсаций вектора поверхностного трения в рециркуляционной зоне течения за обратным уступом: а -  $U_x=17,2$  м/с; б -  $U_x=10,1$  м/с

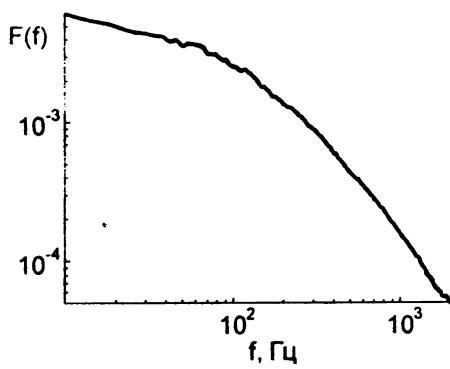
Это вполне объяснимо, так как известно, что длина области рециркуляции не зависит от числа Рейнольдса. Полученные в ходе измерений осредненные по времени оценки коэффициента модуля и продольной компоненты вектора поверхностного трения, среднеквадратичные отклонения модуля вектора поверхностного трения и его компонент для двух режимов по скорости, вполне соответствуют результатам других исследований. Подробное описание указанных характеристик поверхностного трения можно найти, например в [4].

На рис.1 и 2 представлены *спектральные плотности продольных и поперечных пульсаций вектора поверхностного трения* в рециркуляционной зоне течения за обратным уступом для двух режимов по скорости. Отметим, что во всех точках присоединившегося сдвигового слоя спектры были одинаковы с точностью до ошибки усреднения, вызванной ограниченностью выборки во времени.

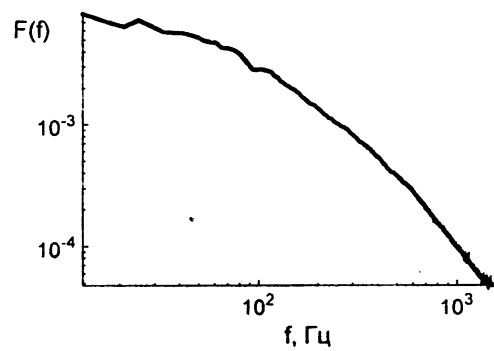
В рециркуляционной зоне можно выделить следующую особенность: роль высокочастотной обла-

сти возрастает с удалением от уступа вниз по течению. Это справедливо для пульсаций как продольной, так и поперечной составляющей вектора поверхностного трения. Подобная тенденция была отмечена в работе [1] по отношению к пульсациям давления на стенке. Возможно, это связано с постепенным приближением к поверхности проходящего сверху сильно турбулизированного оторвавшегося сдвигового слоя.

На рис.3 и 4 представлены усредненные по всем измерительным точкам *средние спектры пульсаций продольной и поперечной компонент вектора поверхностного трения* для двух режимов по скорости. Анализ графиков (рис.3,б и 4,б) для режима скорости  $U_\infty=10,1$  м/с и сопоставление их с аналогичными спектральными характеристиками, измеренными в невозмущенном потоке позволяет выдвинуть предположение, что в данном случае имеет место недостаточно благоприятное соотношение сигнал/шум. Локальных максимумов, соответствующих каким-либо известным характерным числам

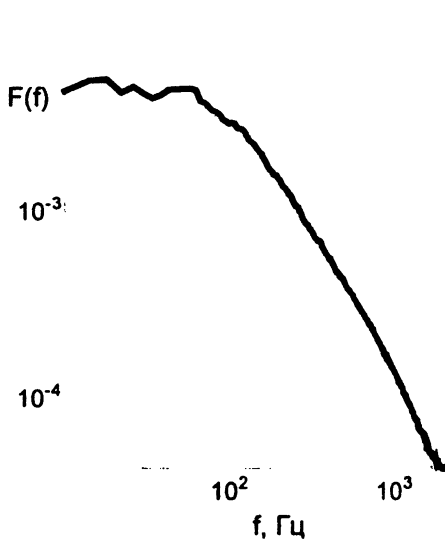


а

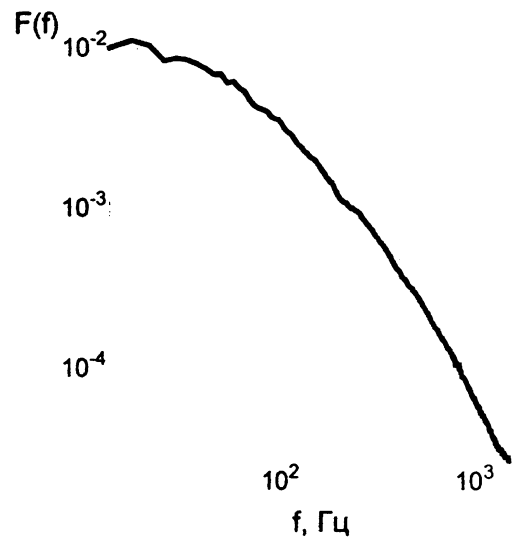


б

Рис.3. Усредненные по всем измерительным точкам спектральные плотности продольных пульсаций вектора поверхностного трения в следе за обратным уступом: а -  $U_x=17.2$  м/с; б -  $U_x=10.1$  м/с



а



б

Рис.4. Усредненные по всем измерительным точкам спектральные плотности поперечных пульсаций вектора поверхностного трения в следе за обратным уступом: а -  $U_x=17.2$  м/с; б -  $U_x=10.1$  м/с

Струхалю для данного случая течения обнаружить не удалось. Средний спектр пульсаций продольной компоненты вектора поверхностного трения при  $U_x=17.3$  м/с (рис.3,а) представляет собой монотонно убывающую функцию (как в обычном турбулентном пограничном слое). На среднем спектре пульсаций поперечной компоненты вектора поверхностного трения при  $U_x=17.3$  м/с (рис.4, а) присутствуют три локальных максимума, соответствующих частотам 18 Гц ( $Sh=0.02$ ), 26 Гц ( $Sh=0.03$ ) и 58 Гц ( $Sh=0.07$ ). Первый и третий максимумы можно интерпретировать как характерные частоты *низкочастотного ламинарного движения слоя смещения и испускания крупных вихрей в оторвавшемся слое смещения*, соответственно. (Более подробную информацию о нестационарных процессах в турбулентном течении за обратным уступом можно почерпнуть, например

из работ [5-6]). Локальный максимум, соответствующий частоте 26 Гц, возможно, связан с пульсациями расхода в аэродинамической трубе. Таким образом, если принять во внимание тот факт, что в нашем случае поперечные пульсации трения преобладают над продольными (см. [4]), можно сделать вывод о существенной трехмерности нестационарных процессов, происходящих в течении за двумерным обратным уступом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены термоанемометрические измерения спектральных характеристик вектора поверхностного трения в турбулентном отрывном течении за обратным уступом. Для рециркуляционной зоны отмечено, что роль высокочастотной области спектра трения возрастает с удалением от уступа вниз по

течению. Возможно, это связано с постепенным приближением к поверхности проходящего сверху сильно турбулизированного оторвавшегося сдвигового слоя. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о существенной трехмерности нестационарных процессов, происходящих в течении за двумерным обратным уступом.

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$U_x$  – средняя скорость в ядре потока в невозмущенном трубном течении, м/с;

$U_0$  – средняя скорость в ядре потока у кромки уступа, м/с;

$Sh = fh/U_0$  - число Струхала;

$h$  - высота обратного уступа, м;

$\nu$  - кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;

$f$  - частота, Гц.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Farabee T.M., Casarella M.J. Measurements of fluctuating wall pressure for separated/reattached boundary layer

flows // Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design. July 1986. Vol. 108. P. 301-307.

2. Козлов А.П. Проявление трехмерности в двумерных отрывных течениях // Докл. РАН. 1994. Т.338. №3. С.337-339.
3. Козлов А.П., Михеев Н.И., Молочников В.М., Сайкин А.К. Термоанемометрические измерения поверхностного трения в отрывных течениях. Казань: АБАК. 1998. 134 с.
4. Занько Ф.С., Козлов А.П., Михеев Н.И. Мгновенный вектор поверхностного трения в турбулентном отрывном течении за обратным уступом / Препринт 98П11. Казань: КГТУ им.А.Н.Туполева. 1998. 14 с.
5. Драйвер Д.М., Сигмиллер Х.Л., Марвин Дж.Г. Нестационарные процессы в присоединяющемся слое смещения // Аэрокосмическая техника. 1988. №3. С.35-42.
6. Занько Ф.С., Михеев Н.И. Присоединившийся сдвиговой слой в условиях колебаний зоны турбулентного отрыва потока за обратным уступом // Известия РАН. Энергетика. 1998. №4. С.97-102.