

Российская академия наук

Казанский государственный технический университет (КАИ)
им. А. Н. Туполева

Отдел энергетики Казанского научного центра РАН

Институт механики и машиностроения
Казанского научного центра РАН

**ПРОБЛЕМЫ
ТЕПЛОМАССОБМЕНА
И ГИДРОДИНАМИКИ
В ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИИ**

Труды Школы-семинара
молодых ученых и специалистов
под руководством
академика РАН В. Е. Алемасова

21-22 сентября 1999 г.
Казань, Россия

ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ОТРЫВНОЙ ЗОНЫ ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИСОЕДИНИВШЕГОСЯ ПОТОКА

Ф.С.Занько*, А.П.Козлов**, Н.И.Михеев**

*Казанский государственный технический университет им.А.Н.Туполева, Казань

**Отдел энергетики КНЦ РАН, Казань

Условные обозначения

X_R - продольная координата средней точки присоединения потока, мм

X'_R - продольная координата мгновенной точки присоединения потока, мм

H - высота уступа, мм

U_∞ - средняя скорость невозмущенного потока, м/с

x, y - продольная и вертикальная координаты соответственно, мм

τ_x - продольная компонента мгновенного вектора поверхностного трения, Н/м^2

Введение. В турбулентных течениях с отрывом и присоединением нередко имеют место нестационарные процессы. Но, несмотря на широкое распространение этих явлений, их механизм изучен недостаточно. Кроме того, нестационарные процессы, если их не учитывать, могут серьезно осложнить интерпретацию результатов измерений турбулентности. В качестве объекта исследования в настоящей работе используется турбулентное отрывное течение за обратным уступом. Основные экспериментальные результаты, а также гидродинамические свойства такого течения рассматривались, например, в обзоре [1]. Используя ЛДИС совместно с термодатчиками, установленными в зоне присоединения потока, Драйвер и др. [2] получили картины линий тока в условиях аномально раннего ($X'_R/H < 5,3$), промежуточного ($5,3 < X'_R/H < 6,8$) и аномально позднего ($X'_R/H > 6,8$) присоединения за обратным уступом. Для условий проведения эксперимента [2] координата средней точки присоединения $X_R \approx 6,2H$. Выяснилось, что мгновенное положение точки присоединения в каждый момент времени связано с размерами и некоторыми другими параметрами, характеризующими рециркуляционную область течения. В этой же работе представлены данные измерений условно усредненных полей скорости. Результаты указывают на наличие в течении за обратным уступом колебательных движений свободного слоя смешения в вертикальной плоскости. Этот феномен, как оказалось, тесно связан с осцилляциями мгновенной точки присоединения.

Основываясь на современных представлениях о нестационарной структуре турбулентного отрывного течения за обратным уступом, было бы логичным предположить, что присоединившийся поток за уступом также, как и зона отрыва, испытывает некие колебания.

Причем, эти колебания должны быть связаны с пульсациями положения мгновенной точки присоединения. Действительно, эксперименты, представленные в исследовании [3], продемонстрировали существование статистической связи между низкочастотной составляющей колебаний мгновенной точки присоединения и характеристиками профиля продольной компоненты скорости в присоединившемся сдвиговом слое. Цель настоящей работы - выявить влияние пульсаций точки присоединения за обратным уступом на развитие присоединившегося потока, оценить связь пульсаций мгновенной точки присоединения с продольной компонентой вектора поверхностного трения в развивающемся присоединившемся потоке.

Методика проведения эксперимента и измерительное оборудование. Эксперименты проводились в аэродинамической трубе с закрытой рабочей частью прямоугольного поперечного сечения $100 \times 130 \text{ мм}^2$. Обратный уступ с плавным входом имел высоту $H=21 \text{ мм}$ (рис.1). В невозмущенном потоке перед обратным уступом течение было двумерным с развитым турбулентным пограничным слоем толщиной 7 мм . Средняя скорость потока над уступом составляла $U_\infty=23 \text{ м/с}$, интенсивность пульсаций скорости - 1% .

В процессе экспериментов выполнялись двухточечные измерения поверхностного трения в следе за обратным уступом. В одной точке, расположенной ближе к уступу, измерялась лишь продольная компонента вектора трения, а в другой, расположенной на расстоянии $\Delta x=80 \text{ мм}$ ниже по потоку, - обе компоненты. Отсчет координат датчиков по оси x проводился от основания уступа (рис.1). Взаимное положение датчиков и уступа варьировалось путем перемещения уступа. Для измерения мгновенного вектора поверхностного трения использовался миниатюрный датчик с нагреваемыми металлическими нитями [4] в комплекте с термоанемометром постоянной температуры DISA 55M. Кроме того, был использован упрощенный вариант этого датчика, который назван датчиком направления [4]. Этот датчик был градуирован по продольной компоненте мгновенного вектора поверхностного трения. Подробное описание датчиков, их градуировки и методических испытаний приведено в [4].

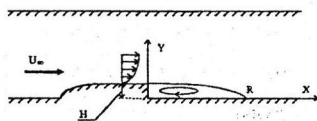


Рис.1. Схема рабочего участка

При различных положениях обратного уступа относительно двух упомянутых датчиков производился одновременный опрос их сигналов с частотой 2 кГц в течение 5 с с помощью аналого-цифрового преобразователя. Данные регистрировались в памяти компьютера.

Характеристики вектора поверхностного трения в отрывной области за уступом приведены в [5]. В настоящей работе проводился анализ только продольной компоненты вектора поверхностного трения. По знаку этой компоненты в следе за уступом оценивалась вероят-

ность обратного течения γ как доля отрицательных значений τ_x в выборке. Точку на стенке, для которой $\gamma=0,5$, принято называть средней точкой присоединения X_R . Вниз по потоку от этой точки выделим точку x_{II} позднего присоединения, для которой $\gamma=0,1$. Событие $\tau_x(x_{II})<0$ назовем *аномально поздним* присоединением.

По данным двухточечных измерений оценивались пространственно-временные корреляции продольной компоненты вектора поверхностного трения. Эти корреляционные функции имели ярко выраженный максимум, положение которого было сдвинуто на временной оси на величину $\Delta\tau_{\max}$. По величине этого сдвига при известном расстоянии между датчиками оценивалась скорость конвекции пульсаций продольной компоненты вектора поверхностного трения в следе за уступом $v_k=\Delta x/\Delta\tau_{\max}$. Временной сдвиг максимумов пространственно-временных корреляций τ_x использовался также при оценке условного трения в присоединившемся потоке в случае аномально позднего присоединения. Условное усреднение выполнялось лишь по реализации процесса, соответствующей размещению датчика направления в точке x_{II} . При усреднении продольной компоненты поверхностного трения в точке $x_{II}+\Delta x$ из выборки данных отбирались измеренные значения только в моменты времени, смещенные на время $\Delta\tau_{\max}$ относительно тех моментов, при которых в точке x_{II} имело место аномально позднее присоединение потока. Подобным образом в работе [3] оценивался условный профиль скорости в области релаксации присоединившегося сдвигового слоя за уступом.

В экспериментах оценивался также линейный интегральный масштаб турбулентных пульсаций продольной компоненты вектора поверхностного трения $L=v_k(x)\int_0^{\infty}R(\Delta\tau)d(\Delta\tau)$, где $R(\Delta\tau)=\langle\tau_x(t)\tau_x(t+\Delta\tau)\rangle/\langle\tau_x^2\rangle$ - автокорреляционная функция продольной компоненты мгновенного вектора поверхностного трения. При определении интегрального временного масштаба в качестве верхнего предела при интегрировании принималось значение смещения по времени, равное 10 мс.

Результаты экспериментов и обсуждение. Положение средней точки присоединения и точки аномально позднего присоединения потока в экспериментах зарегистрировано при $X_R=5,5H$ и $x_{II}=6,6H$ соответственно. На основе данных двухточечных измерений выявлена корреляционная связь между пульсациями продольной компоненты мгновенного вектора поверхностного трения в области присоединения потока и в присоединившемся сдвиговом слое. Пространственно-временные корреляционные функции имели выраженный мак-

симум как в случае установки датчика направления в точке x_{II} (рис.2), так и при всех остальных положениях датчиков относительно обратного уступа.

Смещение максимума корреляционной функции использовалось для оценки относительной конвективной скорости переноса пульсаций τ_x в продольном направлении v_k/U_∞ в течении за обратным уступом. Как видно из рис.3, по мере удаления датчиков от основания уступа в области присоединения эта скорость растет. Когда же оба датчика попадают в присоединившийся сдвиговый слой, величина v_k/U_∞ перестает заметно меняться. В этой области течения полученная в экспериментах оценка конвективной скорости переноса пульсаций поверхностного трения ($v_k/U_\infty = 0,77$) близка к выявленной в [6] продольной скорости движения организованных структур в обычном турбулентном пограничном слое ($0,8U_\infty$). Полученные данные свидетельствуют о том, что сформировавшиеся в оторванном сдвиговом слое крупномасштабные вихревые структуры после присоединения этого слоя к стеку переносятся вниз по потоку в среднем с постоянной скоростью, приблизительно такой же, как в развитом турбулентном пограничном слое. В окрестности точки присоединения потока средняя скорость конвекции турбулентных пульсаций значительно ниже, а еще ближе к уступу по данным [7] имеется область пристеночного течения, в которой интенсивность переноса пульсаций вверх и вниз по потоку приблизительно одинакова. С учетом относительно низкой частоты колебаний границ отрывной области можно предположить, что мгновенное направление переноса турбулентных пульсаций в окрестности средней точки присоединения потока зависит от мгновенного положения этой точки. Так, анализ осциллограмм поверхностного трения показал, что даже в точке x_{II} с преобладающим пристеночным течением в направлении внешнего потока

$$\frac{\langle \tau_x(x_1, t) \tau_x(x_2, t + \Delta\tau) \rangle}{\langle \tau_x^2(x_1) \rangle^{1/2} \langle \tau_x^2(x_2) \rangle^{1/2}}$$

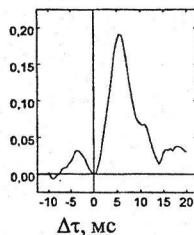


Рис.2. Пространственно-временная корреляционная функция продольной компоненты вектора поверхностного трения в присоединившемся сдвиговом слое ($x_2=10,4H$) и области присоединения ($x_1=6,6H$)

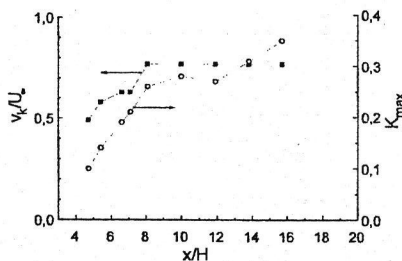


Рис.3. Изменение максимума пространственно-временных корреляций K_{max} и конвективной скорости переноса пульсаций поверхностного трения v_k/U_∞ в течении за обратным уступом; x - координата датчика направления

имели место длительные (свыше пяти интегральных временных масштабов турбулентных пульсаций) периоды реверсивного течения.

Пульсации отрывной области оказывают существенное влияние на характеристики присоединившегося потока. Выявлено, что условно усредненная продольная компонента поверхностного трения в точке $x_{II} + \Delta x$ при условии аномально позднего присоединения в точке x_{II} меньше своей средней оценки на 12%. Для сравнения отметим, что практически на таком же относительном расстоянии между датчиками в эксперименте [3], связанном с измерением продольной компоненты скорости в присоединившемся потоке, аналогичное относительное отклонение условной средней скорости на расстоянии 1 мм от стенки при условии аномально позднего присоединения было меньше ее средней оценки лишь на 5,6%. На основе же представлений об осредненной картине течения следовало ожидать превышения условного поверхностного трения над средней величиной, т.к. случаю аномально позднего присоединения потока соответствует более короткий участок формирования пограничного слоя ниже точки присоединения. По-видимому, параметры присоединившегося потока в значительной степени определяются взаимодействием крупномасштабных вихревых структур, формирующихся в оторвавшемся сдвиговом слое, со стенкой. Зона на стенке, в которой это взаимодействие наиболее интенсивно, совершает низкочастотные колебания вместе с колебаниями границ отрывной области.

В качестве меры организованности движения и взаимодействия со стенкой крупномасштабных вихревых структур можно рассматривать максимальную величину пространственно-временных корреляций K_{max} . Как видно из рис.3, при фиксированном взаимном смещении точек измерения поверхностного трения по продольной координате в ближнем следе за обратным уступом по мере удаления от его основания взаимосвязь пульсаций поверхностного трения становится более тесной. В присоединившемся потоке максимальные корреляции ($K_{max} \approx 0,3$) приблизительно в три раза выше, чем в пограничном слое невозмущенного потока: по данным двухточечных измерений поверхностного трения в рабочем участке без уступа при том же расстоянии между датчиками K_{max} не превышает 0,1. По-видимому, большие значения корреляций в присоединившемся потоке по сравнению с невозмущенным потоком обусловлены тем, что в следе за уступом вихревые структуры

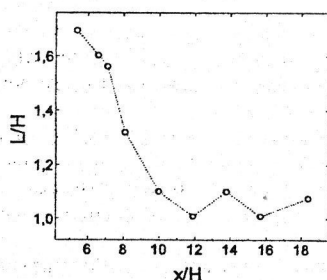


Рис.4. Относительный линейный пристеночный масштаб L/H в течениях за обратным уступом

имеют больший интегральный масштаб.

Оценки линейного интегрального масштаба турбулентных пульсаций продольной компоненты поверхностного трения в турбулентном отрывном течении за обратным уступом приведены на рис.4. Как видно из рисунка, по мере удаления от средней точки присоединения потока интегральный масштаб пристеночных турбулентных пульсаций уменьшается и в полностью присоединившемся потоке имеет приблизительно постоянное значение порядка одной высоты ступеньки.

Выводы. Колебания зоны отрыва за обратным уступом оказывают влияние на присоединившийся сдвиговой слой в области, находящейся на значительном расстоянии вниз по течению от зоны присоединения. Возможно, это влияние обусловлено взаимодействием крупномасштабных вихревых структур, формирующихся в оторвавшемся сдвиговом слое, со стенкой. Более короткой области рециркуляции соответствует большая величина продольной составляющей вектора поверхностного трения. Относительное отклонение условно усредненного значения продольной компоненты мгновенного вектора поверхностного трения в случае аномально позднего присоединения от соответствующей оценки среднего значения трения оказалось равным 12%, что превышает аналогичное относительное отклонение условно усредненной продольной компоненты скорости на расстоянии от стенки 1 мм (~6%).

Работа выполнена при финансовой поддержке, оказанной Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 96-15-96767, № 97-02-16039) и Федеральной целевой программой «Интеграция» (проект №.244).

Список литературы

1. Итон Дж.К., Джонстон Дж.П. Обзор исследований дозвуковых турбулентных присоединяющихся течений // Ракетная техника и космонавтика 1981.- Т.19.- №10.- С.7-19.
2. Драйвер Д.М., Сигмиллер Х.Л., Марвин Дж.Г. Нестационарные процессы в присоединяющемся слое смешения // Аэрокосмическая техника 1988.- №3.- С.35-42.
3. 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.
4. Козлов А.П., Михеев Н.И., Молочников В.М., Сайкин А.К. Термоанемометрические измерения поверхностного трения в отрывных течениях. Казань, 1998.- 134 с.
5. Занько Ф.С., Козлов А.П., Михеев Н.И. Мгновенный вектор поверхностного трения в турбулентном отрывном течении за обратным уступом / Преприят 98П111. - Казань, КГТУ, 1998. - 14с.
6. Brown G.L., Thomas A.S.W. Large structure in a turbulent boundary layer // Phys. Fluids.- 1977.- V.20 (10).- P.243-252.
7. Михеев Н.И. Динамика пространственных полей поверхностного трения в турбулентном отрывном течении // Доклады Академии наук. – 1999. Т.364, №4,с. 479-482.