

Министерство общего и профессионального образования
Российской Федерации

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им.А.Н.ТУПОЛЕВА

Ф.С.Занько, А.П.Козлов, Н.И.Михеев

МГНОВЕННЫЙ ВЕКТОР ПОВЕРХНОСТНОГО ТРЕНИЯ
В ТУРБУЛЕНТНОМ ОТРЫВНОМ ТЕЧЕНИИ
ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ

Препринт 98П11

Казань 1998

Ф.С.Занько, А.П.Козлов, Н.И.Михеев. Мгновенный вектор поверхностного трения в турбулентном отрывном течении за обратным уступом. Казань, 1998. 14 с. (Препринт / Казан. гос. техн. ун-т им.А.Н.Туполева; 98П11)

Приведены результаты измерения мгновенного вектора поверхностного трения в турбулентном отрывном течении за обратным уступом. Оценены статистические характеристики вектора: средние значения и интенсивности пульсаций модуля вектора и его компонент в следе за уступом, а также совместное распределение компонент вектора в различных областях течения.

Табл. . Ил.6. Библиогр.: 16 назв.

©Казанский государственный технический
университет, 1998.

©Ф.С.Занько, А.П.Козлов, Н.И.Михеев, 1998.

Условные обозначения

x — продольная координата, м;

y — вертикальная координата, м;

z — поперечная координата, м;

H — высота уступа, мм;

$U_{\text{шт}}$ — средняя скорость невозмущенного потока, м/с;

γ — вероятность обратного течения;

X_R — длина присоединения, мм;

$|\tau|$, τ_x , τ_z — осредненные по времени оценки модуля, продольной и поперечной компоненты вектора поверхностного трения;

$\tau_x^{\text{шт}}$ — осредненная по времени оценка продольной компоненты вектора поверхностного трения в невозмущенном потоке;

σ_{τ_z} , σ_{τ_x} , σ_{τ_z} — осредненные по времени оценки среднеквадратичного отклонения модуля, продольной и поперечной компоненты вектора поверхностного трения.

Введение

В течение последних трех десятилетий турбулентный отрыв за обратным уступом неоднократно выбирался в качестве объекта экспериментального исследования [1,2,3]. Проведены измерения средних и пульсационных составляющих давления, температуры, компонент вектора скорости, а также напряжений Рейнольдса и других параметров турбулентного течения [4,5,6]. Исследованы процессы, происходящие в зоне присоединения свободного сдвигового слоя, изучены закономерности релаксации присоединившегося сдвигового слоя. Имеются удачные попытки численного моделирования турбулентного отрывного течения за обратным уступом на основе алгебраической и «k-ε» модели турбулентности [7] с помощью метода крупных вихрей [8].

Однако, несмотря на достигнутые успехи, все еще рано говорить о полном понимании всего того, что происходит в потоке за обратным уступом. В частности, это относится к такому параметру как поверхностное трение. В литературе очень мало данных о результатах измерения поверхностного трения в отрывных потоках. В первую очередь, это связано с такими факторами, осложняющими получение надежных экспериментальных данных (особенно в областях рециркуляции и

присоединения) как-то: высокий уровень турбулентных пульсаций, наличие реверсивных пульсаций скорости и трения, нестационарность течения даже при фиксированной точке отрыва. Традиционный способ определения поверхностного трения по методу Клаузера в условиях течения, близких к отрывным, дает большую ошибку [9]. Измерение трения даже в начальной области присоединившегося сдвигового слоя представляет определенную трудность. Среди немногочисленных измерений такого рода можно отметить измерения, проведенные Адамсом и др. [10] с помощью лазерного доплеровского анемометра, и измерения Кастро [11], проведенные с помощью импульсного анемометра, специально разработанного для измерений вблизи стенки. Любые новые измерения поверхностного трения в отрывном течении весьма полезны и представляют интерес для верификации методов расчета отрывных течений, а также углубляют наше понимание турбулентного отрыва потока.

Поле течения за обратным уступом можно условно разделить на свободный сдвиговый слой, рециркуляционную область, область вторичной рециркуляции, зону присоединения и присоединившийся сдвиговый слой. Каждая из этих зон обладает своими особенностями. Эксперименты, связанные с измерениями вероятности обратного течения, показали, что отрывное течение за обратным уступом в большинстве случаев обладает некоторыми общими свойствами [12]: 1) *область присоединения* находится на расстоянии (5-7) высот уступа H и имеет протяженность (3-4) высоты уступа H ; 2) область относительно стационарного *возвратного течения* вблизи стенки начинается на расстоянии приблизительно $4H$ от основания уступа; 3) *средняя точка вторичного отрыва потока* находится на расстоянии приблизительно $1H$ от основания уступа.

Хорошо известно, что мгновенное положение *точки присоединения* не постоянно, а изменяется в окрестности своего среднего положения. По характеру этого изменения можно судить о нестационарности течения в целом. Так, данные Драйвера и др. [13] свидетельствуют о существовании связи между пульсациями мгновенной точки присоединения и так называемыми "маховыми движениями" *свободного слоя смещения* за уступом. Также известно, что вектор поверхностного трения в *области присоединения потока* никогда не равен нулю (даже когда средняя продольная компонента вектора трения равна нулю) [14]. Физически это означает, что под действием неблагоприятного градиента давления частицы в мгновенных струйках тока не останавливаются, а разворачиваются и продолжают двигаться в поперечном направлении. Весьма интересным представляется процесс релаксации

присоединившегося сдвигового слоя. Считается, что сдвиговый слой со временем должен эволюционировать в обычный турбулентный пограничный слой. Однако по данным Фараби и Касарелла [4] “след” от процессов отрыва и присоединения потока распознается в спектрах пульсаций давления даже на расстоянии $72H$ от уступа. При этом среднеквадратичные значения пульсаций скорости не соответствуют характеристикам обычного турбулентного пограничного слоя [15]. По-видимому, эти особенности развития течения за обратным уступом могут отразиться и на изменении средних и мгновенных характеристик вектора поверхностного трения.

Целью настоящей работы является измерение и анализ статистических характеристик мгновенного вектора поверхностного трения в различных областях турбулентного отрывного течения за обратным уступом.

Экспериментальная установка и методика измерений

Эксперимент проводился в аэродинамической трубе с закрытым рабочим участком прямоугольного поперечного сечения размером 100×130 мм². Обратный уступ имел высоту $H=21$ мм (рис.1).

Локальные измерения вектора поверхностного трения проводились в рециркуляционной зоне, зоне присоединения и области присоединившегося сдвигового слоя за обратным уступом с помощью датчика поверхностного трения [16]. 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 [16]. Изменение продольной координаты измерительной точки осуществлялось путем перемещения обратного уступа относительно рабочего участка. В невозмущенном потоке перед обратным уступом течение было двумерным с развитым турбулентным пограничным слоем. Средняя скорость потока составляла $U_{\text{ср}}=17,3$ м/с, а уровень пульсаций скорости около 1%.

Сбор и обработка экспериментальной информации проводились при помощи автоматизированной системы, включающей в себя персональный компьютер Pentium-100 и восьмиканальный аналого-цифровой преобразователь с параллельным опросом каналов. В каждой измерительной точке время опроса составляло 2,5 с при частоте дискретизации 2000 Гц.

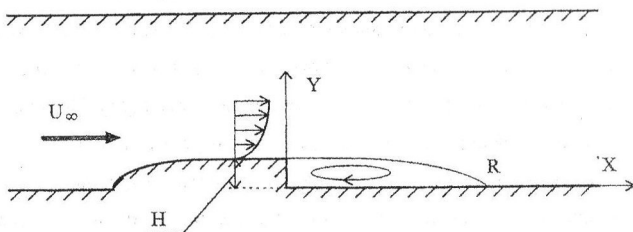


Рис.1. Схема экспериментального рабочего участка

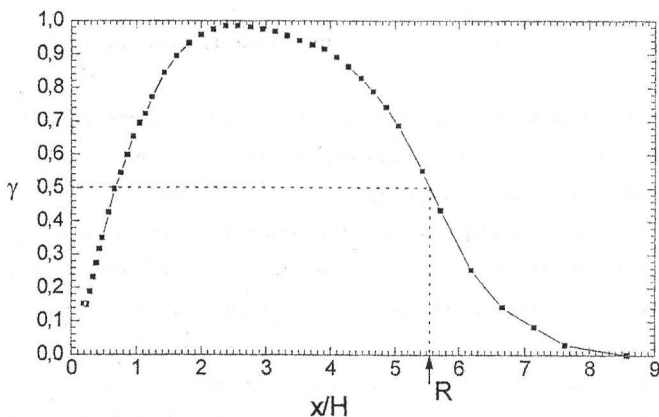


Рис.2. Изменение вероятности обратного течения γ по длине отрывной зоны

Результаты и обсуждение

Вероятность обратного течения

На рис.2 представлены результаты измерения вероятности обратного течения γ в зависимости от продольной координаты x . Каждое среднее значение γ определялось по шести выборкам. Среднеквадратичное отклонение γ для всех точек пространства не превышало 0,01. Как видно из рисунка, длина зоны присоединения (зоны, в которой $0,1 \leq \gamma \leq 0,9$) составляет около $4H$. Область относительно стационарного возвратного

течения ($\gamma > 0,9$) имеет протяженность $x=(2\div 3)H$. Координата средней точки присоединения $X_R=5,5H$. Координата средней точки вторичного отрыва возвратного течения ($\gamma=0,5$) получилась равной $0,7H$. Полученные результаты соответствуют известным данным [12].

Совместное распределение компонент вектора поверхностного трения

Данные, иллюстрирующие двумерное вероятностное распределение мгновенного вектора поверхностного трения τ в пространстве его компонент, представлены на рис.3. Точки на этих рисунках обозначают координаты конца мгновенного вектора поверхностного трения. Каждый рисунок содержит 5000 точек. Рис.3,а соответствует присоединившемуся сдвиговому слою ($\gamma=0$, $x\approx 8,5H$), рис.3,б — границе области присоединения ($\gamma=0,09$, $x\approx 7H$), рис.3,в — течению в районе средней точки присоединения ($\gamma=0,5$, $x\approx 5,5H$), рис.3,г — практически полностью возвратному течению ($\gamma=0,98$, $x\approx 2,5H$). В областях течения, где значения γ отличны от нуля и единицы, вид совместного распределения компонент вектора поверхностного трения τ_x и τ_z напоминает “бублик”. Наблюдающееся в этом случае отсутствие точек в окрестности точки (0;0) еще раз подтверждает, что мгновенная величина модуля вектора поверхностного трения никогда не равна нулю в течении за обратным уступом.

На рис.4 представлен годограф вектора поверхностного трения с шагом по времени $0,5$ мс в точке $x\approx 5,5H$ ($\gamma=0,5$). Этот график позволяет получить некоторое представление о динамике мгновенного вектора поверхностного трения в средней точке присоединения.

Средние компоненты и модуль вектора поверхностного трения; среднеквадратичные отклонения модуля вектора поверхностного трения и его компонент

Результаты оценки осредненных по времени значений модуля $|\tau|$, продольной τ_x и поперечной τ_z компонент вектора поверхностного трения за обратным уступом показаны на рис. 5. Из рисунка видно, что среднее значение поперечной компоненты

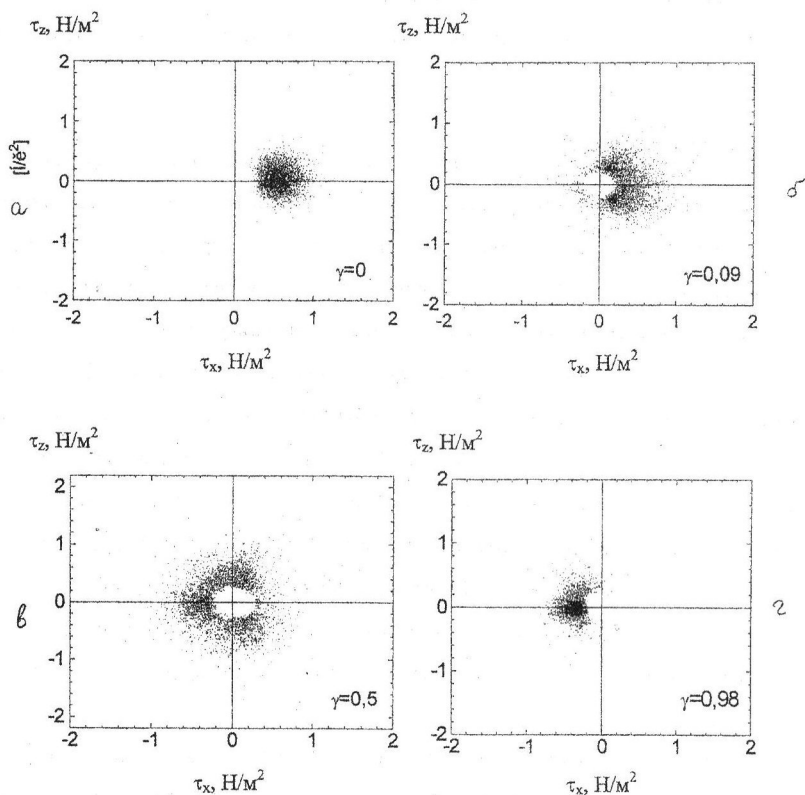


Рис.3. Совместное распределение компонент мгновенного вектора поверхностного трения в области присоединения потока: а — $\gamma=0$; б — $\gamma=0,09$; в — $\gamma=0,5$; г — $\gamma=0,98$

вектора трения τ_z по абсолютной величине не превышает $0,15 \text{ Н/м}^2$ по всей длине области измерений, что свидетельствует об относительной малости среднего скоса потока в отрывном течении. Изменение τ_x по длине отрывной зоны соответствует характеру изменения γ . Так, положения точек, соответствующих $\tau_x=0$ и $\gamma=0,5$, практически совпадают. В области преимущественно обратного течения ($\gamma > 0,5$) величина τ_x принимает отрицательные значения. Можно отметить низкую величину

модуля вектора поверхностного трения (не более $0,25\tau_x^{\text{нп}}$) в области существования вторичного углового вихря и сравнительно высокое его значение (свыше $0,6\tau_x^{\text{нп}}$) в зоне относительно стационарного обратного течения.

Среднеквадратичные отклонения модуля вектора поверхностного трения σ_{τ} , его продольной σ_{τ_x} и поперечной σ_{τ_z} компонент в зависимости от продольной координаты x/H представлены на рис.6,а. Низкие значения турбулентных пульсаций вектора трения в области углового вихря сменяются их бурным ростом в зоне рециркуляции. Максимумы σ_{τ_x} и σ_{τ_z} смещены влево по отношению к средней точке присоединения и располагаются в районе точки $x=4,8H$. Затем начинается постепенное убывание этих величин, по-видимому, доходящее в дальнейшем следе до уровня пульсаций в развитом турбулентном пограничном слое.

Относительные среднеквадратичные отклонения модуля вектора поверхностного трения $|\tau|$, его продольной τ_x и поперечной τ_z компонент в зависимости от продольной координаты x/H представлены на рис.6,б. Максимумы $\sigma_{\tau_x}/|\tau|$ и $\sigma_{\tau_z}/|\tau|$ совпадают, соответственно, со средним положением точек вторичного отрыва и присоединения.

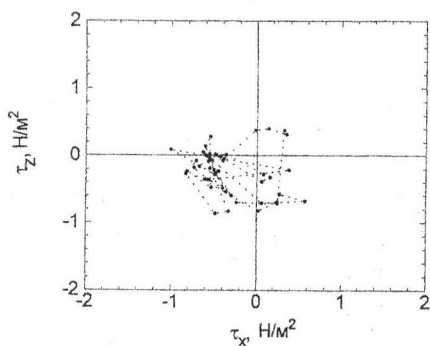


Рис.4. Годограф вектора поверхностного трения в точке $x=5,5H$ ($\gamma=0,5$)

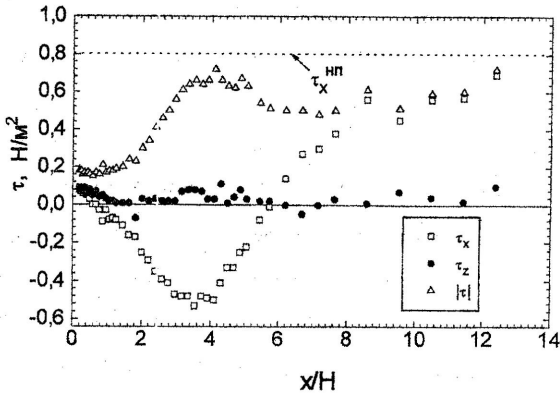


Рис.5. Изменение осредненного модуля вектора поверхностного трения $|\tau|$, его продольной τ_x и поперечной τ_z компонент в зависимости от x/H

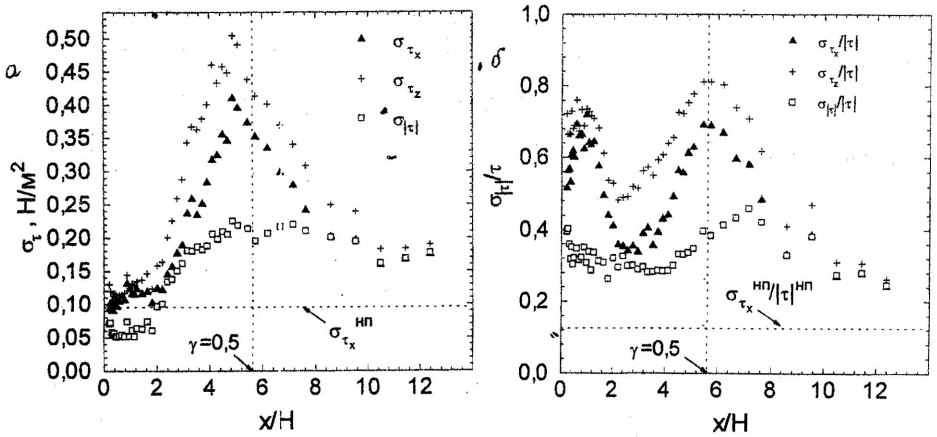


Рис.6. Абсолютные (а) и относительные (б) среднеквадратичные отклонения модуля и компонент вектора поверхностного трения в следе за обратным уступом

Заключение

Впервые проведены одновременные измерения двух компонент мгновенного вектора поверхностного трения в турбулентном отрывном течении за обратным уступом. Отмечено, что точка нулевого значения продольной компоненты вектора поверхностного трения $\tau_x=0$ практически совпадает со средней точкой присоединения ($\gamma=0,5$). Максимумы относительного среднеквадратичного отклонения компонент мгновенного вектора поверхностного трения $\sigma_{\tau_x}/|\tau|$ и $\sigma_{\tau_z}/|\tau|$ совпадают, соответственно, с точками среднего вторичного отрыва и присоединения. Максимумы σ_{τ_x} и σ_{τ_z} смещены влево по отношению к средней точке присоединения и располагаются в районе точки $x=4,8H$.

Работа выполнена при финансовой поддержке, оказанной Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № № 96-02-16735, 97-02-16039).

Список литературы

1. Bradshaw P., Wong F.Y. The reattachment and relaxation of a turbulent shear layer // *J.Fluid Mech.* 1972. Vol.52, part 1. P.113-135.
2. Итон Д., Джонстон Д. Обзор исследований дозвуковых турбулентных присоединяющихся течений // *Ракетная техника и космонавтика.* 1981. Т.19, №10. С.7-19.
3. Shih C., Ding Z., Buzyna G, Wang X. The unsteady flow structure of a backward-facing step // *In Flow Modeling and Turbulence Measurements VI*, Chen, Shih, Lienau & Kung (eds). 1996. Belkema, Rotterdam, 1996.
4. 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.
5. Шляжас Р.Б. Турбулентный перенос импульса и тепла в пограничном слое за препятствием: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Институт физико-технических проблем энергетики. Каунас. 1984.
6. Комаров И.П., Поляков А.Ф. Исследование характеристик турбулентности и теплообмена за обратным уступом в щелевом канале. М., 1996. (Препринт/ИВТАН №2-396). С.70.
7. Леонтьев А.И., Шишов Е.В., Захаров А.О. Моделирование переноса теплоты и импульса в отрывном турбулентном течении за обратным уступом // *Докл. РАН.* 1995. Т.341, №3. С.341-345.
8. Arnal M., Friedrich R. The Instantaneous Structure of a Turbulent Flow over a Back-Ward-Facing Step // *In Separated Flows and Jets.- Springer Berlin Heidelberg*, 1991.
9. Хабахпашева Е.М., Ефименко Г.И. Об использовании профилей скорости для определения поверхностного трения в потоке с положительным градиентом давления // *Сибирский физико-технический журнал.* Вып.1, 1992.
10. Adams E.W., Johnston J.P., Eaton J.K. Experiments on the structure of a turbulent, reattaching flow.- Rep. MD-43, Thermosciences Division, Dept. Mech. Eng., Stanford University, 1984.
11. Castro I.P., Dianat M., Bradbury L.J.S. The measurement of fluctuating skin friction with a pulsed wire wall probe // *In Turbulent shear flows 5*, Durst F., Launder B.E., Lumley J.L., Schmidt F.W., Whitelaw J.H. (eds). Springer Berlin Heidelberg, New York. 1987. P.278-290.

12. Итон Д., Джинс А., Эшджай Д., Джонстон Д. Датчик направления течения у стенки, используемый при исследовании отрывных и присоединяющихся течений // Теоретические основы инженерных расчетов. 1979. Т.101, №3. С.218-221.

13. Драйвер Д.М., Сигмиллер Х.Л., Марвин Дж.Г. Нестационарные процессы в присоединяющемся слое смешения // Аэрокосмическая техника. 1988. №3. С.35-42.

14. Козлов А.П. Проявление трехмерности в двумерных отрывных течениях // Докл. РАН. 1994. Т.338, №3. С.337-339.

15. Farabee T.M. An Experimental Investigation of Wall Pressure Fluctuations Beneath Non-Equilibrium Turbulent Flows.- Ph.D. Dissertation, The Catholic University of America, May 1986.

16. Козлов А.П., Михеев Н.И., Сайкин А.К. Термоанемометрический метод и датчик для измерения мгновенного вектора поверхностного трения // Тезисы докл. II Всерос. науч. конф. "Методы и средства измер. физ. величин", Н.Новгород, 18-19 июня 1997 г. Н.Новгород, 1997. Ч.2. С.41-42.

Занько Филипп Станиславович
Козлов Александр Павлович
Михеев Николай Иванович

МГНОВЕННЫЙ ВЕКТОР ПОВЕРХНОСТНОГО ТРЕНИЯ
В ТУРБУЛЕНТНОМ ОТРЫВНОМ ТЕЧЕНИИ
ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ
Препринт 98П11

Ответственный за выпуск Б.А.Малкина
ЛР № 020678 от 09.12.97

Формат 60×84 1/16. Печать офсетная. Бумага офсетная.

Печ.л. 1.0. Усл.печ.л. 0.93. Усл.кр.-отт. 0.93. Уч.изд.л. 0.97.

Тираж 50. Заказ В113/Р310

Казанский государственный технический
университет им.А.Н.Туполева.

Типография Казанского государственного технического
университета им.А.Н.Туполева
420111 Казань, К.Маркса, 10.