

На правах рукописи

УДК 532.526.4

ЗАНЬКО Филипп Станиславович

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ПРИСОЕДИНЯЮЩЕМСЯ ОТРЫВНОМ
ТЕЧЕНИИ ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ

01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань, 1998

Работа выполнена в Казанском государственном техническом университете им. А.Н.Туполева (КАИ) г.Казань

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор А.П.Козлов

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор А.В.Щукин

Кандидат технических наук, ст.н.с. В.В.Леманов

Ведущая организация: Институт механики и машиностроения КНЦ РАН,
г.Казань

Защита диссертации состоится “ ____ ” _____ 1999 г.
в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 063.43.01
в Казанском государственном техническом университете
им. А.Н.Туполева по адресу: 420111, г.Казань, ул.К.Маркса, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского
государственного технического университета им. А.Н.Туполева.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 1999 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н., с.н.с.

А.Г.Каримова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы определяется необходимостью учитывать в различных численных методах расчета, а также в инженерной практике влияние нестационарных процессов на присоединяющиеся турбулентные течения и пограничные слои, которые имеют место в ядерных реакторах, газовых турбинах, камерах сгорания, электронной аппаратуре и других технических устройствах.

Целью работы являются:

- получение экспериментальных данных о векторе поверхностного трения в турбулентном течении за обратным уступом;
- количественная оценка влияния нестационарных процессов на параметры присоединившегося турбулентного течения за обратным уступом;
- объяснение физических механизмов влияния нестационарных процессов на присоединившееся турбулентное течение за обратным уступом.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Получены средние, пульсационные, корреляционные и спектральные характеристики вектора поверхностного трения в турбулентном течении за обратным уступом.
2. Выявлена корреляционная связь пульсаций мгновенной точки присоединения с профилем скорости и продольной компонентой вектора поверхностного трения в присоединившемся сдвиговом слое за обратным уступом.
3. Предложена физическая модель влияния нестационарных процессов в области присоединения течения на развитие присоединившегося сдвигового слоя за обратным уступом. Модель объясняет известный феномен резкого падения уровня напряжений Рейнольдса и интенсивности турбулентности за средней точкой присоединения.

Практическая ценность работы определяется новыми представлениями о влиянии нестационарных процессов на развитие присоединяющегося турбулентного течения за обратным уступом, а также экспериментальными данными о векторе поверхностного трения, что необходимо для разработки и тестирования новых численных методов расчета.

На защиту выносятся:

- спектры пульсаций продольной и поперечной компонент вектора поверхностного трения в следе за обратным уступом;
- корреляционные характеристики турбулентного течения за обратным уступом;
- данные по скорости передачи информации о возмущении в присоединившемся сдвиговом слое;
- линейные интегральные пристеночные масштабы в следе за обратным уступом;

- концептуальная модель влияния нестационарных процессов в области присоединения течения на развитие присоединившегося сдвигового слоя за обратным уступом.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах в КазНЦ РАН, КГТУ им. А.Н.Туполева и КФМЭИ.

Публикации

Автор имеет 8 научных трудов. Основные результаты диссертации опубликованы в 5 работах.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем диссертации - 100 стр., в том числе 61 рисунок и 2 таблицы, расположенные по тексту, а также список литературы, включающий 61 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы исследования; сформулированы цель исследования и основные положения, которые вынесены на защиту; определен личный вклад соискателя в приведенные в диссертации результаты.

В **первой главе** рассмотрены современные представления о нестационарных процессах в турбулентном отрывном течении за обратным уступом, а также представления о релаксации присоединившегося пограничного слоя.

Отмечено, что в настоящее время не существует инженерных методов расчета, удовлетворительно воспроизводящих основные характеристики присоединяющегося отрывного течения. Одной из причин этого является существенная нестационарность процессов, влияющих на усредненную картину течения.

Показано, что релаксация присоединившегося сдвигового слоя - длительный немонотонный процесс восстановления структуры, свойственной обычному турбулентному пограничному слою. Причем, в этом процессе перестройки внутренняя и внешняя части присоединившегося сдвигового слоя ведут себя как единое целое, несмотря на существенную разницу в динамических свойствах.

Представлены данные о механизме и свойствах нестационарных процессов в турбулентном отрывном течении за обратным уступом. Замечено, что дальнейший прогресс в физическом понимании этих процессов возможен на основе анализа мгновенных пространственно-временных полей параметров турбулентного течения.

На основе выполненного обзора известных исследований сделан вывод о том, что в настоящее время остается открытым вопрос о связи между нестационар-

нарными процессами в области присоединения и параметрами релаксирующего присоединившегося турбулентного течения за обратным уступом, хотя очевидно, что нестационарность непосредственно влияет на формирование структуры и дальнейшую релаксацию вновь образованного пограничного слоя.

По результатам проведенного обзора поставлены задачи исследования.

Во **второй главе** дано описание экспериментального оборудования, на котором проводилось исследование, детально описаны условия и методика его проведения.

Эксперименты проводились в двух аэродинамических трубах (АТ1 и АТ2) разомкнутого типа, выполненных по одинаковой схеме. Рабочий участок аэродинамической трубы АТ1 имел прямоугольное поперечное сечение $0,1 \times 0,13 \text{ м}^2$. При установившемся режиме работы вентилятора скорость потока в рабочем участке могла изменяться от 2 до 60 м/с. Рабочая часть аэродинамической трубы АТ2 представляла собой канал прямоугольного поперечного сечения, собранный из нескольких секций. Высота канала $A=0,2 \text{ м}$, ширина $B=0,4 \text{ м}$, длина $L=3 \text{ м}$. Диапазон регулирования скорости в ядре потока – 1,5 ... 30 м/с. Интенсивность пульсаций продольной компоненты скорости в ядре потока плавно изменялась от 4% при $U_\infty = 4,8 \text{ м/с}$ до 1...1,5% при $U_\infty = 30 \text{ м/с}$. В обеих аэродинамических трубах (АТ1 и АТ2) на стенках рабочего участка был развитый турбулентный пограничный слой.

Описан термоанемометрический метод измерения скорости и поверхностного трения, используемый в данной работе. Применялись 4 вида термоанемометрических датчиков: одноточечный датчик скорости, трехточечный датчик направления, шеститочечный датчик мгновенного вектора поверхностного трения и двухточечный датчик направления с выступом, отградуированный по продольной компоненте вектора поверхностного трения.

Предельно допустимая частота измерения реверсирования потока в случае трехточечного датчика направления составляла примерно $70 \div 100 \text{ Гц}$.

Приведена косвенная оценка относительной приведенной круговой погрешности измерения мгновенного вектора поверхностного трения, которая при доверительной вероятности 0,95 составляет 2,2...2,8% в зависимости от модификации датчика. Эта оценка не учитывает погрешности образцового средства для измерения трения, в качестве которого использовались данные, полученные с помощью метода Клаузера. Относительная погрешность такого образцового средства измерения поверхностного трения составляет около 5%.

Данные математического моделирования АЧХ и ФЧХ датчика направления с выступом представлены на рис.1. Предельная частота, до которой возможно измерение пульсаций направления пристеночной скорости с помощью такого датчика может быть оценена приблизительно в 100 Гц.

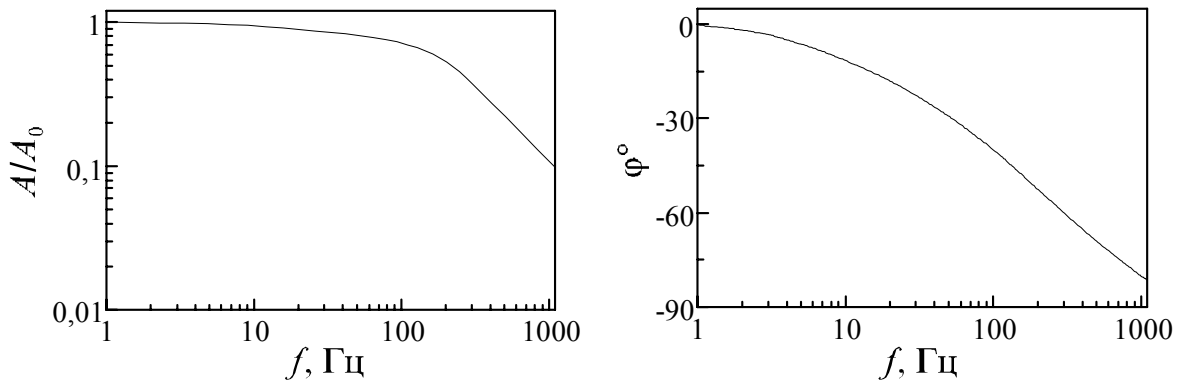


Рис.1. АЧХ (слева) и ФЧХ датчика направления с выступом

Поскольку в настоящих экспериментах представляла интерес только низкочастотная составляющая пульсаций мгновенной точки присоединения, то измерения с помощью трехниточного датчика направления, а также датчика направления с выступом можно считать достаточно достоверными. Характерная частота когерентных структур, образующихся в оторвавшемся слое смещения за обратным уступом, во всех экспериментах не превышала 100 Гц.

Приведено описание методов обработки экспериментальных данных, использованных в данной работе: техники условного усреднения и техники усреднения по переменному интервалу времени (техники VITA).

Экспериментальные данные были получены при следующих основных параметрах: высота уступа $h=20...23$ мм; $U_\infty=10...25$ м/с; $Re_H=U_0h/\nu=17000...41000$; длина области отрыва за обратным уступом $X_R=4,9...5,5h$. Обратный уступ устанавливался в рабочем участке аэродинамической трубы (рис.2).

В экспериментах проводились одновременные измерения скорости в присоединившемся потоке за обратным уступом, а также мгновенного направления потока в области присоединения. Для измерений скорости использовался одноточечный датчик. Для измерений мгновенного направления потока использовался трехниточный датчик направления.

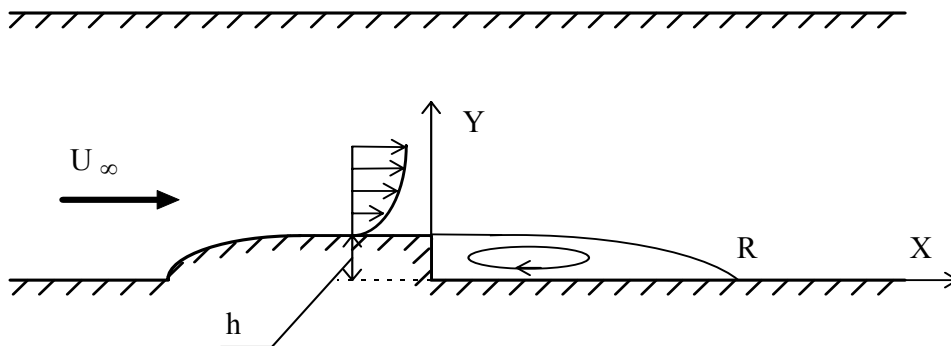


Рис.2. Схема рабочего участка

По результатам измерения мгновенного направления скорости оценивалась вероятность обратного течения γ , как доля времени, в течение которого направ-

ление потока вблизи стенки и основного потока противоположны. Точка на стенке, в которой $\gamma=0,5$, приблизительно совпадает со средней точкой присоединения X_R .

Введена следующая условная модель процесса присоединения. Считается, что мгновенная точка присоединения всегда единственная (хотя на самом деле это совсем не обязательно). В окрестности точки R (рис.2) выделим точки раннего x_p и позднего x_n присоединения, для которых $\gamma=0,9$ и $\gamma=0,1$ соответственно. Событие, когда в точке x_p мгновенное направление потока совпадает с направлением основного потока, будем называть *аномально ранним присоединением*. Событие, когда в точке x_n мгновенное направление потока противоположно направлению основного потока, назовем *аномально поздним присоединением*, а присоединение, не удовлетворяющее этим двум условиям, - *промежуточным*.

Датчик направления поочередно устанавливался в точках x_p , X_R , x_n . При этих положениях датчика направления положение чувствительного элемента датчика скорости варьировалось только по координате y в пределах сдвигового слоя. Продольная координата расположения датчика скорости во всех случаях оставалась неизменной: $\bar{x} = 9,6$. В этом месте присоединившегося сдвигового слоя, как показали измерения, определенно нет возвратных токов.

В исследовании выполнялись двухточечные измерения поверхностного трения τ в следе за обратным уступом. В одной точке, расположенной ближе к уступу, измерялась лишь продольная компонента вектора трения, а в другой, расположенной на расстоянии $\Delta x=80$ мм ниже по потоку, - обе компоненты. Отсчет координат датчиков по оси X проводился от основания уступа. Взаимное положение датчиков и уступа варьировалось путем перемещения уступа. Для измерения мгновенного вектора поверхностного трения использовался датчик мгновенного вектора поверхностного трения. Кроме того, использовался датчик направления с выступом, который был отградуирован по продольной компоненте мгновенного вектора трения.

Линейный интегральный масштаб по продольной компоненте вектора поверхностного трения τ_x оценивался по формуле:

$$L = v_k^x(x) \int_0^{\infty} R(\Delta\tau) d(\Delta\tau),$$

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, v_k - конвективная скорость переноса пульсаций трения в продольном направлении.

В ходе экспериментов проводились локальные измерения вектора поверхностного трения в рециркуляционной зоне, зоне присоединения и области присоединившегося сдвигового слоя с помощью датчика поверхностного трения. Для измерений средней и пульсационной компонент продольной составляющей скорости использовался одноточечный датчик. Для измерения пространствен-

но-временных корреляционных функций поверхностного трения и скорости в потоке использовались одновременно оба описанных 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.

Для измерения пространственно-временных корреляционных функций поверхностного трения и скорости в потоке использовались одновременно оба описанных 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.

В **третьей** главе на основании полученных экспериментальных данных анализируются различные характеристики вектора поверхностного трения, а также влияние нестационарных процессов на присоединяющееся течение за обратным уступом.

На рис.3 представлены спектры пульсаций продольной компоненты вектора поверхностного трения в различных точках, распределенных по всей длине измерительной области 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. Для рециркуляционной зоны отмечена следующая особенность: роль высокочастотной области возрастает с удалением от уступа вниз по течению.

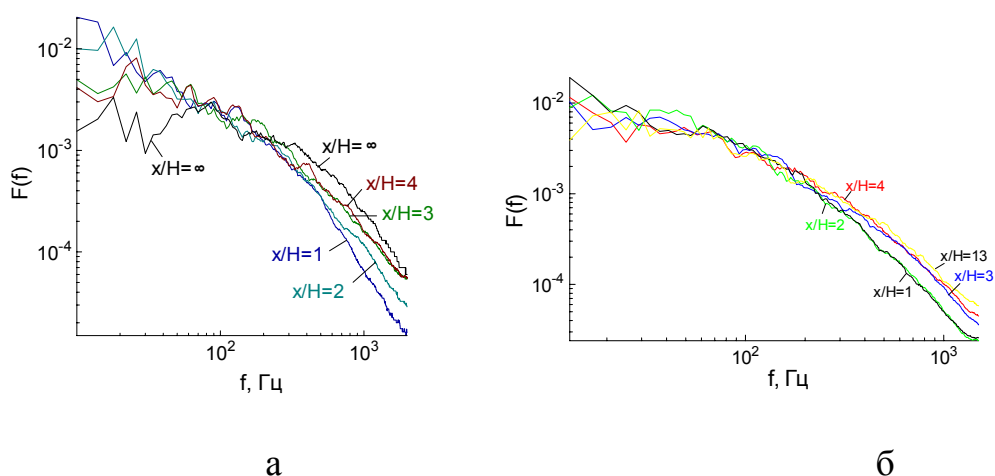


Рис.3. Спектральные плотности продольных пульсаций вектора поверхностного трения в рециркуляционной зоне течения за обратным уступом: а - $U_{\infty}=17,2$ м/с; б - $U_{\infty}=10,1$ м/с

Это справедливо для пульсаций как продольной, так и поперечной составляющей вектора поверхностного трения. Подобная тенденция была ранее отме-

чена по отношению к пульсациям давления на стенке. Возможно, это связано с постепенным приближением к поверхности проходящего сверху сильно турбулизированного оторвавшегося сдвигового слоя.

На рис.4 показаны величины максимумов (K) пространственно-временных корреляционных функций (ПВКФ) $R_{\tau_x U}(t_1, t_2)$ 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

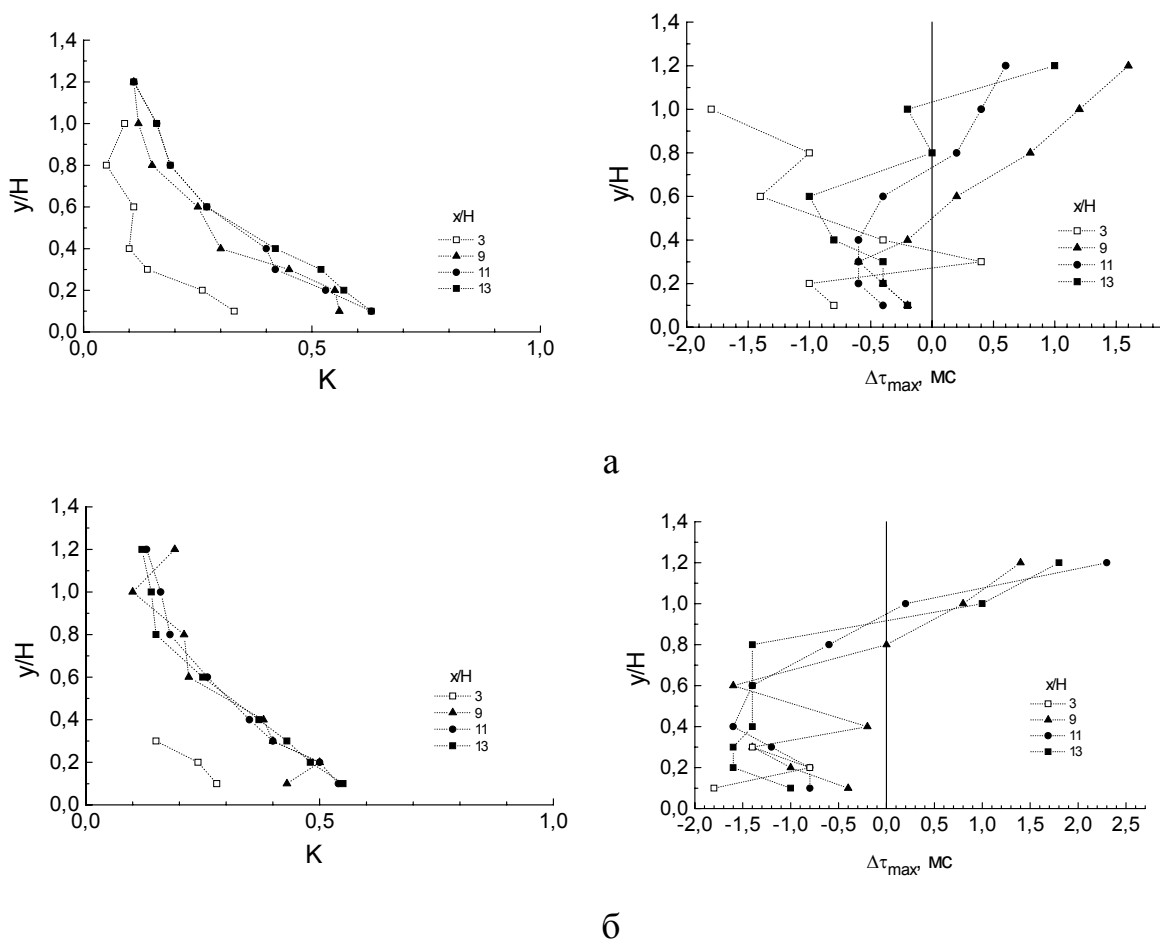


Рис.4. Величины максимумов (K) пространственно-временных корреляционных функций $R_{\tau_x U}(t_1, t_2)$ и их положение относительно нуля на временной оси $\Delta\tau_{\max}$ для случая присоединившегося сдвигового слоя ($x=9...13$ h) и зоны рециркуляции ($x=3$ h): а - $U_\infty=17,2$ м/с; б - $U_\infty=10,1$ м/с

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.

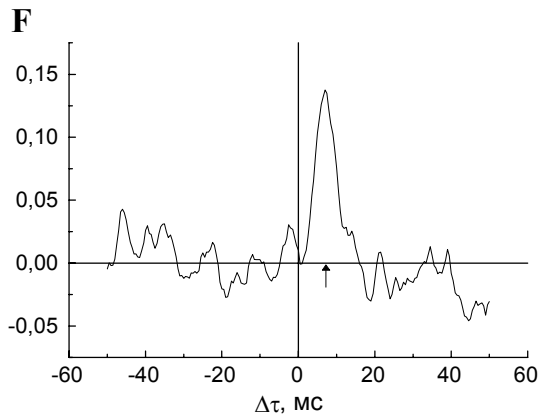


Рис.5. Взаимнокорреляционная функция $F = \frac{\langle U_w(x, t)U(y, t + \tau) \rangle}{\langle U'^2(y) \rangle^{1/2} \langle U_w'^2(x) \rangle^{1/2}}$ скорости в присоединившемся сдвиговом слое ($y=1$ мм) и направления скорости вблизи стенки ($x=5,74 h$)

Результаты настоящих исследований показали существование корреляционной связи между мгновенным направлением скорости вблизи стенки в области присоединения потока и пульсациями мгновенной скорости в присоединившемся сдвиговом слое (рис.5). Взаимнокорреляционные функции имеют отчетливый максимум (отмечен на рисунке стрелкой) во всех случаях установки датчика направления в точках x_p и $x_{п}$, за исключением расположения датчика скорости в точке $y=1,74h$, заведомо лежащей за пределами зоны влияния рециркуляционного течения.

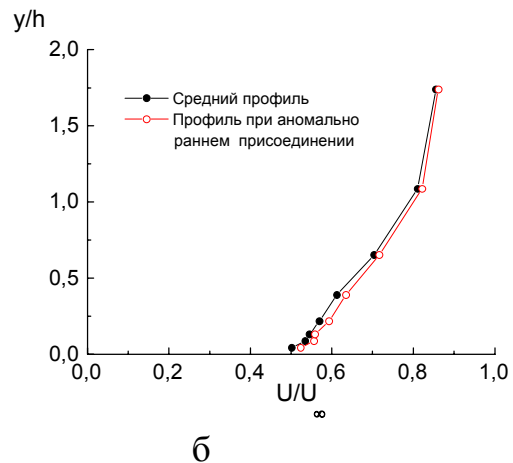
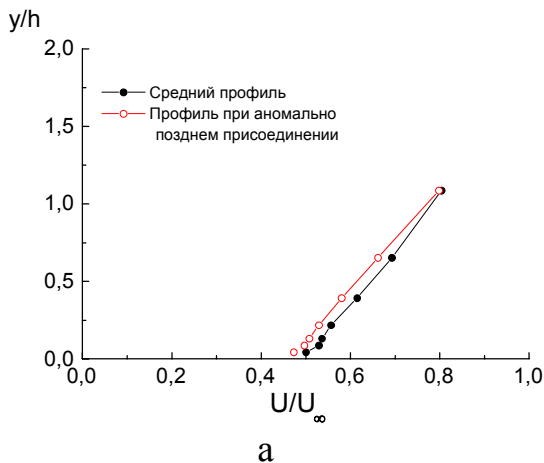


Рис.6. Взаимнокорреляционная функция скорости в присоединившемся сдвиговом слое ($y=1$ мм) и направления скорости вблизи стенки ($x=5,74 h$)

Средние и условно усредненные профили продольной составляющей скорости U показаны на рис.6,а и б. Как видно из рисунка, условно усредненные профили скорости, соответствующие anomalно раннему и anomalно позднему присоединению, заметно отличаются от среднего профиля. Причем, скорость,

соответствующая аномально позднему присоединению, меньше средней скорости (рис.6,а), в то время как скорость, соответствующая аномально раннему присоединению, напротив, выше средней скорости (рис.6,б). Все это свидетельствует о существовании “колебательного движения” вновь развивающегося пограничного слоя в течении за уступом.

В экспериментах выявлена *корреляционная связь между пульсациями продольной составляющей мгновенного вектора поверхностного трения* в области присоединения потока и в присоединившемся сдвиговом слое (рис.7). Пространственно-временные корреляционные функции имеют отчетливый максимум при всех положениях датчиков относительно обратного уступа.

Рассмотрено, как изменяется *максимальное значение пространственно-временной корреляции сигналов датчика трения и датчика направления* K_{\max} в зависимости от расположения датчика направления относительно уступа (рис.8). Как видно из рисунка, максимум пространственно-временных корреляций имеет место при относительном расстоянии датчика направления около $16h$ от основания выступа и превышает 0,3. Величина корреляций в течении за обратным уступом значительно превосходит максимальные корреляции в пограничном слое (по измерениям без уступа), не превышающие 0,1 при том же расстоянии между датчиками. По-видимому, большие значения корреляций в присоединившемся потоке по сравнению с невозмущенным потоком обусловлены тем, что в следе за обратным уступом характерные вихревые структуры имеют

большой интегральный масштаб.

На рис.8 показано изменение относительной конвективной скорости переноса пульсаций поверхностного трения в продольном направлении v_k/U_∞ в зависимости от расположения датчика направления относительно обратного уступа. По мере удаления датчика направления от обратного уступа в области присоединения эта скорость растет. Когда же оба датчика попадают в присоединившийся сдвиговый слой, величина v_k/U_∞ перестает заметно изменяться.

В точке $x_{п}$ (точке аномально позднего присоединения с преобладающим положительным направлением потока вниз по течению)

$$\frac{\langle \tau_{x1}(x_1, t) \tau_{x2}(x_2, t) \rangle}{\langle \tau_{x1}^2(x_1) \rangle^{1/2} \langle \tau_{x2}^2(x_2) \rangle^{1/2}}$$

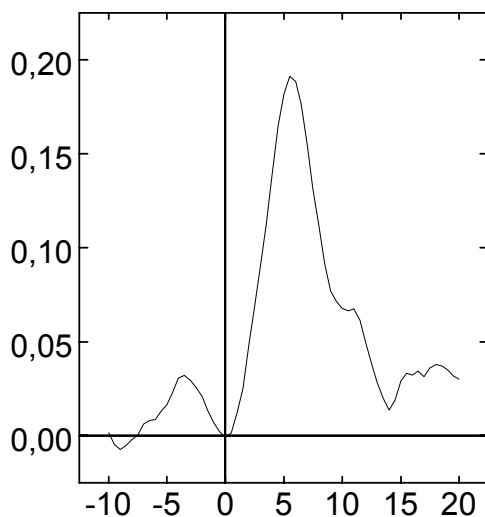


Рис.7. Пространственно-временная корреляционная функция продольных компонент вектора трения в присоединившемся сдвиговом слое ($x=10,4 h$) и в области присоединения ($x=6,6 h$)

максимальный временной масштаб включений жидкости, имеющей отри-

цательную скорость, достигает 9 мс, а минимальный - 0,5 мс для принятых условий эксперимента.

На основе оценки максимального линейного масштаба отрицательных включений жидкости в точке аномально позднего присоединения x_{II} было отмечено, что, с одной стороны, если бы конвективная скорость переноса пульсаций поверхностного трения в этот промежуток времени равнялась средней за все время эксперимента, то через 5,5 мс (см. рис.7) аномально низкие значения τ_x были бы зафиксированы вторым датчиком, стоящим ниже по потоку, чего в действительности не происходит. С другой стороны, неясно, почему конвективная скорость переноса пульсаций поверхностного трения v_k направлена вниз по течению, если скорость в непосредственной близости от стенки в течение 9 мс имеет противоположное направление.

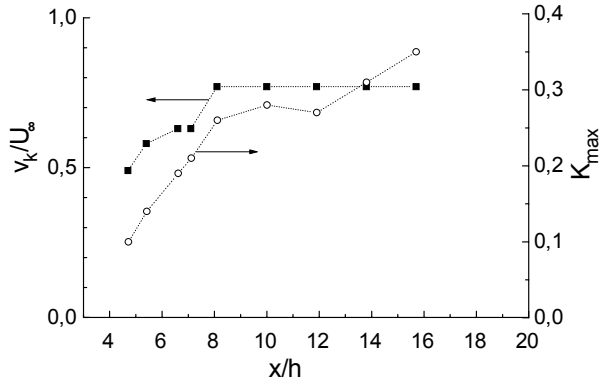


Рис.8. Изменение величины максимума ПВКФ K_{max} и относительной продольной конвективной скорости переноса пульсаций продольной компоненты вектора поверхностного трения v_k/U_∞ за обратным уступом

чено, что, с одной стороны, если бы конвективная скорость переноса пульсаций поверхностного трения в этот промежуток времени равнялась средней за все время эксперимента, то через 5,5 мс (см. рис.7) аномально низкие значения τ_x были бы зафиксированы вторым датчиком, стоящим ниже по потоку, чего в действительности не происходит. С другой стороны, неясно, почему конвективная скорость переноса пульсаций поверхностного трения v_k направлена вниз по течению, если скорость в непосредственной близости от стенки в течение 9 мс имеет противоположное направление.

По-видимому, это объясняется тем, что конвективная скорость v_k в области присоединения может изменять свое направление в зависимости от положения мгновенной точки присоединения.

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: $\langle U | \tau_x \geq \langle \tau_x \rangle + \sigma_{\tau_x} \rangle$ и $\langle U | \tau_x \leq \langle \tau_x \rangle - \sigma_{\tau_x} \rangle$. Сигналы по скорости и по трению относительно друг друга по времени не сдвигались. Полученные результаты показаны на рис.9 в виде относительного отклонения условно усредненного профиля скорости от собственно среднего. Указанное отклонение нормировалось по величине средней скорости и σ_x . На рис.9,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 $\langle U | \tau_x \rangle / U$ мало. Однако, если в качестве нормирующей величины взять σ_x (рис.9,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 σ_x вблизи стенки).

Развитие во времени ненормированного отклонения условно усредненного профиля скорости от среднего по условию $\langle U | \tau_x \geq \langle \tau_x \rangle + \sigma_{\tau_x} \rangle$ показано на

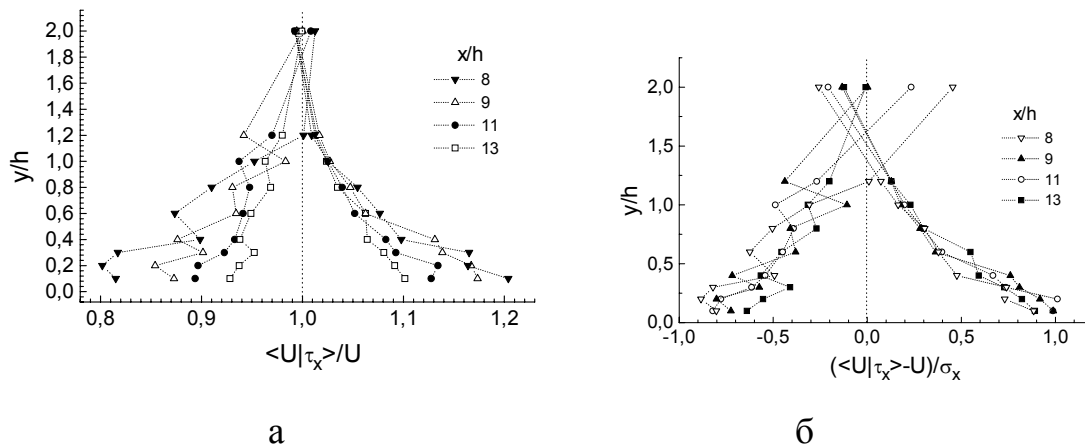


Рис.9. Условно усредненные профили скорости в присоединившемся сдвиговом слое ($U_\infty=10,1$ м/с) по условиям $\langle U | \tau_x \geq \langle \tau_x \rangle + \sigma_{\tau_x} \rangle$ и $\langle U | \tau_x \leq \langle \tau_x \rangle - \sigma_{\tau_x} \rangle$: а - нормированные по средней скорости U ; б - нормированные по интенсивности пульсаций скорости σ_x

рис.10 ($U_\infty=10,1$ м/с; $x=11$ h). Опять-таки, статистически наиболее тесно связанными с пульсациями трения оказались наиболее близкие пристеночные слои жидкости. Однако сначала возмущаются слои, расположенные на высоте $0,3h$. Лишь затем возмущение достигает своего максимума в непосредственной близости от стенки ($y=0,1h$). Затем оно также быстро затухает сперва вблизи стен-

ки, а далее и по всему профилю скорости, оставляя небольшой «след» на высоте $y=0,6h$.

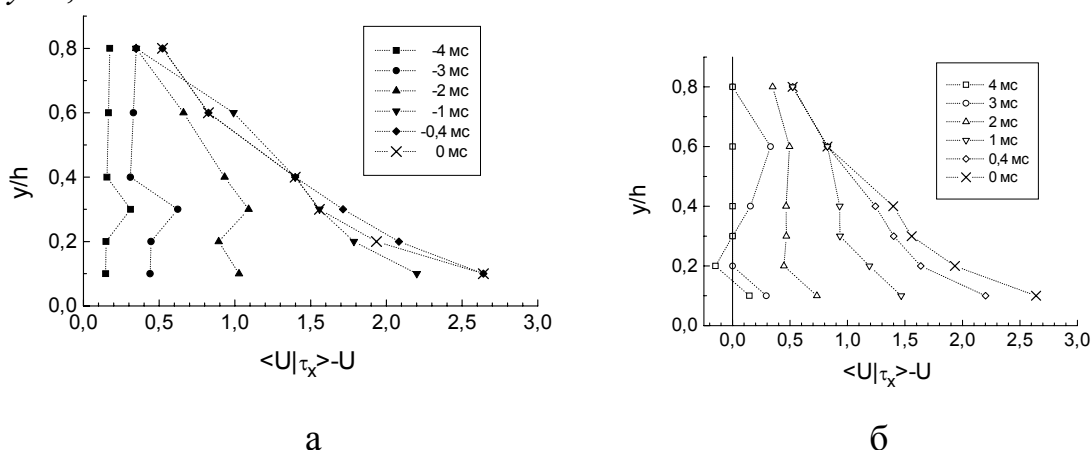


Рис.10. Развитие во времени ненормированного отклонения условно усредненного профиля скорости от среднего $\langle U | \tau_x \rangle - U$ по условию $\langle U | \tau_x \rangle \geq \tau_x + \sigma_{\tau_x}$ (режим I; $x=11h$)

Предложена упрощенная физическая модель нестационарных явлений, имеющих место в области присоединения потока за обратным уступом. Для того, чтобы выяснить, какой физический фактор определяет влияние аномального присоединения на трение и скорость в присоединившемся сдвиговом слое, рассмотрим три основных варианта, известных по работам других исследователей.

А. Изменение продольной координаты точки начала развития нового пограничного слоя после присоединения. Точка присоединения изменяет свое положение, и в разные моменты времени в фиксированную точку в присоединившемся течении вновь развивающийся пограничный слой приходит в разных фазах своего развития. Подразумевается, что пульсации точки присоединения (по крайней мере их крупномасштабная низкочастотная составляющая) связаны с маховым движением оторвавшегося слоя смещения и изменением размеров всей отрывной области.

Оценим толщину вновь развивающегося внутреннего сдвигового слоя в сечении, где измерялись условно усредненные профили скорости (рис.6). (Если обнаруженная корреляционная связь аномального присоединения с параметрами присоединившегося течения реализуется за счет изменения продольной координаты точки начала развития нового пограничного слоя после присоединения, то зона ее влияния должна ограничиваться толщиной вновь нарастающего пограничного слоя.) Для этого воспользуемся известной формулой для толщины турбулентного пограничного слоя на плоской пластине при нулевом градиенте давления:

$$\delta = 0,37x \left(\frac{U_{\infty} x}{\nu} \right)^{1/5}$$

Для наших данных получаем толщину внутреннего сдвигового слоя $3\div 4$ мм ($0,13\div 0,17h$). Из рисунка 6 следует, что условно усредненный профиль скорости изменяется вплоть до высоты $1h$ и выше. Кроме того, аномально раннее присоединение должно вызывать уменьшение скорости в данной точке присоединившегося сдвигового слоя, т.к. пограничный слой успеваеет стать более толстым, а жидкость в нем сильнее тормозится (см. формулу $\frac{u}{U_\infty} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7}$ для обычного пограничного слоя на плоской пластине). Таким образом, вариант А не может объяснить рассматриваемое явление.

Б. Перенос пульсаций трения и скорости осуществляется благодаря движению крупномасштабных когерентных структур, образующихся в оторвавшемся слое смещения.

То, что крупные вихри, аналогичные образующимся в плоских слоях смещения, присутствуют в течении за обратным уступом, не вызывает сомнения у подавляющего большинства исследователей. Однако обратимся к рис.6. Если бы влияние аномального присоединения на профиль скорости в присоединившемся сдвиговом слое реализовывалось только за счет прохождения неких крупномасштабных вихрей, то вблизи стенки и во внешней части присоединившегося потока условно усредненный профиль испытывал бы деформацию, противоположную по знаку (допустим, поток тормозился бы внизу и ускорялся вверху, если предполагаемый вихрь вращается по часовой стрелке). Однако воздействие примерно одинаково по всей толщине присоединившегося сдвигового слоя. Кроме того, измерения пространственно-временных корреляций поверхностного трения и скорости в потоке двумя датчиками, расположенными в одном сечении, не дали картины, соответствующей возмущению от крупномасштабного вихря (рис.4). Поэтому представляется, что вихри, образующиеся в оторвавшемся слое смещения, играют важную, но не определяющую роль в явлении воздействия аномального присоединения на присоединившееся течение.

В. За один цикл махового движения происходит удлинение отрывной зоны; затем она разделяется на две части, так что часть, расположенная ниже по течению, уносится вниз по течению вместе с содержащимися в ней вихревыми структурами. Возможно, что этот процесс также оказывает воздействие на параметры присоединившегося течения.

Для анализа этого варианта была предпринята дополнительная обработка результатов, показанных на рис.7. Для этого сигналы от датчиков направления и трения были обработаны в соответствии с техникой VITA. Полученные функции в некоторой степени характеризуют состояние пристеночного слоя жидкости в окрестности измерительной точки. При этом будут "отбрасываться" мелкомасштабные флуктуации пристеночного трения, не связанные с низкочастотным изменением размеров рециркуляционной области. Далее были найдены корреляции между преобразованными по указанному алгоритму функциями.

По сравнению с исходными функциями (рис.7) изменения оказались минимальными: слегка увеличилось (на 0,5 мс) время $\Delta\tau_{\max}$ и уменьшилось значение максимума корреляции ($K=0,17$). Это говорит о том, что в потоке за обратным уступом имеется перенос крупномасштабных “заторможенных” (поскольку их происхождение - в отрывной зоне, где жидкость течет в основном назад) участков жидкости, из области присоединения в присоединившийся сдвиговый слой. Будет логичным ассоциировать это явление с вариантом В, который является экспериментальным фактом, подтвержденным с помощью визуализации и численного моделирования.

Предложена интерпретация некоторых из полученных результатов с позиций выбранной физической модели. На основании рис.10 можно проследить динамику прохождения внешнего края оторвавшейся части рециркуляционной области. Объясняется феномен переменной конвективной скорости в области присоединения, подтвержденный другими авторами. По-видимому, в части области присоединения (где-то до $\gamma=0,5$), где собственно происходят пульсации глобальной точки присоединения, реверсивный участок сравнительно медленно растет в длину, обеспечивая преобладающее обратное направление конвективной скорости. Причем, сами крупномасштабные включения отрицательно направленной жидкости большую часть времени не сносятся вниз по потоку. В какой-то момент времени часть рециркуляционной зоны отрывается, и заторможенный участок жидкости начинает двигаться вниз по течению. На его место попадает жидкость из высокоскоростного оторвавшегося слоя смещения, и все начинается сначала. До точки аномально позднего присоединения амплитуда пульсаций глобальной точки присоединения доходит редко.

Учитывая все вышесказанное, можно сделать вывод о несостоятельности оценки характерных пристеночных линейных масштабов по средней конвективной скорости в области присоединения. Вполне возможно, что уменьшения истинного размера энергонесущих вихревых структур при переходе из области присоединения в присоединившееся течение не происходит.

Падение уровня напряжений Рейнольдса и интенсивности турбулентности за средней точкой присоединения можно объяснить отрывом - примерно в этом месте - части рециркуляционной области, в которой имеется повышенный уровень обеих величин.

ВЫВОДЫ

1. Проведены измерения статистических характеристик скорости и поверхностного трения в турбулентном отрывном течении за обратным уступом. Изучено влияние нестационарности на турбулентное присоединяющееся течение за обратным уступом. Выявлена взаимосвязь поля скорости с вектором поверхностного трения.

2. Получены спектры пульсаций продольной и поперечной компонент вектора поверхностного трения за обратным уступом. Выявлено, что в рециркуляционной зоне роль высокочастотной области в спектрах по обоим компонентам возрастает с удалением от уступа.

3. Получены корреляционные характеристики течения за обратным уступом. Оценены скорость передачи информации о возмущении в присоединившемся сдвиговом слое, а также линейные интегральные пристеночные масштабы характерных вихрей в следе за обратным уступом. Обнаружена корреляционная связь пульсаций мгновенной точки присоединения с профилем скорости и продольной компонентой вектора поверхностного трения в присоединившемся течении.

4. Предложена физическая модель влияния нестационарных процессов в области присоединения течения на развитие присоединившегося потока. Модель объясняет известный феномен резкого падения уровня напряжений Рейнольдса и интенсивности турбулентности за средней точкой присоединения.

5. Показано, что в области присоединения потока за уступом конвективная скорость переноса пульсаций продольной компоненты вектора поверхностного трения может изменять свое направление. Это свидетельствует о несостоятельности традиционных оценок характерных пристеночных линейных масштабов по средней конвективной скорости в области присоединения.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Занько Ф.С., Козлов А.П., Михеев Н.И. Влияние пульсаций отрывной зоны за обратным уступом на характеристики присоединившегося потока // Труды Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН В.Е.Алемасова "Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении". - Казань: Издательство "АБАК", 1999. - С.125-130.

2. Занько Ф.С., Козлов А.П., Михеев Н.И. Мгновенный вектор поверхностного трения в турбулентном отрывном течении за обратным уступом / Препринт 98П11. - Казань, КГТУ, 1998. - 14 с.

3. Занько Ф.С., Козлов А.П., Михеев Н.И. Проявление трехмерности в двумерном турбулентном отрывном течении за обратным уступом // Тезисы докладов научно-методической конференции КГТУ им.А.Н.Туполева "Актуальные проблемы научных исследований и высшего профессионального образования" (19-20 марта 1997 г.). - Казань: КГТУ им.А.Н.Туполева, 1997. - С.78.

4. Занько Ф.С., Козлов А.П., Михеев Н.И. Характеристики присоединившегося турбулентного потока за обратным уступом // Материалы докладов республиканской научной конференции - Казань: КФМЭИ, 1998. - С.9-10.

5. 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.