

На правах рукописи

Поливанов Павел Александрович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ
ЯВЛЕНИЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
С ТУРБУЛЕНТНЫМ ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2011

Работа выполнена в Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск)

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук
Сидоренко Андрей Анатольевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Косинов Александр Дмитриевич

доктор технических наук
Скуратов Аркадий Сергеевич

Ведущая организация:

Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова

Защита состоится « 11 » марта 2011 г. в 9 часов на заседании диссертационного совета Д003.035.02 в Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим высылать по адресу: Ученому секретарю диссертационного совета Д003.035.02, ИТПМ им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1.

Автореферат разослан «___» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
д.т.н.



И.М. Засыпкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При обтекании элементов летательного аппарата сверхзвуковым потоком образующиеся скачки уплотнения и волны разрежения часто взаимодействуют с пограничным слоем, развивающимся на его поверхности. В случае достаточно сильного взаимодействия (интенсивных ударных волн, высоких чисел Маха) возникают обширные отрывные зоны, существенно перестраивающие картину течения в целом и изменяющие местные динамические и тепловые нагрузки. Поэтому в процессе проектирования и оптимизации форм летательных аппаратов очень важно точно предсказывать параметры течения в окрестности точек отрыва и присоединения потока. От правильного расчета параметров локальных отрывных зон зависит эффективность трансзвуковых несущих профилей, компрессоров, органов управления, сопел и воздухозаборников. Необходимо заметить, что для большинства реальных приложений пограничный слой является турбулентным. Изучению свойств турбулентного отрыва в сверхзвуковых течениях посвящено большое число экспериментальных и расчетных исследований.

Наименее исследованной проблемой в этой области в настоящее время остаются нестационарные явления, возникающие при взаимодействии ударной волны с пограничным слоем в сверхзвуковых течениях. В экспериментах было показано, что в этом случае отрывная ударная волна колеблется со значительной амплитудой и её движение является трехмерным и низкочастотным по сравнению со всеми характерными частотами потока. При этом возникают крупномасштабные флуктуации течения, сносящиеся вниз по потоку, которые, вполне вероятно, связаны с низкочастотным движением ударной волны.

На настоящий момент существуют две конкурирующие гипотезы, объясняющие природу низкочастотных колебаний отрывной ударной волны. Первая гипотеза связывает осцилляции ударной волны с пульсациями в набегающем турбулентном пограничном слое. Низкая частота колебаний ударной волны объясняется тем, что они вызываются крупномасштабными структурами (порядка 30δ и более). Слабыми местами данной теории являются низкий уровень корреляций между пульсациями в набегающем пограничном слое и колебаниями ударной волны, а также зависимость частоты колебаний ударной волны от размеров отрыва при фиксированных параметрах набегающего пограничного слоя.

Вторая гипотеза объясняет низкочастотные колебания механизмом обратной связи через “слой смещения”, создаваемый отрывным пузырем, и область обратного течения в отрыве. Данная гипотеза хорошо объясняет зависимость частоты от размеров отрывного пузыря, но обнаруженный уровень пульсаций, распространяющихся вверх по потоку, является небольшим. Кроме того, эта теория предполагает наличие резонансной частоты, что с большой вероятностью должно сопровождаться гармоничностью колебаний ударной волны.

В действительности колебания отрывной ударной волны являются хаотическими. Вполне возможно, что реальная природа низкочастотных колебаний отрывной ударной волны может быть объяснена комбинацией описанных выше явлений.

На настоящий момент уровень экспериментальных и численных методов позволяет произвести углубленное изучение низкочастотных колебаний в зоне взаимодействия. Недостаток экспериментальных данных, пригодных для верификации современных численных методов, делает актуальным проведение экспериментов в условиях, при которых возможно прямое сравнение с результатами численного моделирования.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование нестационарных явлений, возникающих при взаимодействии падающей ударной волны с турбулентным пограничным слоем.

Задачи диссертационной работы:

1. изучение механизма возникновения низкочастотных колебаний отрывной зоны и отрывной ударной волны;
2. исследование динамики колебаний отрывной ударной волны и распространения низкочастотных пульсаций в зоне взаимодействия;
3. исследование взаимосвязи низкочастотных пульсаций отрывной ударной волны с пульсациями внутри зоны взаимодействия и с пульсациями в набегающем пограничном слое;
4. разработка метода введения искусственных возмущений в турбулентный пограничный слой и исследование восприимчивости отрывной ударной волны к искусственным возмущениям;
5. получение максимально достоверных и подробных данных о средних и пульсационных характеристиках исследуемого течения для верификации методов численного моделирования.

Научная новизна

1. На основе корреляционных термоанемометрических измерений показано наличие в набегающем пограничном слое низкочастотных возмущений и их взаимосвязь с колебаниями отрывной ударной волны и отрывной зоны. Доказано существование и доминирование механизма инициации колебаний отрывной ударной волны возмущениями набегающего пограничного слоя. Показано, что отрывная ударная волна не чувствительна к высокочастотным пульсациям набегающего пограничного слоя.

2. Исследована трехмерная структура низкочастотных хаотических колебаний отрывной ударной волны и показано, что при квазидвумерном взаимодействии колебания ее фронта носят трехмерный характер.

3. Разработан метод введения искусственных возмущений в сверхзвуковой турбулентный пограничный слой и впервые получены экспериментальные данные о восприимчивости отрывной ударной волны к возмущениям набегающего пограничного слоя. Показано, что восприимчивость отрывной ударной волны к искусственным возмущениям монотонно уменьшается с ростом частоты.

Научная и практическая ценность работы

1. Выполнено комплексное экспериментальное исследование нестационарных процессов, возникающих при взаимодействии ударной волны со сверхзвуковым турбулентным пограничным слоем.

2. Получены результаты, расширяющие представления о механизмах возникновения низкочастотных колебаний в сверхзвуковых отрывных течениях.

3. Разработаны и реализованы методики, позволяющие применять метод искусственных возмущений для исследования восприимчивости сжимаемых турбулентных сдвиговых течений.

4. Получены подробные экспериментальные данные о средних и пульсационных характеристиках исследованного течения, необходимые для верификации методов численного моделирования.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием в экспериментальных исследованиях хорошо отработанного метода термоанемометрических измерений, применением известного метода контролируемых искусственных возмущений, а также сопоставлением данных измерений с результатами численного моделирования методами RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) и LES (Large eddy simulation).

На защиту выносятся следующие научные положения диссертации:

- результаты экспериментального исследования средних и пульсационных характеристик течения при взаимодействии турбулентного пограничного слоя с ударной волной;
- результаты экспериментального исследования взаимосвязи пульсаций внутри области взаимодействия и набегающем пограничном слое;
- результаты исследования восприимчивости отрывной ударной волны к искусственным возмущениям.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на Международной конференции по методам аэрофизических исследований ICMAR (Новосибирск 2008, 2010), на конференции AIAA (Орландо, 2009), на Всероссийской молодежной конференции (Новосибирск, 2008), на Всероссийской школе-конференции молодых ученых (Новосибирск, 2008), на Всероссийской конференции молодых ученых (Новосибирск, 2009), на Международном симпозиуме по ударным волнам (Санкт Петербург, 2009), на Научно-технической конференции: “Аэрогидродинамика и аэроакустика: проблемы и перспективы” (Харьков, 2009), на Международном симпозиуме по прикладной аэродинамике (Марсель, 2010), на семинарах ИТПМ СО РАН по аэрогазодинамике, а также на семинарах проекта UFAST, выполнявшегося в рамках 6-й Европейской рамочной программы.

Личный вклад автора

Автор участвовал в постановке задач экспериментальных исследований, планировании и выполнении экспериментов. Им созданы алгоритмы и программы обработки данных измерений, выполнена обработка результатов экспе-

риментов. Автором выполнены расчеты поля течения в рабочей части экспериментальной установки, проведено сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования. Представление изложенных в диссертации и выносимых на защиту результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами.

Публикации

Результаты исследований автора опубликованы в 15 научных работах, в том числе в международных и российских журналах (Вестник НГУ, 2008; Письма в журнал технической физики, 2010; Shock Waves, 2010), а также в монографиях: Unsteady Effects of Shock Wave Induced Separation UFAST / P. Doerffer, Ch. Hirsch, J.-P. Dussauge, H. Babinsky, G. Barakos. Gdansk: Instytut Maszyn Przeplywowych, 2009; Unsteady Effects of Shock Wave Induced Separation / P. Doerffer, C. Hirsch, J.-P. Dussauge, H. Babinsky, G.N. Barakos. Vol. 114: Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. Heidelberg et al: Springer, 2011.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 134 страницы, включая 99 иллюстраций и 125 наименований цитируемой литературы.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность исследований, сформулированы цели работы, отмечена научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, кратко описана структура диссертации.

В главе 1 рассмотрены подходы и результаты выполненных ранее теоретических и экспериментальных исследований нестационарных явлений, возникающих при взаимодействии ударной волны с турбулентным пограничным слоем. В обзоре показано, что отсутствие учета данных явлений не позволяет современным инженерным расчетным методам (RANS и др.) достоверно предсказывать характеристики подобных течений. Применение методов LES и DNS (Direct numerical simulation) позволяет моделировать нестационарные характеристики потока и рассчитывать среднее течение с необходимой точностью. Однако современные вычислительные мощности не позволяют применять эти методы для инженерных приложений. Поэтому прогресс в расчете подобных течений может быть достигнут при условии построения теоретической модели нестационарного течения и внесения необходимых поправок при расчете методом RANS. Из обзора следует, что в настоящий момент наименее исследованным среди нестационарных процессов является низкочастотное движение отрывной ударной волны. Это явление является крупномасштабным и доминирующим в течении, поэтому без понимания его первопричин любая теоретическая модель будет неполной. Существуют две конкурирующие гипотезы, объясняющие природу низкочастотных колебаний отрывной ударной волны. В соответствии с первой гипотезой, осцилляции ударной волны могут быть объяснены влиянием пульсаций набегающего турбулентного пограничного слоя, вторая гипотеза объясняет низкочастотные колебания механизмом обратной связи.

На основании анализа опубликованных работ сделан вывод, что наибольший успех в разработке теоретической модели нестационарных процессов может быть достигнут при комплексном расчетно-экспериментальном подходе к проблеме. Несмотря на продолжительные исследования по данной тематике и большой объем накопленных данных, существует нехватка результатов, пригодных для такого рода анализа. Причиной этого является то, что большинство экспериментальных работ выполнены при больших числах Re , то есть для условий, при которых вычислительные ресурсы не позволяют применять методы LES и DNS. На основании этого делается вывод о необходимости экспериментальных исследований отрывных течений в сверхзвуковых потоках при низких числах Рейнольдса с получением достоверных количественных экспериментальных данных.

В главе 2 описаны экспериментальное оборудование, модели и методы диагностики течения. Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха набегающего потока $M_\infty = 2$, давлении

торможения $P_0 = 0,79 \cdot 10^5$ Па и единичном числе Рейнольдса $Re_1 = 10,5 \cdot 10^6$ м⁻¹. Рабочая часть аэродинамической трубы имеет квадратное сечение 200×200 мм. Уровень пульсаций массового расхода при $M_\infty = 2$ в рабочей части составляет 0,07%, что позволяет отнести данную установку к малозумным аэродинамическим трубам. Установка оснащена координатным устройством, позволяющим перемещать измерительные устройства и датчики в трех направлениях.

Экспериментальная модель и упрощенная схема течения показаны на рис. 1 и представляют собой плоскую пластину, на которой развивается турбулентный пограничный слой. Ударная волна генерируется клином с углом разворота потока $7 - 8^\circ$, расположенным над моделью. Пластина и клин занимают всю ширину рабочей части аэродинамической трубы. Для получения развитого турбулентного пограничного слоя вблизи передней кромки пластины установлен турбулизатор.

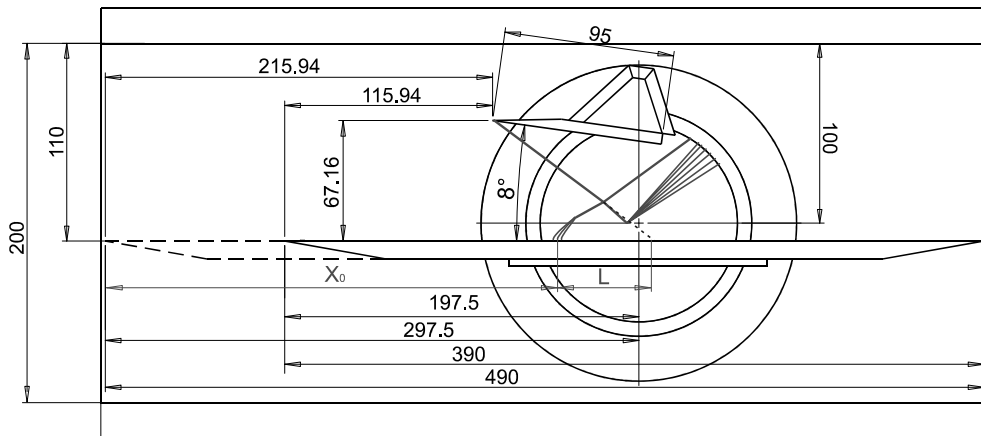


Рис. 1. Эскиз экспериментальной модели

Для исследования восприимчивости зоны взаимодействия к возмущениям пограничного слоя была изготовлена модель, оснащенная источником возмущений. Для генерации искусственных возмущений применялся электрогазодинамический метод на основе диэлектрического барьерного разряда (ДБР). Модель имеет геометрию, сходную с представленной на рис. 1. В носовой части модели, изготовленной из полиамида, располагается линейный разрядник ДБР. Ниже по потоку установлен турбулизатор. Такая комбинация устройств позволяет смещать точку перехода ближе к передней кромке при подаче напряжения на разрядник.

Параметры пограничного слоя и зоны взаимодействия

№	δ_0 , мм	δ^* , мм	θ , мм	Re_θ	u_τ , м/с	C_f	Угол клина	X_0 , мм	L , мм	$Sh = \frac{f \cdot L}{U_\infty}$
1	3,1	0,757	0,228	$2,7 \cdot 10^3$	25,7	$5,06 \cdot 10^{-3}$	8°	176,5	28	0,033
2	4,3	1,079	0,332	$3,5 \cdot 10^3$	23,8	$4,41 \cdot 10^{-3}$		262	41	0,031
3							7°	281	23	0,036

Эксперименты выполнялись для трех сочетаний толщины набегающего пограничного слоя перед зоной взаимодействия δ_0 и угла поворота потока в ударной волне, которые представлены в таблице. Величина δ_0 варьировалась путем изменения длины модели и измерялась в сечении $X = 160$ мм для “короткой” и $X = 260$ мм для “длинной” модели. Также приведены среднее положение отрывной ударной волны X_0 и длина зоны взаимодействия L . Безразмерная продольная координата определяется как $X^* = (X - X_0)/L$.

Основной объем экспериментальных данных в работе был получен при помощи термоанемометрических измерений. Особенностью применения термоанемометрии в данной работе является необходимость обеспечения широкого частотного диапазона для правильного измерения характеристик пульсаций в тонком турбулентном пограничном слое. Поскольку частотный диапазон термоанемометра постоянного сопротивления (ТПС) недостаточен для решаемой задачи, а использование термоанемометра постоянного тока (ТПТ) не оправдано для выполнения детального исследования всего течения, в работе был применен комплексный подход. В набегающем пограничном слое выполнялись измерения при помощи ТПС и ТПТ, на основании этих данных вычислялась корректировочная функция для ТПС, который использовался для измерений в зоне взаимодействия. Такой подход позволил выполнить детальное исследование течения и расширить частотный диапазон измерений.

Для выполнения двухточечных корреляционных измерений проволочный датчик термоанемометра применялся совместно с поверхностным датчиком. Поверхностный датчик располагался в характерных точках течения (набегающем пограничном слое, вблизи отрывной ударной волны и т.д.), а проволочный датчик сканировал зону взаимодействия. Для обеспечения достаточного частотного диапазона в качестве чувствительного элемента поверхностного датчика была использована микротрубочка с диаметром 10 мкм и толщиной стенки менее 1 мкм.

Кроме термоанемометрических измерений для диагностики течения использовалась высокоскоростная шпирен-визуализация, визуализация предельных линий тока на поверхности модели и измерение поверхностного давления на линии симметрии модели.

В главе 3 приведены результаты исследования течения в области взаимодействия ударной волны с пограничным слоем, а также выполнено сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования. Поскольку состояние набегающего пограничного слоя имеет большое значение для изучаемого течения, его исследованию было уделено особое внимание. Кроме того, были измерены профили пограничного слоя на боковых стенках рабочей части, необходимые для задания граничных условий при 3D численном моделировании.

Для обеспечения равновесного состояния пограничного слоя перед зоной взаимодействия была произведена поисковая работа по выбору оптимального турбулизатора. На рис. 2,а представлен пример профиля скорости в набегаю-

щем пограничном слое. Хорошо видно наличие стандартного логарифмического участка в распределении скорости. Для сравнения на рисунке приведены результаты моделирования течения методами RANS и LES, выполненного для данного тестового случая в Институте проблем машиностроения им. Подгорного (Украина) и в университете г. Саутгэмптон (Великобритания) соответственно. Оба расчета дают хорошее совпадение с экспериментом, расхождения в зоне вязкого подслоя связаны с погрешностью термоанемометрического метода из-за влияния стенки. Величина пульсаций, полученная во внешней части пограничного слоя, хорошо совпадает с известным распределением Клебанова и DNS расчетом (рис. 2,б). Дефицит энергии пульсаций в пристеночной зоне пограничного слоя связан с недостаточным частотным диапазоном термоанемометра. В целом, полученные данные указывают на наличие равновесного турбулентного пограничного слоя перед зоной взаимодействия.

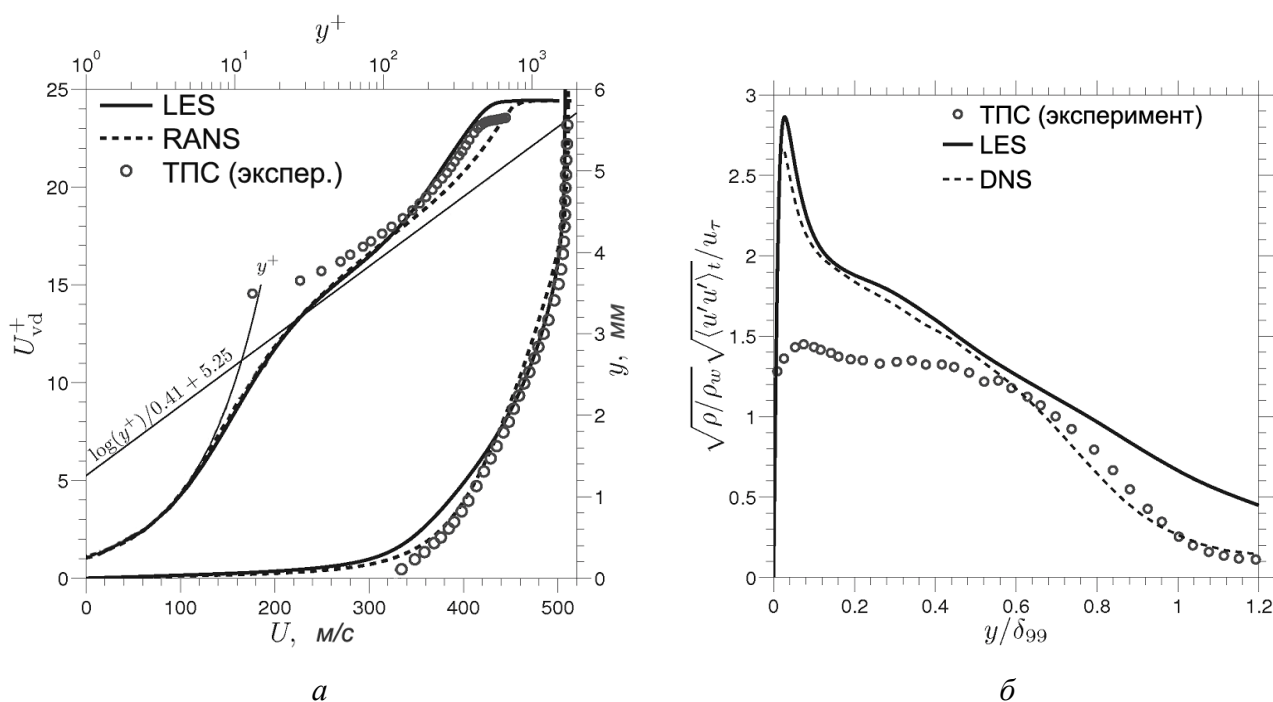


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных профилей скорости (а) и пульсаций скорости (б) в набегающем пограничном слое

Полученные в работе распределения давления являются характерными для данного вида взаимодействия (рис. 3). Имеется начальный рост давления, вызванный формированием отрывной ударной волны, далее наблюдается характерное для отрыва плато, после чего происходит рост давления, вызванный падающей ударной волной. Полный прирост давления при этом превышает значение, рассчитанное для невязкого взаимодействия, в силу влияния отрывного течения, формирующегося в угле между стенкой модели и боковой стенкой рабочей части (рис. 4). Несмотря на то, что визуализация предельных линий тока показала наличие квазидвумерного отрывного течения вблизи плоскости симметрии, влияние угловых отрывов на распределение давления существенно. Это подтверждает сравнение RANS расчетов, выполненных в пакете Fluent в

двумерной и трехмерной постановке (см. рис. 3). Результаты трехмерного расчета значительно лучше совпадают с экспериментальным распределением давления.

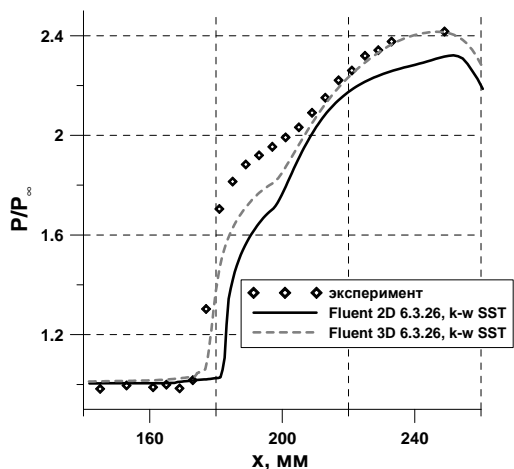


Рис. 3. Сравнение экспериментального распределения давления с результатами расчета различными методами

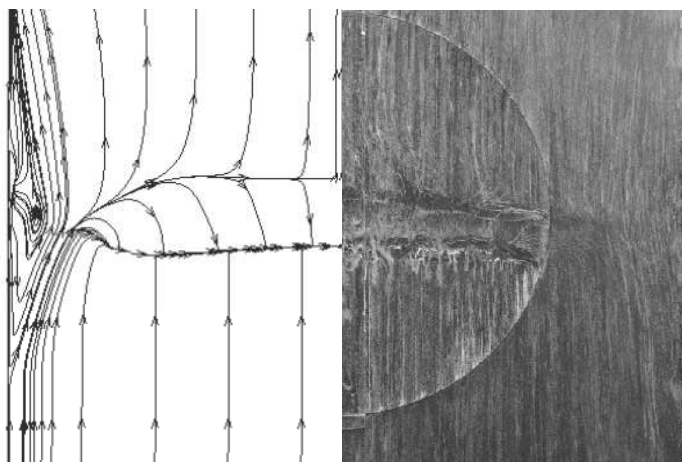


Рис. 4. Сравнение расчетных линий тока на поверхности (ИПМ RANS) с картиной визуализации

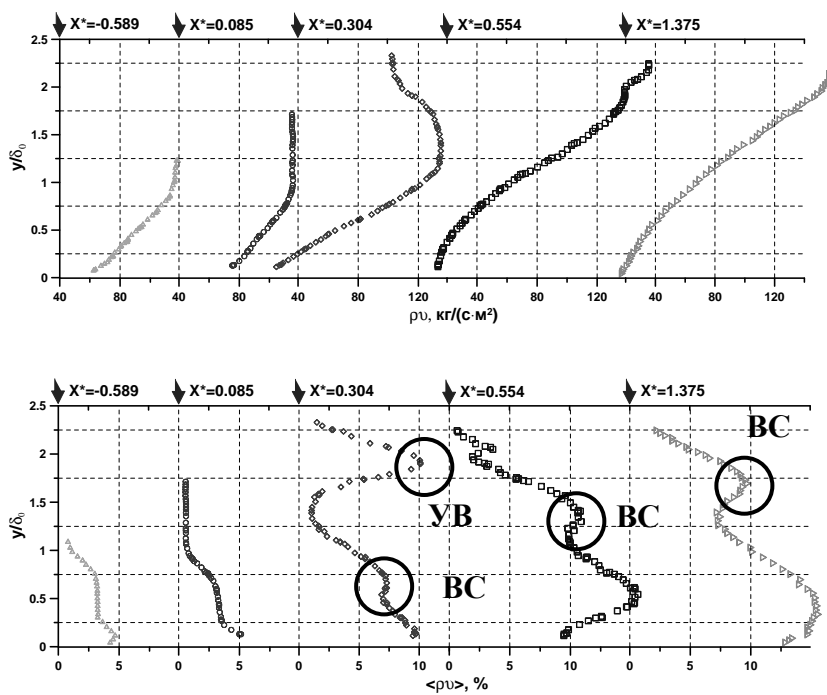


Рис. 5. Вертикальные профили массового расхода и пульсаций массового расхода (УВ – ударная волна, ВС – вихревой слой)

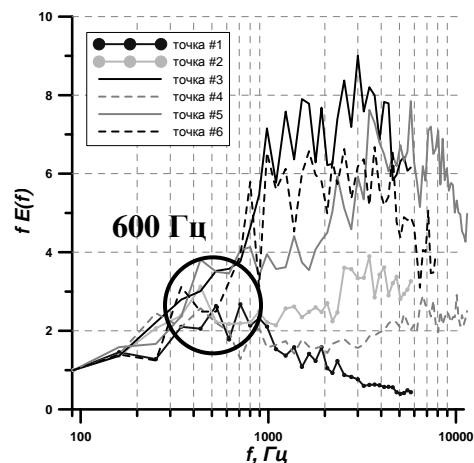
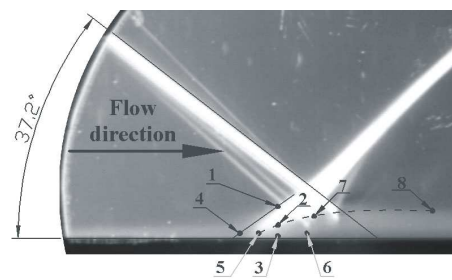


Рис. 6. Нормированные спектры $f \cdot E(f)$ в характерных точках

Наибольшее внимание в главе уделяется анализу данных термоанемометрических измерений в зоне взаимодействия. Были исследованы распределения амплитуды и статистических характеристик пульсаций массового расхода, а

также широко использовался спектральный анализ. Для всех тестовых случаев определены параметры низкочастотного движения отрывной ударной волны. Показано, что отрывная ударная волна колеблется хаотически, а амплитуда и частота колебаний зависят как от параметров набегающего пограничного слоя, так и от угла установки генератора падающей ударной волны. При этом число Струхала находится в диапазоне $Sh = 0,031 - 0,036$. Анализ спектров мощности позволил обнаружить, что в слое смешения, формирующемся из-за отрыва потока, присутствуют низкочастотные пульсации, частота которых совпадает с частотой осцилляций отрывной ударной волны. Анализ коэффициентов асимметрии и эксцесса показал существование в данной области образований вихревой природы, формирующихся из-за сильной неустойчивости сдвигового течения в области после отрывной ударной волны. Данный “вихревой слой” распространяется поверх отрывного пузыря и прослеживается далее вниз по потоку в зоне восстановления течения, как это видно из данных, представленных на рис. 5. Для выделения низкочастотных особенностей диапазон измерений был ограничен частотой 7 кГц. На графиках видно усиление турбулентности в зоне взаимодействия. На рисунке обозначены пики, обусловленные низкочастотным движением ударной волны и пульсациями в “вихревом слое”. Сравнение спектров (рис. 6), полученных в зоне отрывной ударной волны (точка №1) и в “вихревом слое” (точки №2 и №5), показывает наличие общего низкочастотного максимума. Большая часть энергии в зоне “вихревого слоя” обусловлена существованием вихрей и поэтому лежит в более высокочастотной зоне. Поэтому низкочастотные пульсации обусловлены совместными колебаниями “вихревого слоя” с отрывной зоной и ударной волной.

Одним из важных моментов главы является сравнение нестационарных характеристик взаимодействия, полученных в эксперименте, с результатами LES расчета. Установлено, что параметры колебаний отрывной ударной волны хо-

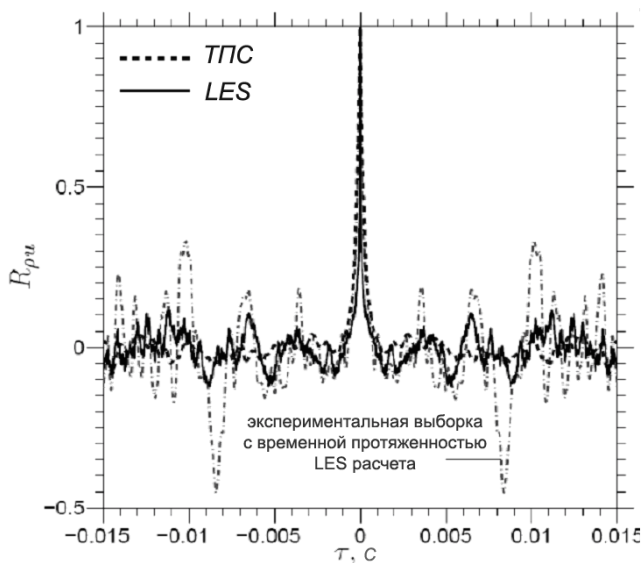


Рис. 7. Сравнение экспериментальных и расчетных функций автокорреляций в зоне осцилляций отрывной ударной волны

рошо совпадают, несмотря на различие в средних параметрах течения. На рис. 7 представлено сравнение функций автокорреляции в зоне колебаний отрывной ударной волной. Поскольку запись сигнала термоманометра примерно в 17 раз продолжительнее времени моделирования, автокорреляционная функция была построена для всей записи и для ее отрезка, соответствующего времени расчета LES. Можно отметить сходное поведение течения на низких частотах.

Кроме того, в данной главе представлены результаты обработки высокоскоростной шпирен-визуали-

зации. Анализ этих данных позволил уточнить характеристики осцилляций отрывной ударной волны и подтвердить хаотическую природу данного колебательного движения.

В главе 4 приведен развернутый анализ данных, полученных в ходе двухточечных корреляционных измерений. Изучалась взаимосвязь колебаний отрывной ударной волны с пульсациями в набегающем пограничном слое, отрывном течении и зоне восстановления. Были получены временные и пространственные масштабы корреляций и выявлены основные особенности распространения возмущений в исследуемом течении.

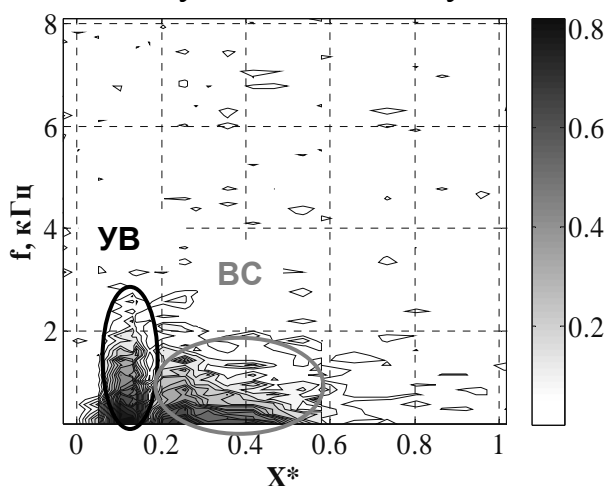


Рис. 8. Продольное распределение спектров когерентности сигналов поверхностного ($X^* = 0,07$) и проволочного ($y/\delta_0 = 0,77$) датчиков

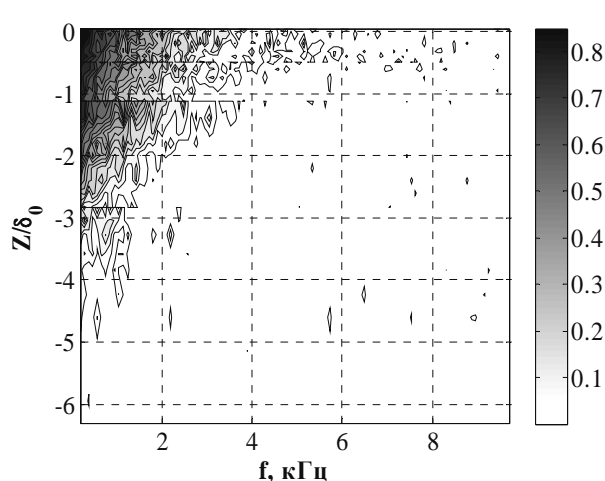


Рис. 9. Трансверсальное распределение спектров когерентности сигналов поверхностного ($X^* = 0,07$) и проволочного ($y/\delta_0 = 1,28$) датчиков

В разделе 4.1 описано исследование взаимосвязи пульсаций течения в области взаимодействия ударной волны с пограничным слоем. Поверхностный датчик располагался в зоне колебаний отрывной ударной волны, а проволочный датчик сканировал течение в зоне взаимодействия. Измерения подтвердили обнаруженную в главе 3 взаимосвязь низкочастотных пульсаций ударной волны с пульсациями “вихревого слоя”. Сравнение уровней когерентности в “вихревом слое” в начале и в конце зоны взаимодействия показало слабое затухание низкочастотных осцилляций “вихревого слоя”. На рис. 8 представлено распределение спектров когерентности при перемещении проволочного датчика в продольном направлении на фиксированном расстоянии от стенки. На графике обозначены два низкочастотных максимума, соответствующих пересечению датчиком зоны колебаний отрывной ударной волны и “вихревого слоя”. Анализ распределения сдвига фаз между сигналами показал положительную величину фазовой скорости, что означает распространение низкочастотных колебаний в “вихревом слое” вниз по потоку. В ходе измерений была также подтверждена взаимосвязь пульсаций отрывного пузыря с пульсациями отрывной ударной волны.

В разделе 4.2 описана трехмерная структура низкочастотных хаотических колебаний отрывной ударной волны. В этих исследованиях поверхностный датчик располагался в зоне колебаний отрывной ударной волны, а проволочный датчик сканировал поток в трансверсальном направлении в зоне осцилляций фронта ударной волны в невязком потоке. На рис. 9 представлены распределения полученных спектров когерентности. Из графика следует, что, несмотря на существование значительной дозвуковой зоны в области взаимодействия и возможность распространения возмущений на значительные расстояния, область корреляции сигналов ограничена. Основываясь на этих данных можно утверждать, что при квазидвумерном взаимодействии колебания фронта ударной волны носят трехмерный характер. Для фиксированных параметров взаимодействия фронт ударной волны не колеблется как единое целое, а претерпевает деформации, масштаб которых лежит в пределах $\pm 4\delta$ и уменьшается с ростом частоты колебаний.

В разделах 4.3 и 4.4 основное внимание уделяется взаимосвязи пульсаций набегающего пограничного слоя с процессами, происходящими в области взаимодействия. В этих экспериментах поверхностный датчик размещался в набегающем пограничном слое, а проволочный датчик сканировал поток в области взаимодействия. В зоне колебаний ударной волны был обнаружен высокий уровень когерентности для низких частот, что говорит о существовании взаимосвязи пульсаций набегающего пограничного слоя с осцилляциями отрывной ударной волны. Анализ сдвига фаз позволил установить, что низкочастотные возмущения набегающего пограничного слоя являются первичными и определяют осцилляции ударной волны.

С целью обнаружения низкочастотного источника возмущений был произведен анализ пространственного распределения автокорреляционной функции и спектров когерентности пульсаций массового расхода на основе данных, полученных в набегающем пограничном слое. Это позволило обнаружить в пограничном слое наличие крупномасштабных структур с продольным размером 17δ , порождающих акустические волны в невязком течении. Однако характерная частота этих крупномасштабных структур на порядок выше частоты движения отрывной ударной волны. В набегающем пограничном слое не было обнаружено значимого уровня пульсаций на частоте движения ударной волны.

На рис. 10 приведено распределение спектров когерентности при пересечении проволочным датчиком области взаимодействия. Соответствующие значения среднеквадратичных пульсаций массового расхода представлены на рис. 11. На обоих рисунках хорошо заметны пики, связанные с низкочастотными колебаниями ударной волны и пульсациями “вихревого слоя”, при этом положение максимумов пиков не совпадает. Так, максимум когерентности в зоне отрывной ударной волны лежит выше максимума пульсаций. Анализ соответствующих осциллограмм показал, что максимальный уровень когерентности наблюдается при наличии в сигнале проволочного датчика резких выбросов, возникающих при нахождении датчика на границе зоны колебаний ударной волны. При этом длительность данных выбросов должна быть сходна с времен-

ным масштабом структур, существующих в набегающем пограничном слое. Проведенный кросскорреляционный анализ подтвердил эту гипотезу. Временные масштабы пиков, полученных из кросскорреляционных распределений, позволяют объяснять низкочастотные колебания отрывной ударной волны крупномасштабными структурами в набегающем пограничном слое. Таким образом, можно утверждать, что существует механизм инициации колебаний отрывной ударной волны возмущениями набегающего пограничного слоя.

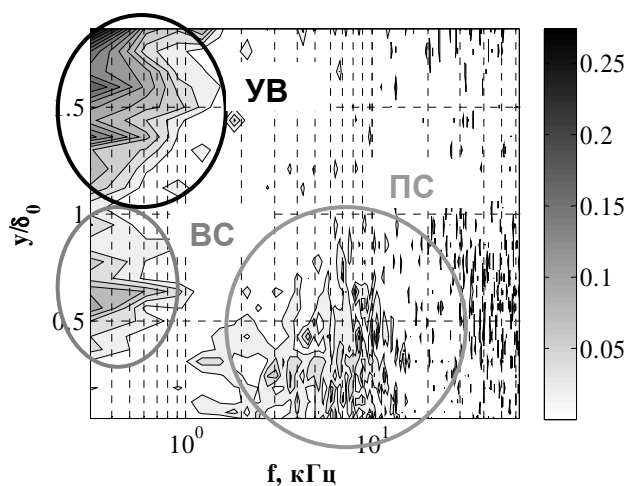


Рис. 10. Вертикальное распределение спектров когерентности сигналов поверхностного датчика ($X^* = -0,15$) и проволочного датчика ($X^* = 0,14$) (П.С. – пограничный слой)

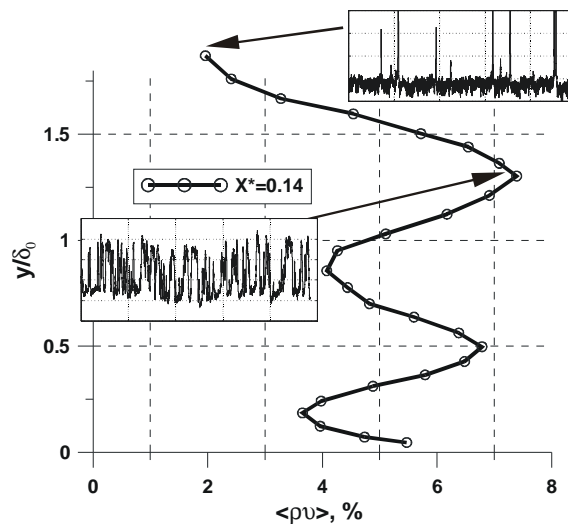


Рис. 11. Вертикальный профиль пульсаций массового расхода для $X^* = 0,14$

Кросскорреляционный анализ позволил установить, что отклик отрывной ударной волны на пульсации набегающего пограничного слоя имеет временную задержку. Возможно, за это ответственны процессы, происходящие в отрывном пузыре.

На всех распределениях спектров когерентности, полученных в зоне взаимодействия при расположении поверхностного датчика в пограничном слое, наблюдались значительные уровни когерентности в высокочастотной области. Это связано с распространением в зоне взаимодействия возмущений, сформировавшихся в набегающем пограничном слое. Не было замечено непосредственного влияния этих возмущений на механизм колебательного движения отрывной ударной волны.

Необходимо отдельно отметить, что в экспериментальном исследовании не было обнаружено заметных возмущений, распространяющихся против потока в дозвуковой области зоны взаимодействия, которые могли бы обеспечить образование механизма обратной связи.

В главе 5 описано исследование восприимчивости зоны взаимодействия по отношению к двумерным искусственным возмущениям, генерируемым в набегающем пограничном слое при помощи диэлектрического барьерного разряда (ДБР).

Поскольку уровень собственных пульсаций турбулентного пограничного слоя значителен, задача введения в него искусственных возмущений и исследования их развития является достаточно сложной. Поэтому вместо непосредственного введения возмущений в турбулентный пограничный слой был применен подход, основанный на периодическом смещении линии ламинарно-турбулентного перехода вблизи передней кромки. Перемещение линии перехода осуществлялось за счет комбинации стационарного турбулизатора и установленного перед ним электрического разрядника. Отличительной особенностью ДБР является его способность турбулизовать ламинарный пограничный слой. Поэтому включение/выключение ДБР с заданной периодичностью позволяло вносить требуемые низкочастотные возмущения. Использование в измерениях методики фазовой синхронизации позволяло выделять отклик потока на вводимое возмущение.

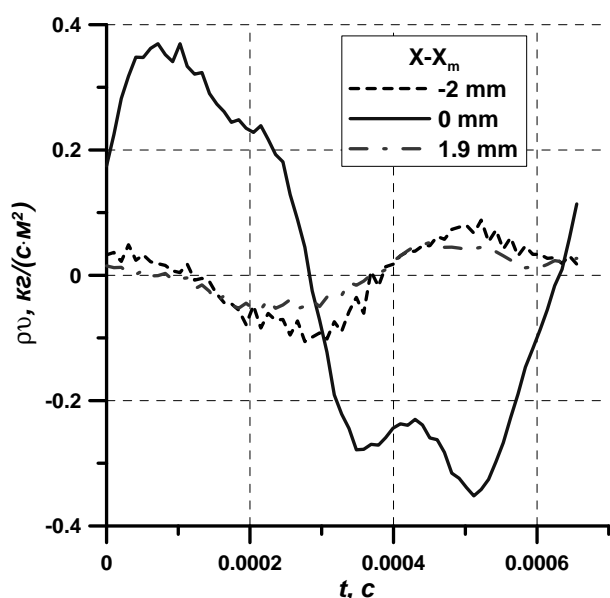


Рис. 12. Осциллограммы массового расхода в ударной волне при $f_{mf}=1500$ Гц, $y/\delta_0 = 1,35$

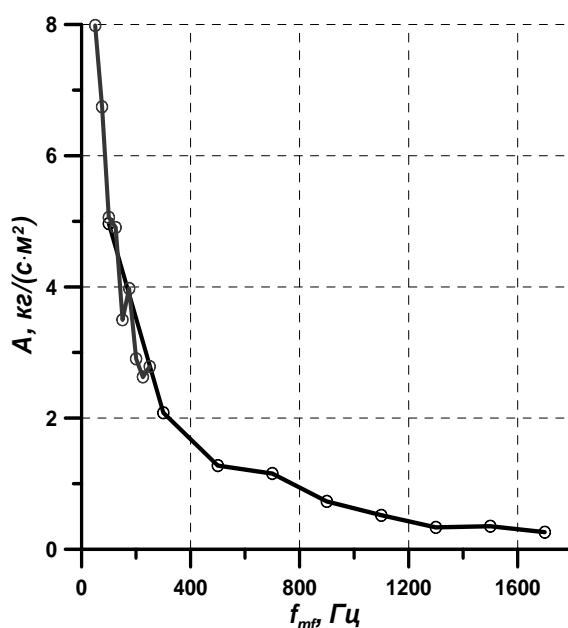


Рис. 13. Максимальная амплитуда пульсаций массового расхода в ударной волне для различных f_{mf} , $y/\delta_0 = 1,35$

В разделе 5.1 приведены результаты исследования параметров искусственных возмущений, вводимых в турбулентный пограничный слой, и показано, что их амплитуда сравнима с величиной естественных пульсаций, а распределение амплитуды пульсаций поперек пограничного слоя соответствует естественному случаю. Амплитуда вводимых возмущений слабо зависит от частоты и связана с относительной длительностью пакета импульсов, подаваемых на разрядник.

В разделе 5.2 рассматриваются результаты исследования отклика отрывной ударной волны на вводимые искусственные возмущения. Показано, что низкочастотные искусственные возмущения, вводимые в пограничный слой, вызывают синхронизованные колебания отрывной ударной волны и отрывной зоны на фоне их естественных колебаний. На рис. 12 представлен пример осциллограмм массового расхода, полученных в зоне осцилляций ударной волны при частоте искусственных возмущений 1500 Гц. Подобные измерения были осу-

ществлены в частотном диапазоне, соответствующем диапазону колебаний в естественном случае. На основе полученных осциллограмм построены распределения амплитуд пульсаций массового расхода вдоль зоны колебаний ударной волны для различных частот. На рис. 13 представлен сводный график, на котором показаны максимальные значения пульсаций в зоне колебаний ударной волны в зависимости от частоты вынуждающих возмущений.

Из рисунка хорошо видно монотонное уменьшение коэффициента восприимчивости с ростом частоты возмущений. Монотонный характер зависимости амплитуды колебаний ударной волны от частоты возмущений свидетельствует об отсутствии либо о слабом проявлении механизма обратной связи на выделенных частотах в зоне взаимодействия.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

- Выполнено исследование структуры, а также средних и пульсационных характеристик течения, сформированного при взаимодействии падающей косо ударной волны со сверхзвуковым турбулентным пограничным слоем, развивающимся на плоской пластине при $M = 2$ и $Re_0 = 2700-3500$. Обнаружены низкочастотные пульсации отрывной зоны и отрывной ударной волны, безразмерная частота которых близка к значению $Sh = 0,03$. Показано, что отрывная ударная волна колеблется хаотически, а амплитуда и частота колебаний зависят как от параметров набегающего пограничного слоя, так и от угла установки генератора падающей ударной волны.

- Выполнено корреляционное исследование взаимосвязи колебаний отрывной ударной волны с пульсациями в набегающем пограничном слое, отрывном течении и зоне восстановления. Показано, что высокочастотные возмущения набегающего турбулентного пограничного слоя непосредственно не участвуют в механизме возникновения колебаний отрывной ударной волны. Показано наличие в набегающем пограничном слое низкочастотных возмущений, и доказано существование и доминирование механизма инициации колебаний отрывной ударной волны возмущениями набегающего пограничного слоя. Исследована трехмерная структура низкочастотных хаотических колебаний отрывной ударной волны и показано, что при квазидвумерном взаимодействии колебания ее фронта носят трехмерный характер.

- Разработан метод введения двумерных возмущений в турбулентный пограничный слой и исследования восприимчивости зоны взаимодействия по отношению искусственным возмущениям. Показано, что низкочастотные искусственные возмущения набегающего пограничного слоя вызывают синхронизованные колебания отрывной ударной волны и отрывной зоны на фоне их естественных колебаний. Исследована зависимость восприимчивости колебаний отрывной ударной волны от частоты вводимых искусственных возмущений и показано, что наблюдается монотонное уменьшение коэффициента восприимчивости с ростом частоты возмущений

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. Поливанов П.А., Сидоренко А.А., Маслов А.А. Экспериментальное исследование взаимодействия ударной волны с турбулентным пограничным слоем // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2008. Т. 3, вып. 2. С. 3-14.
2. Поливанов П.А., Сидоренко А.А., Маслов А.А. Корреляционные исследования пульсаций при взаимодействии ударной волны с турбулентным пограничным слоем // Письма в Журнал технической физики. 2010. Т. 36, вып. 3. С. 23-30.
3. Polivanov P.A., Sidorenko A.A., Maslov A.A. Correlation study in shock wave-turbulent boundary layer interaction // An International Journal on Shock Waves, Detonations and Explosions. 2010. DOI: 10.1007/s00193-010-0286-7. 11 p.

Другие публикации:

1. Поливанов П.А., Сидоренко А.А. Экспериментальное исследование нестационарных явлений при взаимодействии ударной волны с турбулентным пограничным слоем // Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей: Докл. молодежной конф. Вып. XI. Новосибирск, 2008. С. 245-248.
2. Поливанов П.А., Сидоренко А.А. Расчет взаимодействия ударной волны с турбулентным пограничным слоем в программном комплексе Fluent 6.3. / Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей: Докл. молодежной конф. Вып. XI. Новосибирск, 2008. С. 249-253.
3. Polivanov P.A., Sidorenko A.A., Maslov A.A. Experimental study of unsteady effects in shock wave / turbulent boundary layer interaction international // Int. Conf. Methods of Aerophysical Research: Abstr. Pt 1. Novosibirsk, 2008. P. 183-184.
4. Polivanov P.A., Sidorenko A.A., Maslov A.A. Numerical simulation of shock wave/ turbulent boundary layer interaction using Fluent 6.3 // Int. Conf. Methods of Aerophysical Research: Abstr. Pt 1. Novosibirsk, 2008. P. 250-251.
5. Поливанов П.А. Экспериментальное Исследование нестационарных явлений при взаимодействии ударной волны с турбулентным пограничным слоем // Тезисы докладов X Всероссийской школы-конференции молодых ученых "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики". Новосибирск, 2008. С. 115-116.
6. Polivanov P.A., Sidorenko A.A., Maslov A.A. Experimental study of unsteady effects in shock wave / turbulent boundary layer interaction // Int. Conf. "47th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit": Proc. Orlando, FL, 2009. AIAA Pap. 2009-409. 7 p.
7. Поливанов П.А., Сидоренко А.А. Корреляционная связь пульсаций при взаимодействии ударной волны с турбулентным пограничным слоем // Тезисы докладов VII Всероссийской конференции молодых ученых "Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии". Новосибирск, 2009. С. 187-189.

8. Polivanov P.A., Sidorenko A.A., Maslov A.A. Correlation study in shock wave / turbulent boundary layer interaction // 27th Int. Symposium on Shock Waves: book of proceedings. St. Petersburg, 2009. P. 426.
9. Ершов С.В., Поливанов П.А., Сидоренко А.А., Деревянко А.И. Численное моделирование взаимодействия скачка уплотнения с турбулентным пограничным слоем // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Сборник трудов. Вып. XIII. Харьков, 2009. CD-ROM 13 с.
10. Ершов С.В., Поливанов П.А., Сидоренко А.А., Деревянко А.И. Численное моделирование взаимодействия скачка уплотнения с турбулентным пограничным слоем // Аэрогидродинамика и аэроакустика: проблемы и перспективы: Сборник научных трудов. Вып. 3. Харьков, 2009. С. 80-85.
11. Polivanov P.A., Sidorenko A.A., Maslov A.A. Receptivity of shock wave / turbulent boundary layer interaction to upstream disturbances // 45th Symposium of Applied Aerodynamics: Proc. Marseille, 2010. CD-ROM 10 p.
12. Maslov A.A., Polivanov P.A., Sidorenko A.A. (ISTC) Receptivity of shock wave / turbulent boundary layer interaction to upstream disturbances // Int. Conf. Methods of Aerophysical Research: Abstr. Pt 2. Novosibirsk, 2010. P. 165-166.

Ответственный за выпуск П.А. Поливанов

Подписано в печать 19.01.2011
Формат бумаги 60×84/16, Усл. печ. л. 1.0,
Уч.-изд. Л. 1.0, Тираж 100 экз., Заказ № 1

Отпечатано на ризографе ЗАО «ДокументСервис»
630090, Новосибирск, Институтская, 4/1