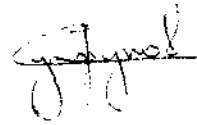


На правах рукописи



СУХОРУКОВ Олег Викторович

ТУРБУЛЕНТНЫЙ ОТРЫВ ПОТОКА В УСЛОВИЯХ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ

Специальность: 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2002

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Казанском государственном техническом университете им. А.Н. Туполева

Научные руководители: доктор технических наук А.П. Козлов
доктор технических наук Н.И. Михеев

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор А.В. Фафурина
кандидат технических наук В.В. Леманов

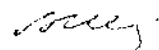
Ведущая организация: Институт механики и машиностроения КНЦ РАН, г. Казань

Защита диссертации состоится «...» _____ 2002 г.
в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.079.02
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 «...» _____ 2002 г.

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

 А.И. Каримова

Актуальность проблемы. В технике можно часто встретить пульсирующие течения. Например, такие течения имеют место в двигателях внутреннего сгорания. При обтекании тел различной формы, например, профиля винта вертолета, лопаток турбины, выступов, уступов, пульсации потока сопровождаются его отрывом. Отрыв потока имеет важное значение в различных инженерных приложениях, чем и привлекает внимание исследователей, среди которых В.Е. Алемасов, П. Брэдшоу, Г.А. Глебов, Дж. Джонстон, Д.М. Драйвер, Ф. Дурст, Дж.К. Итон, А.П. Козлов, П.Л. Комаров, Д.М. Кюн, Н.И. Михеев, В.М. Молочников, А.Ф. Поляков, А.К. Растиги, Х.Л. Сигмиллер, С. Тгореа, П. Чжен и др. Многообразие встречающихся на практике отрывных течений требует детального изучения отдельно взятых структур потоков (отрыв, смешение, присоединение, возвратное течение). Для практических приложений важно учитывать влияние нестационарности не только на потенциальное ядро потока, но также на вязкое течение и, в особенности, на пограничный слой. При этом надо иметь в виду, что в пульсирующих течениях влияние знакопеременного градиента может оказаться более существенным, чем в стационарном случае. По этой причине выполненные экспериментальные исследования по влиянию продольного градиента давления на кинематическую структуру турбулентности, например, С.С. Кутателадзе, А.И. Леонтьевым, Е.У. Релик, Н.Н. Ковальцовым и др., в лучшем случае, могут быть распространены лишь на квазистационарные режимы течения.

В настоящее время наиболее исследованной является кинематическая структура нестационарных турбулентных пограничных слоев. Известны экспериментальные данные В.И. Букреева и В.М. Шахина, М.М. Григорьева и А.В. Фафурина, Б.Р. Раманьяна и С.В. Ту, П.Г. Париха и W. C. Reynolds, Ж. Кусто, С.К.Ф. Карлссона, Р. Симпсона, Е. Хартнера, Т. Мизушины, Л. Шемера, М. Игучи и др. Учет нестационарных эффектов, обусловленных отрывом и присоединением потока, важен при разработке различных гидросистем, тепловых агрегатов, отдельных элементов гидродинамически нагруженных конструкций, чтобы избежать усталостных разрушений вследствие многократных ударов высокого давления. Необходимость правильного управления подачей воздуха в современных двигателях внутреннего сгорания требует знания изменения характеристик течения под влиянием наложенной нестационарности.

Многие свойства отрывных течений в условиях гидродинамической нестационарности до сих пор не объяснены и не изучены. Сравнительно мало данных по влиянию на отрыв потока стационарного наложенного градиента давления. Крайне редко исследовался отрыв потока в условиях турбулизации внешнего течения. Влияние наложенных периодических

пульсаций потока на характеристики отрывного течения практически не исследовалось. В области численного моделирования еще не найдена достаточно точная физико-математическая модель, которая отразила бы по возможности все явления, происходящие в гидродинамически нестационарных турбулентных течениях. Это существенно ограничивает общий объем научной информации по данному вопросу.

Изучение влияния пульсирующих течений на характеристики турбулентности при обтекании различных поверхностей позволило бы надежнее прогнозировать работу разнообразных инженерных конструкций и по мере надобности придавать им удобообтекаемые формы, а расчетчики могли бы использовать экспериментальные данные для верификации своих моделей. Все вышесказанное делает изучение данной проблемы актуальной.

Цель работы – развитие научных представлений о механизмах переноса импульса в турбулентных отрывных течениях в условиях гидродинамической нестационарности потока. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи исследования:

- экспериментально изучить влияние периодических пульсаций потока на характеристики развитого турбулентного пограничного слоя;
- экспериментально изучить влияние периодических пульсаций потока на структуру турбулентного отрывного течения за обращенным назад уступом;
- на основании полученных экспериментальных данных конкретизировать механизм влияния гидродинамической нестационарности потока на структуру развитого турбулентного пограничного слоя и турбулентного отрывного течения за обратным уступом.

Научная новизна:

- получены новые экспериментальные данные о влиянии периодических пульсаций потока на характеристики развитого турбулентного пограничного слоя;
- получены новые экспериментальные данные о влиянии периодических пульсаций потока на структуру турбулентного отрывного течения за обращенным назад уступом;
- на основании полученных экспериментальных данных конкретизирован механизм влияния гидродинамической нестационарности на структуру развитого турбулентного пограничного слоя и турбулентного отрывного течения за обратным уступом.

Практическая ценность. Экспериментальная информация о влиянии периодических пульсаций потока на характеристики развитого турбулентного пограничного слоя и турбулентного отрывного течения за обратным уступом является источником статистической информации по турбулентным отрывным течениям, может быть использована для совершенствования методов расчета разнообразных инженерных конструкций, может послужить основой при разработке методов активного

управления отрывом и присоединением потока, а также для верификации и совершенствования существующих численных моделей турбулентности и создания новых методов моделирования таких течений.

На защиту выносятся:

- новые научные данные о влиянии периодических пульсаций потока на характеристики развитого турбулентного пограничного слоя;
- новые научные данные о влиянии периодических пульсаций потока на структуру турбулентного отрывного течения за обращенным назад уступом;
- физическая модель, конкретизирующая механизм влияния гидродинамической нестационарности на структуру развитого турбулентного пограничного слоя и турбулентного отрывного течения за обратным уступом.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в центральных журналах, а также докладывались и обсуждались на Юбилейной научной и научно – методической конференции, посвященной 65 – летию КГТУ им. А.Н. Туполева (г. Казань, 1997), республиканской научной конференции по проблемам энергетики (г. Казань, 1998), II Международном симпозиуме по энергетике, окружающей среде и экологии (г. Казань, 1998), Всероссийской школе – семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика В.Е. Алемасова (г. Казань, 1999), семинарах и отчетных конференциях в КазНЦ РАН (г. Казань, 1997 – 2002).

Публикации. Автор имеет 7 научных трудов, среди которых 5 по теме диссертации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации 107 стр., в том числе 39 рисунков, расположенных по тексту, и список литературы, включающий 102 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы; сформулирована цель исследования; определен личный вклад соискателя в приведенные в диссертации результаты.

В **первой главе** представлены основные определения гидродинамически нестационарных случайных процессов и их основные характеристики. Проведен краткий обзор гидродинамически нестационарных течений и характеристик турбулентного отрывного течения в условиях гидродинамической нестационарности. Поставлена задача исследования.

На основе выполненного обзора известных исследований сделан вывод о том, на сегодняшний день еще не достаточно изучены процессы в

турбулентном пограничном слое в условиях гидродинамической нестационарности. В частности, отсутствуют данные о влиянии наложенных периодических пульсаций скорости на мгновенный вектор поверхностного трения в развитом турбулентном пограничном слое. Отмечено, что до сих пор не встречались работы, в которых было бы изучено влияние периодического изменения расхода жидкости на осредненные и пульсационные характеристики отрывного течения при дозвуковом обтекании обращенного назад уступа.

Во второй главе дано описание экспериментального оборудования, на котором проводились исследования, подробно описаны условия и методика проведения эксперимента, а также методы обработки и анализа экспериментальных данных.

Для создания пульсаций расхода или наложенных пульсаций скорости потока на оси рабочего участка была разработана экспериментальная установка (рис. 1). Она позволяет практически независимо друг от друга регулировать частоту и амплитуду наложенных пульсаций скорости потока, а также среднюю скорость на оси рабочего участка. К данной установке с помощью крепежных элементов можно присоединять рабочие участки с круглым и прямоугольным поперечными сечениями.

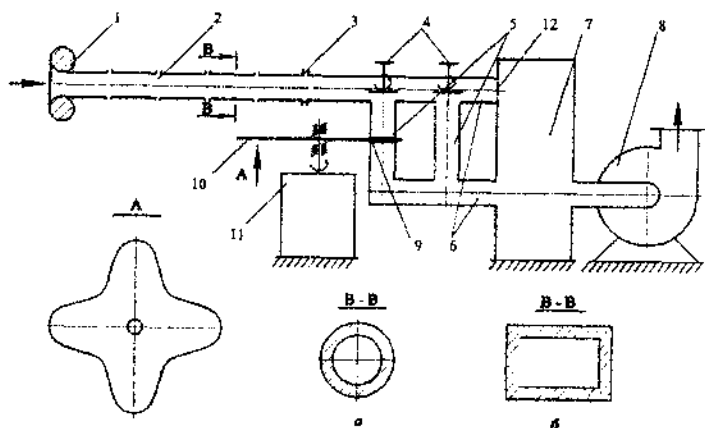


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - входное устройство, 2 - рабочий участок; 3 - крепежные элементы; 4 - заслонки; 5, 6 - проточные магистрали; 7 - ресивер; 8 - центробежный вентилятор; 9 - узкая кольцевая щель; 10 - толчки профилированный диск; 11 - электропривод; 12 - перфорированная заслонка

В третьей главе описана схема рабочего участка; представлены результаты экспериментального изучения влияния периодических пульсаций потока на характеристики развитого турбулентного пограничного слоя; на основании полученных экспериментальных данных конкретизируется

механизм влияния гидродинамической нестационарности потока на структуру развитого турбулентного пограничного слоя.

При исследовании влияния периодических пульсаций потока на характеристики турбулентного пограничного слоя рабочий участок представлял собой трубу диаметром $D=64$ мм (рис. 2). Длина рабочего участка составила 0,8 м. Средняя скорость потока на оси трубы ($\langle U_0 \rangle$), частота (f) и амплитуда пульсаций (A_f), - основные характеристики режима пульсирующего течения в трубе - регулировались элементами вышеупомянутой установки. В процессе экспериментов проводились одновременные измерения средней скорости потока на оси

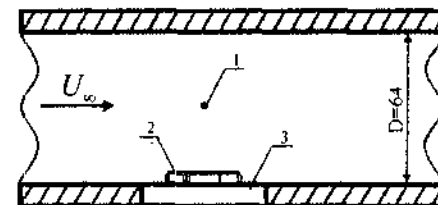


Рис. 2. Схема рабочего участка: 1 - чувствительный элемент датчика скорости, 2 - выступ датчика трения с чувствительными элементами, 3 - основание датчика трения

трубы, продольной τ_x и тангенциальной τ_t компонент мгновенного вектора поверхностного трения. Измерения проводились на стационарном режиме течения и на режимах пульсирующего течения. Варьировалась безразмерная частота Sh и относительная амплитуда (β) наложенных пульсаций скорости потока. Число Струхала $Sh = 2f \langle \delta \rangle / \langle U_0 \rangle$, где $\langle U_0 \rangle = (\langle \tau_x \rangle / \rho)^{1/2}$ - динамическая скорость. В качестве относительной амплитуды колебаний β принято отношение амплитуды A_f пульсаций скорости потока на оси трубы при частоте f наложенных колебаний к средней скорости потока на оси, т.е. $\beta = A_f / \langle U_0 \rangle$. При исследовании турбулентного пограничного слоя условия эксперимента охватывали диапазон нестационарных течений от низкочастотных до высокочастотных в соответствии с принятой в гидродинамике классификацией гидродинамически нестационарных течений.

Для измерения скорости потока использовался термоанемометрический датчик, чувствительный элемент 1 которого устанавливался на оси рабочего участка (рис. 2). Мгновенный вектор поверхностного трения измерялся с помощью нового термоанемометрического датчика. Выступ 2 с чувствительными элементами датчика трения устанавливался заподлицо со стенкой рабочего участка экспериментальной установки. Измерения скорости и мгновенного вектора трения производились на расстоянии $10D$ от входного устройства. Совместно с датчиками использовалась термоанемометрическая аппаратура DISA 55M. Сбор и обработка экспериментальных данных проводились при помощи измерительного комплекса, включающего персональный компьютер

и восьмиканальный аналого-цифровой преобразователь с параллельным опросом каналов.

Методические испытания установки на пульсирующих режимах течения показали, что в рабочем участке в диапазоне средней скорости 1...25 м/с при амплитуде пульсаций 5...100% от средней скорости и частоте 5...100 Гц реализуются устойчивые режимы пульсирующего потока. Относительная погрешность воспроизведения таких режимов течения не превышала 0,5% по средней скорости и частоте пульсаций и 3% по амплитуде пульсаций при доверительной вероятности 0,9%. Спектр пульсаций и взаимно корреляционная функция свидетельствуют, что закон изменения скорости на оси рабочего участка близок к гармоническому, а внешний поток пульсирует практически как твердое тело. Для всех исследуемых режимов течения средняя скорость потока на оси трубы поддерживалась на уровне 5 м/с ($Re_c \approx 2 \times 10^4$).

Измерения профиля продольной компоненты средней скорости потока в сечении, где проводились измерения, на стационарном режиме течения показали, что толщина пограничного слоя (приблизительно 6 мм) не превышала одну десятую часть диаметра трубы. Данные в координатах закона стенки показали, что турбулентный пограничный слой в сечении, где проводились измерения, был развитым. Интенсивность пульсации средней скорости на оси трубы составила $\epsilon = (\langle u_{ax}^2 \rangle)^{1/2} / \langle U_{ax} \rangle \approx 0,016$. За пределами турбулентного пограничного слоя неравномерность профиля средней скорости не превышала 3%.

Выявлено значительное расслоение значений продольной компоненты трения τ_w , соответствующих одинаковой скорости потока на оси трубы в фазах ускорения и торможения потока (рис. 3, правая колонка). Это расслоение возрастает с увеличением как частоты, так и амплитуды пульсаций. Почти во всем диапазоне изменения скорости потока на оси трубы значение τ_w в фазе ускорения потока выше, чем в фазе торможения. Это обусловлено тем, что при одинаковой скорости потока на внешней границе пограничного слоя толщина этого слоя в фазе ускорения (при отрицательном градиенте давления) меньше. Максимальное за период наложенных пульсаций скорости значение τ_w соответствует фазе процесса между максимальным значением производной скорости и самой максимальной скоростью.

На некоторых режимах течения имели место мгновенные возвратные токи вблизи стенки трубы. Вероятность возвратных токов возрастает с увеличением частоты и относительной амплитуды пульсаций скорости потока.

Установлено, что при высокой относительной амплитуде наложенных пульсаций потока (рис. 4, режим *в*) имеет место кратковременный отрыв

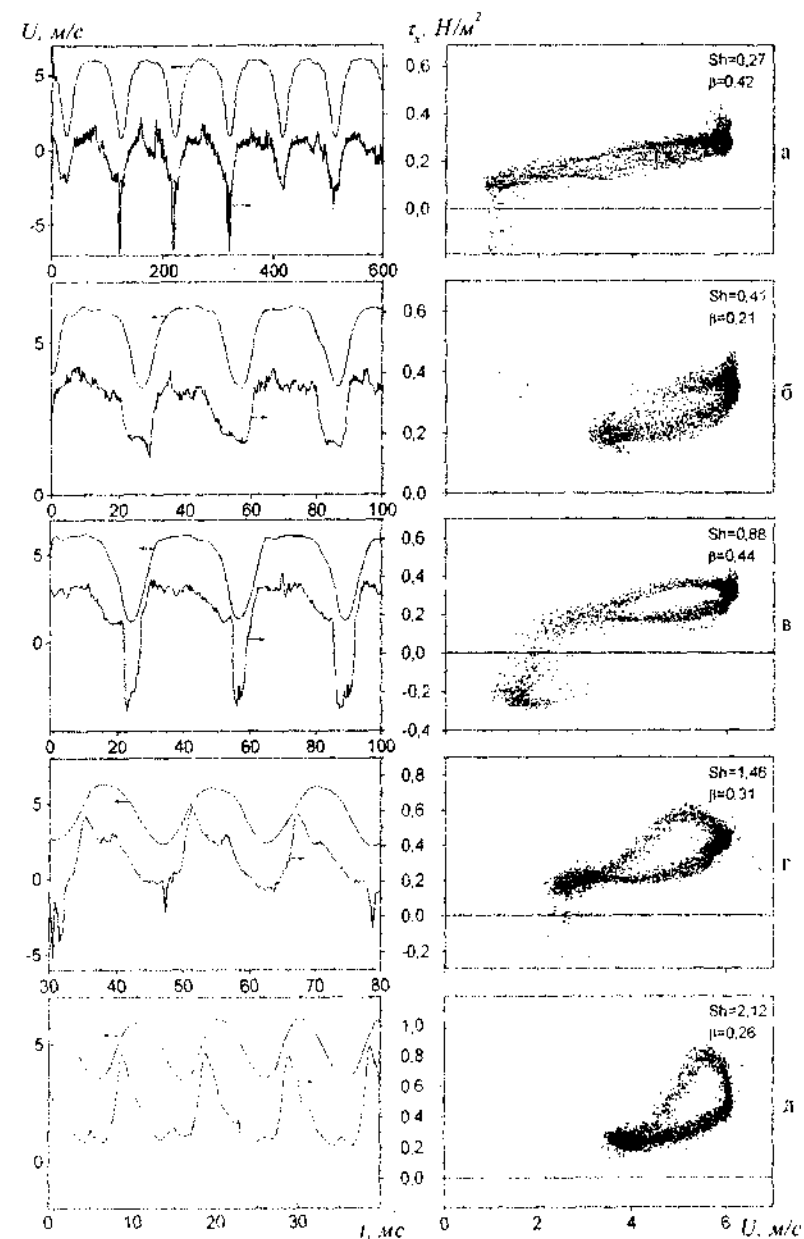


Рис. 3. Изменение по времени (левая колонка) и совместное распределение (правая колонка) скорости потока на оси трубы и продольной компоненты вектора поверхностного трения, на пульсирующих режимах

турбулентного пограничного слоя в фазе уменьшения скорости в ядре потока. По-видимому, это можно объяснить следующим. В фазе торможения потока при наложенном положительном градиенте давления толщина пограничного слоя увеличивается, касательные напряжения пристенных сдвиговых слоев при этом уменьшаются. В этот момент, по-видимому, интенсифицируется вторжение более высокоскоростной жидкости из внешней области течения в пристенную область. Происходит наложение движения ускоренных частиц жидкости на движение замедленных частиц жидкости в пристенной области. Учитывая последнее обстоятельство и увеличение толщины пограничного слоя, можно предположить что, по-видимому, интенсифицируются выбросы замедленной жидкости от стенки во внешнюю область течения. То есть, интенсифицируется периодическое обновление вязкого подслоя или массообмен между внешней границей турбулентного пограничного слоя и вязким подслоем. Дальнейшее увеличение относительной амплитуды наложенных пульсаций при одной и той же частоте способствует появлению кратковременного отрыва потока.

Выявлено, что на всех пульсирующих режимах имеет место фазовый сдвиг между нормированными условно средними значениями поверхностного трения и скоростью внешнего потока. На высокочастотных режимах ε и δ , где закон изменения скорости на оси близок к гармоническому, величина фазового сдвига составляет примерно тридцать градусов. Отсчет фазового угла для скорости осуществлялся от момента времени, соответствующего средней скорости в фазе ускорения потока. При определении $\Delta\varphi$ для нормированного среднего значения поверхностного трения использовалось такое же правило определения фазового угла как и для скорости. То есть, за ноль принят момент времени, в который безусловное поверхностное трение соответствует среднему значению поверхностного трения в фазе нарастания трения. Кроме того, существенно деформируется сам закон изменения поверхностного трения по фазе наложенных пульсаций.

Физический механизм, объясняющий деформацию закона изменения поверхностного трения по фазовому углу и возникновение фазового сдвига, представляется следующим. Известно, что осредненное движение в турбулентном пограничном слое представляет собой сдвиговое течение, и скорость частиц жидкости вблизи стенки меньше скорости на внешней границе. При этом статическое давление одинаково по всей толщине пограничного слоя. В градиентном потоке продольный градиент давления ($dp/dx = -\rho U_0 dU/dx$) одновременно и одинаково действует на слои жидкости в поперечном сечении пограничного слоя. При гармонических наложенных пульсациях потока наложенный продольный градиент давления, изменяющийся по закону, $dp/dx = -\rho A_0 2\pi f \cos(2\pi ft)$, также одновременно действует по всей толщине пограничного слоя, вызывая изменения скорости

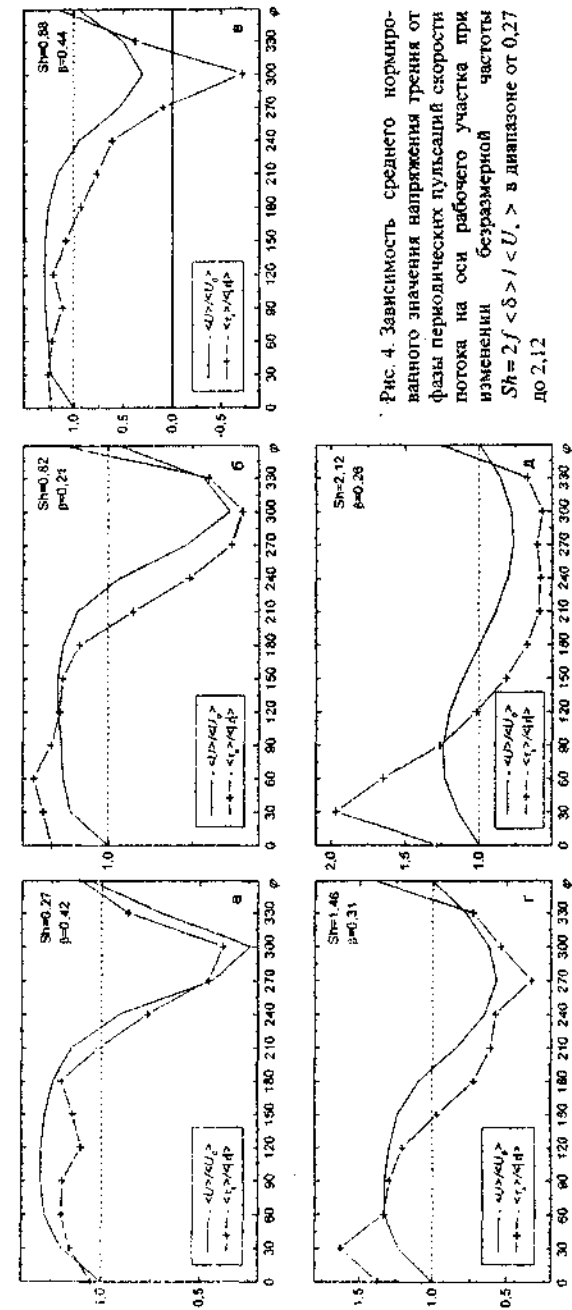


Рис. 4. Зависимость среднего нормированного значения напряжения трения от фазы периодических пульсаций скорости потока на оси рабочего участка при изменении безразмерной частоты $Sh = 2f < \delta > / < U_0 >$ в диапазоне от 0,27 до 2,12

в нем. Если бы изменение профиля скорости не приводило бы к изменению профиля касательных напряжений, то имело бы место одинаковое ускорение жидкости по всей толщине пограничного слоя под действием продольного градиента давления. Очевидно, что перестройка профиля касательных напряжений должна отставать от перестройки продольной скорости под действием переменного градиента давления. Следовательно, относительное изменение скорости (и напряжения трения) под действием наложенного градиента давления вблизи стенки будет более существенным в низкоскоростной пристеночной области пограничного слоя. Это приводит к опережению изменений напряжения трения на стенке по сравнению с изменением скорости на внешней границе пограничного слоя. Как видно из рис. 4 (режимы б, в, г и д), в фазе возрастания скорости в ядре потока напряжение трения успело уже «достичь» своего максимального значения и начало уменьшаться, в то время как скорость на оси еще не достигла своего максимального значения.

Выявлено, что форма изменения среднеквадратического отклонения продольной компоненты поверхностного трения относительно условно среднего значения на квазистационарном режиме течения практически такая же как в стационарном потоке с продольным градиентом давления: в фазе ускорения потока среднеквадратическое отклонение уменьшается, в фазе торможения потока – увеличивается. Максимальное значение интенсивности турбулентных пульсаций составляет примерно 25%. На режимах, которым присущи наибольшие значения относительной амплитуды наложенных пульсаций, отчетливо видны всплески среднеквадратического отклонения относительно условно среднего значения продольной компоненты поверхностного трения. На высокочастотном режиме течения максимальное значение нормированного среднеквадратического отклонения продольной компоненты поверхностного трения составляет 25% в момент времени, который соответствует средней скорости в фазе ускорения потока и когда отрицательный градиент давления имеет наибольшее значение. Если на низкочастотном режиме течения интенсивность турбулентных пульсаций практически успевает отслеживать переменный градиент давления (в фазе ускорения потока интенсивность пульсаций уменьшается, в фазе торможения потока – увеличивается), то на высокочастотном режиме, по-видимому, происходит перестройка турбулентности и интенсивность пульсаций отстает от фазы переменного градиента давления практически на половину периода наложенных пульсаций.

Выявлено, что модуль мгновенного вектора поверхностного трения ни в один момент времени не равен нулю (рис. 5), в том числе в момент изменения знака компоненты τ_x . При нулевых мгновенных значениях продольной компоненты вектора трения имеет место тангенциальное пристеночное течение.

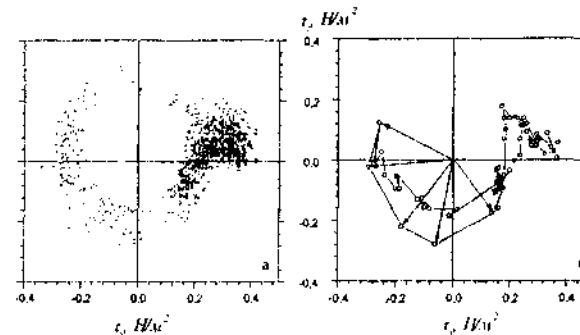


Рис. 5. Распределение продольной τ_x и тангенциальной τ_y компонент мгновенного вектора поверхностного трения на режиме наложенных пульсаций потока в трубе ($Sh=0,44$, $\beta=0,44$)

В четвертой главе описана схема рабочего участка; представлены результаты экспериментального изучения влияния периодических пульсаций потока на структуру турбулентного отрывного течения за обращенным назад уступом при дозвуковом обтекании его потоком жидкости; на основе полученных экспериментальных данных конкретизируется механизм влияния гидродинамической нестационарности потока на структуру турбулентного отрывного течения за обратным уступом.

При исследовании влияния периодических пульсаций потока на отрывное течение за обратным уступом рабочий участок (рис. 6) имел прямоугольное поперечное сечение высотой $H=0,1$ м и шириной $B=0,13$ м. Его длина составляла 1 м. Участок был снабжен специальным приспособлением для крепления и перемещения объекта исследования 4 и поворотной платформой с гнездом для введения в поток выступа 2 с чувствительными элементами датчика трения. В качестве объекта исследования в данной работе использовался выступ со скругленной передней кромкой, который при принятых форме и геометрических размерах можно условно считать обращенным назад уступом. Уступ устанавливался на

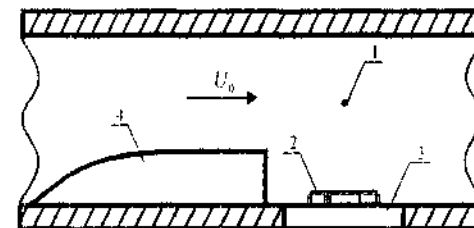


Рис. 6. Схема рабочего участка и объекта исследования: 1 – чувствительный элемент датчика скорости, 2 – выступ датчика трения с чувствительными элементами, 3 – основание обращенным назад уступом, 4 – обращенный назад уступ

стенке рабочего участка и занимал всю ширину канала. Высота уступа h составляла 22 мм.

В процессе экспериментов проводились одновременные измерения скорости потока на оси трубы $\langle U_0 \rangle$, продольной τ_x и тангенциальной τ_z компонент мгновенного вектора поверхностного трения. Оценивались характеристики поверхностного трения в отрывной зоне за обращенным назад уступом. Измерения скорости потока и мгновенного вектора поверхностного трения выполнялись при помощи термоанемометрических датчиков. Чувствительный элемент датчика скорости 1 устанавливался чуть выше оси рабочего участка за уступом, а зонд 2 датчика трения устанавливался заподлицо со стенкой рабочего участка (рис.6). Работа датчиков поддерживалась термоанемометрической аппаратурой DISA 55M. Измерения скорости и мгновенного вектора поверхностного трения производились на расстоянии 0,8 м от входного устройства. Положение датчика трения относительно обратного уступа изменялось в пределах $x/h = 0,227 \dots 10,91$ посредством перемещения последнего вдоль стенки рабочего участка установки. Измерения выполнялись в условиях низкотурбулентного внешнего потока ($\varepsilon = (\langle u_0'^2 \rangle)^{1/2} / \langle U_0 \rangle \approx 0,01$), турбулизованного внешнего потока и при наложенных гармонических пульсациях скорости. Турбулизация потока осуществлялась флажковым генератором турбулентности. На всех режимах средняя скорость внешнего потока в рабочем сечении устанавливалась и поддерживалась приблизительно равной 9,3 м/с ($Re_h \approx 1,37 \times 10^4$). Интенсивность пульсаций скорости турбулизованного внешнего потока в рабочем сечении составляла $\varepsilon \approx 0,08$.

Получены и оценены характеристики вектора поверхностного трения за обратным уступом в диапазоне безразмерной частоты наложенных пульсаций потока $Sh = fh / \langle U_0 \rangle$ от 0,04 до 0,15. Показано, что положение средней точки присоединения потока X_R меняется в зависимости от режима течения (рис. 7). Выявлено, что при $Sh < 0,03$ (рис. 8) поток с

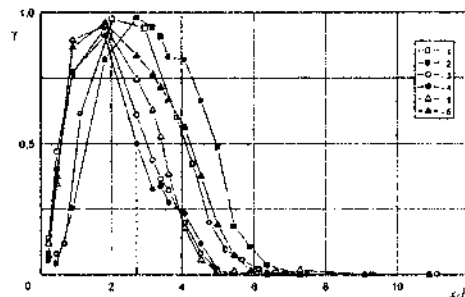


Рис. 7. Вероятность обратного течения γ на стенке за обратным уступом при $Re_h \approx 1,37 \times 10^4$: 1 – обтекание обратного уступа турбулизированным потоком; 2 – обтекание обратного уступа низкотурбулентным потоком; 3 – обтекание уступа пульсирующим потоком при $Sh = 0,15$; 4 – $Sh = 0,13$; 5 – $Sh = 0,096$; 6 – $Sh = 0,04$

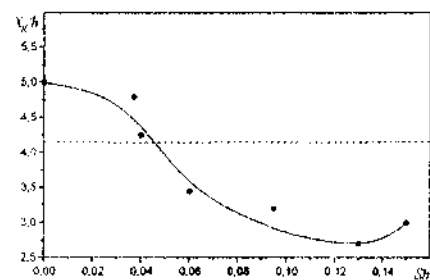


Рис. 8. Зависимость X_R/h от безразмерной частоты наложенных пульсаций скорости внешнего потока $Sh = fh / \langle U_0 \rangle$ при $\varepsilon \approx 0,06 \dots 0,09$; пунктирная линия – турбулизированный поток, $\varepsilon \approx 0,08$

наложенными пульсациями скорости при малых значениях амплитуды можно рассматривать практически как квазистационарный. Установлено, что при обтекании обратного уступа пульсирующим потоком максимальный эффект наложенных пульсаций (при $\varepsilon \approx 0,06 \dots 0,09$) проявляется в окрестности

$Sh \approx 0,1$, то есть при частоте, приблизительно соответствующей характерной частоте реверсирования потока в точке присоединения. При $Sh = 0,13$ наблюдается наименьшее удаление средней точки присоединения сдвигового слоя от кромки уступа и $X_R/h \approx 2,7 \dots 2,75$. При этой частоте наложенных пульсаций скорости степень их влияния на структуру отрывного течения существенно выше, чем турбулентных пульсаций той же интенсивности. В частности, отклонение положения точки присоединения от ее положения, которое имеет место при низкотурбулентном внешнем потоке, отличается вдвое. По-видимому, при $Sh \approx 0,1$ имеет место наибольшая интенсификация массообмена в сдвиговом слое между внешним потоком и возвратным течением.

Установлено, что при изменении безразмерной частоты наложенных пульсаций от 0,04 до 0,15 положение условно средней точки присоединения в пределах периода наложенных пульсаций изменяется соответственно в диапазоне $X_R/h \approx 5,25 \div 2,5$. Это обусловлено периодическим изменением градиента давления.

Установлено, что между нормированными условно средними значениями скорости внешнего потока и поверхностного трения при изменении безразмерной частоты наложенных пульсаций от 0,04 до 0,15 в точках, принадлежащих областям рециркуляции, присоединения и области релаксации потока, имеет место фазовый сдвиг. Фазовый сдвиг увеличивается с увеличением безразмерной частоты. На всех рассматриваемых режимах при одном и том же значении безразмерной частоты между условно средними величинами скорости внешнего потока и поверхностного трения имеет место фазовое смещение, которое существенно отличается в различных точках на стенке. Другими словами, в отличии от внешнего потока в отрывной области имеют место значительные деформации жидкости. Для наглядности на рис. 9 представлена зависимость

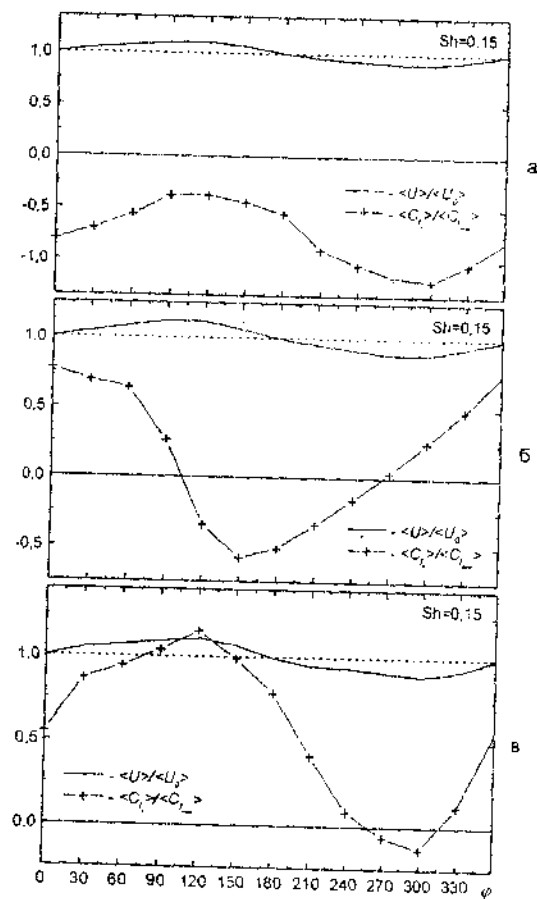


Рис. 9. Зависимость нормированного осредненного коэффициента поверхностного трения от фазы периодических пульсаций скорости потока на оси рабочего участка при $Sh = 0,15$: а - $\gamma = 0,941$; б - $\gamma = 0,437$; в - $\gamma = 0,197$

нормированных условно средних величин поверхностного трения и скорости внешнего потока при $Sh = 0,15$. Появление $\Delta\varphi$ можно объяснить по крайней мере двумя механизмами. Первый заключается в том, что размеры отрывной области изменяются по фазе наложенных пульсаций скорости на оси. В этом случае положение некоторой точки на стенке по отношению к мгновенной точке присоединения потока в различных фазах пульсаций скорости потока оказывается различным. Датчик трения остается в фиксированной точке, а

положение условно средней точки присоединения изменяется по фазе наложенных пульсаций: когда условно средняя точка присоединения смещается к кромке уступа, датчик трения оказывается в области релаксации и поверхностное трение увеличивается. Когда условно средняя точка присоединения смещается вниз по потоку, датчик трения оказывается в области рециркуляции и поверхностное трение уменьшается. Это эквивалентно тому, что в пределах периода наложенных пульсаций измерения поверхностного трения проводятся при разных X/X_R . Следовательно, поведение поверхностного трения связано с изменением условно средней длины отрывной области.

Второй механизм представляется следующим. В слое смещения за обращенным назад уступом формируются крупномасштабные вихревые структуры, которые соприкасаются со стенкой и тем самым оказывают влияние на трение. Вихревые структуры, движущиеся в слое смещения, формируются в условиях переменной скорости внешнего течения. С момента отрыва пограничного слоя от кромки уступа до момента присоединения потока к стенке проходит время, то есть существует задержка по времени между формированием вихревых структур в слое смещения и откликом поверхностного трения при взаимодействии вихрей со стенкой. В условиях экспериментов эта задержка по времени на всех режимах оставалась приблизительно постоянной, так как средняя скорость внешнего течения не изменялась и лишь несколько изменялись размеры отрывной области. Другими словами, вихревая структура, которая начинает формироваться у кромки уступа в одних условиях течения, соприкасается со стенкой при других условиях. На низкочастотных режимах течения задержка по времени составляет малую долю периода наложенных пульсаций скорости (при $Sh = 0,04$ время движения вихревой структуры составляет 20% от периода наложенных пульсаций скорости, при $Sh = 0,06$ - 25%), в то время как на высокочастотных режимах течения задержка по времени составляет заметную долю периода наложенных пульсаций скорости потока (при $Sh = 0,13$ время движения вихревой структуры составляет 40% от периода наложенных пульсаций скорости, при $Sh = 0,15$ - 45%). Увеличение этой задержки с ростом частоты наложенных пульсаций приводит к увеличению фазового сдвига между условно средними величинами скорости на оси и поверхностного трения, что качественно согласуется с экспериментальными данными.

На основе совместного анализа осциллограмм условно средних величин скорости внешнего потока, поверхностного трения и его среднеквадратического отклонения показано, что изменение интенсивности турбулентных пульсаций определяется не столько динамикой внешнего течения, сколько динамикой условно средней величины поверхностного трения на стенке: на всех режимах течения в фазе уменьшения условно

средней величины поверхностного трения имеют место максимумы интенсивности турбулентных пульсаций поверхностного трения.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально изучено влияние периодических пульсаций потока на характеристики развитого турбулентного пограничного слоя. Установлены основные закономерности фазового сдвига между средними величинами скорости на оси и поверхностного трения, закон изменения поверхностного трения в зависимости от фазового изменения средней скорости потока на оси, а также отрыва потока от стенки в зависимости от безразмерной частоты и относительной амплитуды наложенных пульсаций скорости потока на оси. В частности установлено, что величина фазового сдвига между пульсациями продольной компоненты трения и скоростью потока на оси возрастает с увеличением частоты наложенных пульсаций скорости. Существенное влияние на отрыв турбулентного пограничного слоя оказывает величина относительной амплитуды наложенных пульсаций скорости. На квазистационарных и низкочастотных режимах интенсивность турбулентных пульсаций практически успевает отслеживать переменный градиент давления. Начиная со среднечастотных режимов происходит заметная деформация закона изменения поверхностного трения. На высокочастотном режиме интенсивность турбулентных пульсаций отстает от фазы переменного градиента давления практически на половину периода наложенных пульсаций.

2. Экспериментально изучено влияние периодического изменения градиента давления на структуру турбулентного отрывного течения за обращенным назад уступом. Определены закономерности изменения положения средней точки присоединения потока от безразмерной частоты наложенных пульсаций потока. В частности установлено, что максимальный эффект наложенных пульсаций потока проявляется в окрестности безразмерной частоты, приблизительно соответствующей характерной частоте реверсирования потока в точке присоединения. Выявлено, что положение условно средней точки присоединения потока изменяется в зависимости от фазы наложенных пульсаций скорости внешнего потока. Установлен диапазон изменения положения условно средней точки присоединения в пределах периода пульсаций в рассматриваемом диапазоне безразмерных частот. Между условно средними величинами скорости на оси и поверхностного трения выявлен фазовый сдвиг, величина которого зависит от частоты наложенных пульсаций и положения точки измерения поверхностного трения относительно средней точки присоединения потока. Установлено, что фазовый сдвиг между условно средними значениями поверхностного трения, измеренными в различных точках на стенке,

изменяется в пределах периода наложенных пульсаций потока. Выявлено, что интенсивность турбулентных пульсаций поверхностного трения определяется динамикой его условно средней величины.

3. На основании полученных экспериментальных данных конкретизирован механизм влияния гидродинамической нестационарности потока на структуру развитого турбулентного пограничного слоя и турбулентного отрывного течения за обратным уступом.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Крапиров Д. В., Михеев Н. И., Сухоруков О. В. Установка для исследования турбулентных пульсирующих течений // Тезисы докладов юбилейной научной и научно-методической конференции, посвященной 65-летию КГТУ им. А. Н. Туполева «Актуальные проблемы научных исследований высшего и профессионального образования». Казань. 19-20 марта 1997 г. С. 77.

2. Козлов А. П., Конюхов Е. О., Михеев Н. И., Стинский Г. В., Сухоруков О. В. Влияние наложенных пульсаций потока на мгновенный вектор поверхностного трения // Материалы докладов республиканской научной конференции «Проблемы энергетики». Казань. 1998. С. 9.

3. Козлов А. П., Михеев Н. И., Стинский Г. В., Сухоруков О. В. Характеристики поверхностного трения в пульсирующем турбулентном течении // Материалы докладов 2-го международного симпозиума по энергетике, окружающей среде и экономике. Т. 1. – Казань, 1998. С. 15–18.

4. Козлов А. П., Михеев Н. И., Стинский Г. В., Сухоруков О. В. Влияние наложенных пульсаций скорости потока на мгновенный вектор поверхностного трения // Изв. вузов. Авиационная техника. 1999. № 3. С. 51–53.

5. Козлов А. П., Михеев Н. И., Стинский Г. В., Сухоруков О. В. Влияние наложенных пульсаций скорости на характеристики турбулентного отрывного течения // Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: Тр. школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. В. Ф. Алемасова. Казань: АБАК, 1999.

Формат 60×84 1/16. Бумага газетная. Печать офсетная.
Печл. 1,0. Усл.печ. л. 0,93. Усл.кр.-отт. 0,93. Уч.-издл. 1,0.
Тираж 100. Заказ 2107.
Типография Издательства Казанского государственного
технического университета им. А.Н. Туполева
420111, Казань, К.Маркса, 10