

На правах рукописи

Захарова Юлия Викторовна

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА НА ПАРАМЕТРЫ
СВЕРХЗВУКОВЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В КАНАЛАХ
ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

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

Научный руководитель:

доктор физико–математических наук
профессор Федорова Наталья Николаевна

Научный консультант:

кандидат технических наук
с.н.с. Гольдфельд Марат Абрамович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
профессор Терехов Виктор Иванович

доктор физико-математических наук
Латыпов Альберт Фатхиевич

Ведущая организация: Московский физико-технический институт

Защита состоится «01» июля в «9» часов на заседании диссертационного совета Д003.035.02 в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (630090, г. Новосибирск, ул. Институтская 4/1)

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

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу: 630090, Новосибирск–90, ул. Институтская 4/1, ИТПМ СО РАН, ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «31» мая 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук



Засыпкин И.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

При конструировании каналов технических устройств, использующих в качестве рабочего тела высокоэнтальпийные газовые среды, в том числе двигательных установок высокоскоростных летательных аппаратов, необходима информация о фундаментальных свойствах течений, позволяющая предсказывать влияние основных параметров (геометрии канала, чисел Маха, Рейнольдса), а также масштабного и температурного факторов на картину течений.

При проведении экспериментальных исследований в трубах кратковременного действия с высокими параметрами торможения, для которых характерными являются условия «холодной стенки», существенную поддержку оказывает физико-математическое моделирование, позволяющее получить полную информацию о течении, провести параметрические исследования и прояснить детали сложных течений.

Для тепловой защиты поверхностей технических устройств часто используется их охлаждение, что также формирует условия неадиабатичной стенки, которые могут изменить волновую структуру течений и динамические нагрузки.

Изменение температуры стенки может быть использовано для управления течениями в каналах.

Таким образом, изучение влияния температурного фактора на параметры течений в каналах переменного сечения актуально как с фундаментальной, так и с практической точек зрения. Ранее такие исследования были выполнены для дозвуковых (В.И. Терехов, 2009, 2010) и сверхзвуковых (Holden, 1966; Back, L.H., Cuffel, R.F., 1976, В.А. Башкин, И.В. Егоров, 2000, Г.Н. Лаврухин, 2008) течений. Однако они проводились для умеренных полных температур ($T_0 < 1000$ К) и в узком диапазоне изменения температурного фактора ($T_w/T_0=0.8\div 1.2$). Данные о влиянии температурного фактора в течениях с высокими параметрами торможения (Холден, 1966) немногочисленны.

Для сверхзвуковых течений в каналах характерно образование отрыва пограничного слоя. Известно (Spaid F. W. and Frishett, 1972), что при одиночном взаимодействии пограничного слоя со скачком уплотнения (угол сжатия, падающий скачок) снижение температуры стенки приводит к сокращению отрывной зоны, поскольку холодная стенка увеличивает наполненность профиля пограничного слоя и тем самым повышает его способность противостоять встречному градиенту давления. В то же время эффект холодной стенки при воздействии нескольких скачков ранее не исследовался. Отсутствуют систематические данные о влиянии температурного фактора на сверхзвуковые отрывные течения в окрестности уступа / каверны, в которых отрыв вызван не воздействием встречного градиента давления, а геометрией поверхности.

Цели работы

- Расчетные и экспериментальные исследования высокоэнтальпийных течений в каналах с уступами/кавернами;
- Исследования отрывных свойств турбулентного пограничного слоя при комбинированном взаимодействии со скачками уплотнения/волнами разрежения при высоких параметрах торможения;
- Изучение влияния температурного фактора на отрывные свойства пограничного слоя при его взаимодействии с последовательностью ударных волн, а также параметры и структуру отрывных течений в окрестности уступов и каверн;
- Исследование способов управления параметрами сверхзвуковых течений в каналах технических устройств с помощью температурного фактора.

Научная новизна

В широком диапазоне изменения температурного фактора ($T_w/T_0=0.1\div 1.0$) для условий высокоэнтальпийного потока ($T_0=1000\div 3000$ К) исследованы характеристики сверхзвуковых ($M_\infty=2\div 4$) отрывных течений при комплексном взаимодействии турбулентного пограничного слоя со скачками уплотнения и волнами разрежения различной интенсивности.

Показано, что при наличии отрыва на первом взаимодействии с ударной волной размер отрыва турбулентного пограничного слоя на втором угле сжатия сокращается.

Получены подробные данные о влиянии температурного фактора на размер отрывной зоны, уровень донного давления и статической температуры, а также вихревую картину отрывной зоны для сверхзвукового течения в канале с обратным уступом при высоких параметрах торможения. Показано, что холодная стенка сокращает отрыв за уступом, что обусловлено: 1) снижением статической температуры в отрывной зоне и, следовательно, донного давления; 2) изменением относительной толщины вытеснения пограничного слоя перед взаимодействием.

Для течений в канале с каверной открытого типа впервые в расчетах получен режим сверхзвукового течения с образованием волны сжатия в окрестности передней кромки каверны. Показано, что снижение температурного фактора приводит к повышению интенсивности скачка в зоне присоединения слоя смещения на задней наклонной стенке каверны, что, как и в случае уступа, обусловлено снижением статической температуры и давления в рециркуляционной зоне.

Практическая ценность работы

Полученные в работе данные могут использоваться при разработке методов тепловой защиты поверхностей и методов управления высокоскоростными течениями в каналах технических устройств, а также для поддержки экспериментальных исследований, проводимых в высокоэнтальпийных установках кратковременного действия.

На защиту выносятся результаты

- численного моделирования сверхзвуковых турбулентных течений в окрестности двойных углов сжатия при адиабатических и неадиабатических температурных условиях на стенке; исследования влияния предварительного взаимодействия на изменение отрывных свойств пограничного слоя при последовательном взаимодействии с ударными волнами различной интенсивности;
- численного и экспериментального изучения сверхзвуковых течений в канале с уступом различных конфигураций в широком диапазоне изменения внешних параметров ($M_\infty=2\div 6$, $T_0=1000\div 3000$ К) и температурного фактора ($T_w/T_0=0.1\div 1.0$); численного исследования влияния температуры стенки на изменение уровня донного давления, длины отрывной области и ее вихревой структуры;
- численного и экспериментального исследования влияние начальных параметров, геометрии, температурного и масштабного факторов на распределение основных параметров и волновую картину течения в канале с каверной.

Достоверность результатов подтверждается

- использованием проверенных на широком классе задач полных математических моделей, современных численных алгоритмов и пакетов программ;
- сопоставлением результатов расчетов с экспериментальными данными по распределению основных параметров и структуре течения;
- сравнением с результатами других авторов;
- проверкой сходимости численного решения на последовательности сгущающихся сеток.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах ИТПМ СО РАН, на объединенном семинаре ИВТ СО РАН, кафедры Математического моделирования НГУ, кафедры Вычислительных технологий НГТУ «Информационно - вычислительные технологии (численные методы механики сплошной среды)», на семинаре Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе, а также на следующих конференциях: Второй Европейской конференции по аэрокосмическим наукам, EUCASS (Брюссель, Бельгия, 2007); XXI Всероссийском семинаре «Струйные, отрывные и нестационарные течения» (Новосибирск, 2007); Международной школе-семинаре «Модели и методы аэродинамики» (Евпатория, Украина, 2006, 2007, 2010 гг.); Международной конференции по методам аэрофизических исследований ICMAR (Новосибирск, 2007, 2008, 2010); 27-м Международном симпозиуме по ударным волнам ISSW (Санкт-Петербург, 2009).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 23 работы, из них 3 работы в изданиях их списка ВАК. Основные результаты представлены в статьях, список которых приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

При выполнении работ по теме диссертации диссертант принимал активное участие в постановке задач, проведении экспериментальных исследований в импульсной трубе ИТ-302М, сборе и обработке экспериментальных данных, наполнении базы экспериментальных данных, в обсуждении экспериментальных результатов. Автором проведены расчеты и анализ результатов всех рассматриваемых в диссертации течений. Результаты совместных работ представлены в диссертации с согласия соавторов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, включающего 197 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследуемых задач, приведены основные особенности течений, возникающие при исследуемых взаимодействиях. Представлены некоторые классические работы по данной тематике и описана структура диссертации.

В **первой главе** сделан обзор литературы по теме работы.

В **§1** приводится обзор работ по взаимодействию пограничного слоя с одиночным скачком уплотнения. Анализируется влияние различных параметров (чисел Маха, Рейнольдса), состояния пограничного слоя на условия зарождения отрыва. Представлены работы, в которых исследовано влияние температуры стенки на изменение отрывных свойств пограничного слоя. Показано, для случая отрыва, инициированного воздействием скачка уплотнения, снижение температуры стенки уменьшает длину отрывной зоны.

В **§2** сделан обзор литературы по комплексным взаимодействиям пограничного слоя со скачками уплотнения и волнами разрежения различной интенсивности. Показано, что предварительное воздействие скачка уплотнения повышает уровень турбулентности в потоке. Это улучшает способность пограничного слоя противостоять отрыву. В то же время воздействие волны разрежения ламинаризирует пограничный слой, и его способность противостоять отрыву понижается. Работы выполнены для низкоэнталийных потоков, для которых влияние температурного фактора не исследовано.

В **§3** приведены работы по исследованиям течений в каналах с уступами / кавернами. Показано влияние различных параметров, в том числе температурного фактора и конфигурации уступа (сужение кормовой части) на структуру течения.

В §4 на основе представленного литературного обзора сформулированы основные цели настоящей работы.

Во второй главе представлены методики расчетных и экспериментальных исследований.

В §1 описаны модели и методы экспериментальных исследований, выполненных в импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН. Эксперименты выполнены в режиме присоединенного трубопровода в диапазоне чисел Маха $M_\infty = 2 \div 4$, при высоких параметрах торможения ($P_0 = 20 \div 40$ бар, $T_0 = 1000 \div 3000$ К, $Re_1 = 15 \div 40 \times 10^6$ 1/м). В ходе эксперимента температура, давление и число Рейнольдса изменялись, а число Маха оставалось постоянным. Длительность эксперимента составляла $100 \div 200$ мс, поэтому стенка экспериментальной модели оставалась холодной. Экспериментальная модель представляла собой плоский канал с обратным уступом. Верхняя стенка канала была съемной, что позволяло менять конфигурацию уступа либо устанавливать каверну. В экспериментах были измерены параметры набегающего потока на входе в канал, распределения статического давления вдоль стенок модели, давления Пито для определения параметров пограничного слоя, а также выполнена визуализация течения (оптические измерения).

В §2 описана методика сбора, обработки, хранения и анализа экспериментальных результатов, основанная на использовании технологий баз данных. Данные экспериментов были занесены в базу данных «ARROW», что позволяло быстро обрабатывать и анализировать результаты экспериментальных исследований, отображать графическую информацию и сравнивать результаты различных экспериментов между собой.

В §3 приведена методология обработки экспериментальных измерений, выполненных при числе Маха $M_\infty = 2.8$ с целью оценки интегральных характеристик турбулентного пограничного слоя. В условиях импульсной трубы подобные измерения были выполнены впервые.

В §4-6 представлено описание математической модели, методики расчета и задания граничных условий. Численное моделирование было проведено на основе полных нестационарных осредненных уравнений Навье – Стокса, дополненных различными моделями турбулентности ($k - \omega$ и SST). Были использованы два пакета программ: «оригинальный», разработанный ранее Н.Н. Федоровой и др., а также коммерческий пакет программ ANSYS CFD 12 (Fluent). Использовались современные схемы (AUSM, Roe, van Leer) высокого порядка аппроксимации. Решение стационарных задач проводилось методом установления. Расчетная область задачи, как правило, включала не всю модель, а только ее часть, примыкающую к исследуемой области (уступ/каверна/угол сжатия). Во входном сечении расчетной области задавались профили газодинамических и турбулентных параметров, полученные из расчетов пластины/плоского канала эффективной длины, необходимой для достижения параметров пограничного слоя, соответствующих экспериментальным данным. Регулярная расчетная сетка содержала $500 \div 1000$ узлов в x -направлении и

200 ÷ 350 узлов в y -направлении со сгущением к поверхностям для разрешения пограничных слоев. Для всех задач проводились исследования сходимости по сетке. Результаты, полученные по двум расчетным программам, были сопоставлены, получено хорошее согласование.

В третьей главе диссертации представлены результаты исследования характеристик турбулентного пограничного слоя при его взаимодействии с системой скачков уплотнения.

В §1 исследовались сверхзвуковые турбулентные течения в окрестности последовательности углов сжатия. Расстояние между углами сжатия было фиксированным ($d=100$ мм), величина первого угла изменялась: $\alpha_1=7^\circ, 11^\circ, 15^\circ$, а величина второго угла была постоянной $\alpha_2=18^\circ$. Численное моделирование проводилось для условий экспериментов, выполненных ранее М.А. Гольдфельдом в сверхзвуковой аэродинамической установке Т-313 ИТПМ СО РАН при $M_\infty=2\div 4$. Полученные детальные картины течения позволили оценить характеристики пограничного слоя в условиях комплексного взаимодействия со скачками уплотнения. Представленные на рис. 1 расчетные распределения статического давления (сплошные линии) хорошо согласуются с результатами невязкой теории (штриховые линии) и с экспериментальными данными (символы), измеренными на первом угле сжатия.

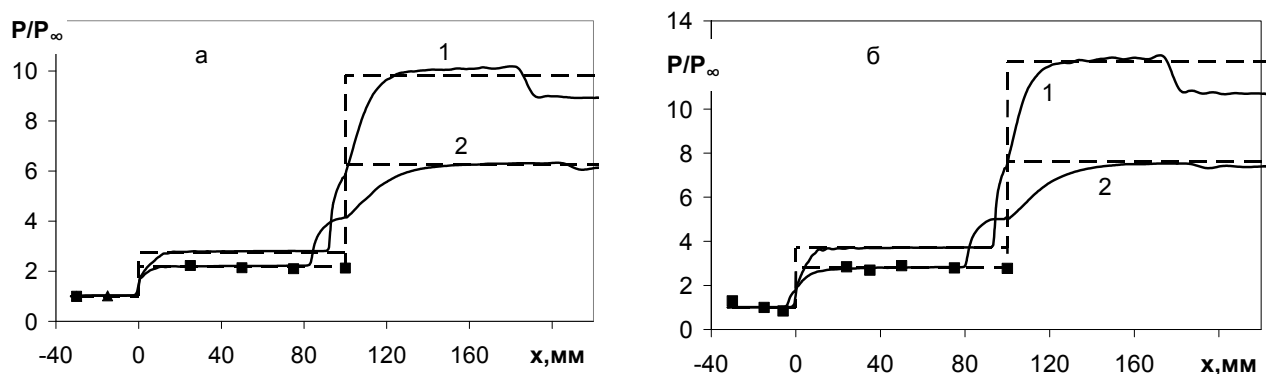


Рис. 1. Распределение статического давления для $\alpha_1=11^\circ$ (а), 15° (б), $M_\infty=4$ (1), 3 (2)

В §2 при адиабатических условиях на стенке рассматривалось влияние предварительно скачка (величины α_1) на изменение отрывных свойств турбулентного пограничного слоя в окрестности второго угла. Были проведены расчеты взаимодействия пограничного слоя с одиночным скачком $\alpha_2=18^\circ$. При этом во входном сечении задавалось внешнее течение с числом Маха, полученным за первым скачком различной интенсивности, и профили равновесного турбулентного пограничного слоя с интегральными характеристиками, близкими к параметрам возмущенного первым взаимодействием пограничного слоя. Показано, что наличие отрыва на первом угле сжатия приводит к изменению отрывных свойств пограничного слоя в области второго взаимодействия. Сравнение длин отрыва для одиночного и двойного взаимодействия показывает, что воздействие предварительного скачка сокращает протяженность области отрыва на втором угле сжатия (рис. 2). Такая тенденция в изменении

отрывных свойств сохраняется для всех рассмотренных чисел Маха и углов предварительного поворота потока (рис. 3).

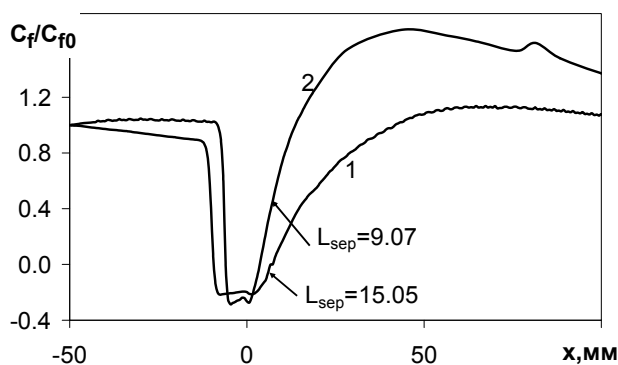


Рис. 2. Распределение коэффициента трения при $M_\infty=4$, $\alpha_1=0^\circ$ (1), 15° (2)

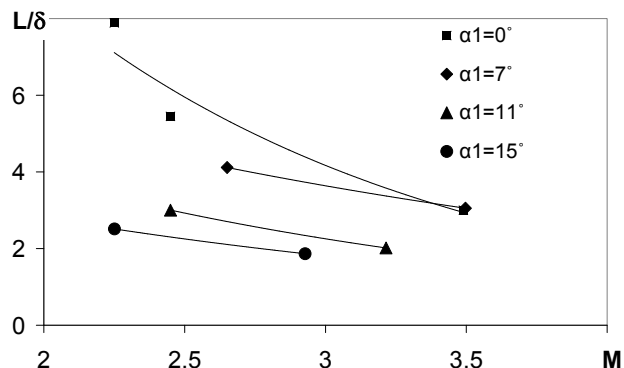


Рис. 3. Зависимость относительной длины отрыва от числа Маха для различных α_1

Для объяснения этого эффекта были проанализированы профили турбулентных параметров для случаев одиночного и двойного взаимодействий. После отрыва на первом угле сжатия турбулентная вязкость значительно возрастает по сравнению с невозмущенным случаем. Высокая турбулентная вязкость сохраняется до второго взаимодействия и препятствует развитию отрыва, что приводит к сокращению размера отрывной области на втором угле.

В §3 проведено численное исследование влияния температуры стенки на изменение отрывных свойств пограничного слоя в окрестности двойного угла сжатия. В качестве начальных условий были выбраны типичные условия экспериментов импульсной трубы ИТ-302М при $M_\infty=2.8$ с высокими значениями полной и статической температуры ($P_0=45$ бар, $T_0=1700$ К, $T_\infty=800$ К). В расчетах значение температуры стенки варьировалось от холодной ($T_w=300$ К) до адиабатической. Анализ распределений статического давления и коэффициента трения показал, что охлаждение стенки приводит к сокращению длины отрыва в окрестности первого и второго углов сжатия. Как показывает рис. 4, этот эффект связан с ростом коэффициента трения перед областью взаимодействия.

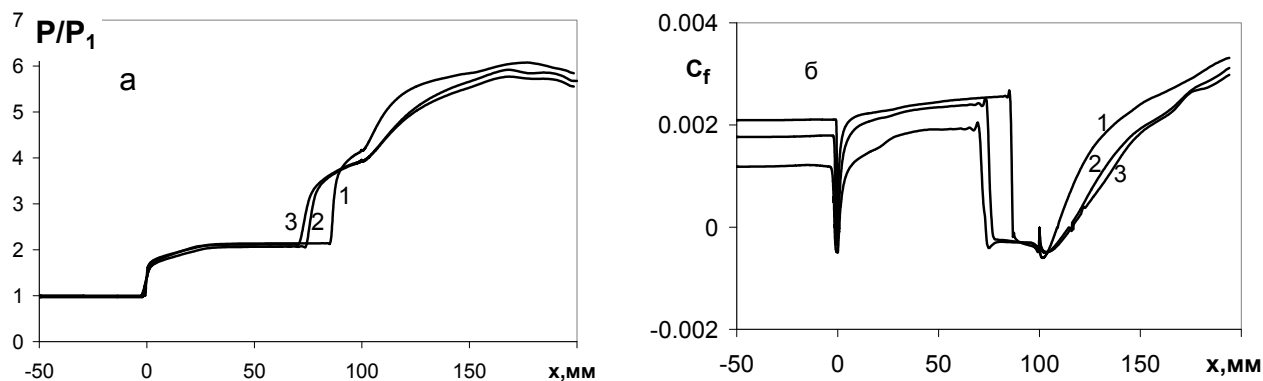


Рис. 4. Распределение статического давления (а) и коэффициента трения (б) для случая $M_\infty=2.8$, $\alpha_1=11^\circ$, $\alpha_2=18^\circ$, $T_w=300$ (1), $T_w=800$ (2), адиабатическая стенка (3)

В четвертой главе приведены результаты численного и экспериментального исследования течения в канале с обратным уступом. Обтекание обратного уступа характеризуется образованием дозвуковой рециркуляционной области, в которой могут реализовываться близкие к температуре торможения значения статической температуры, что является оптимальным для воспламенения смеси. Поэтому такая конфигурация может быть использована в качестве стабилизатора пламени в сверхзвуковом потоке. В то же время изменение температуры стенки может приводить к существенным изменениям параметров внутри рециркуляционной зоны, в том числе к снижению статической температуры.

В §1 исследовалось влияние температуры стенки на параметры и структуру течения в канале с обратным уступом. Численное моделирование проводилось для условий экспериментов, выполненных в импульсной трубе ИТ-302М при высоких значениях полных температур ($T_0=1200\div 3000$ К). Подробно проанализированы волновые картины течений при числах Маха $M_\infty = 2, 2.3, 2.8$. Показано, что снижение температуры стенки приводит к уменьшению уровня донного давления и сокращению длины отрывной области (рис. 5). Такая тенденция сохранялась для всех рассматриваемых чисел Маха.

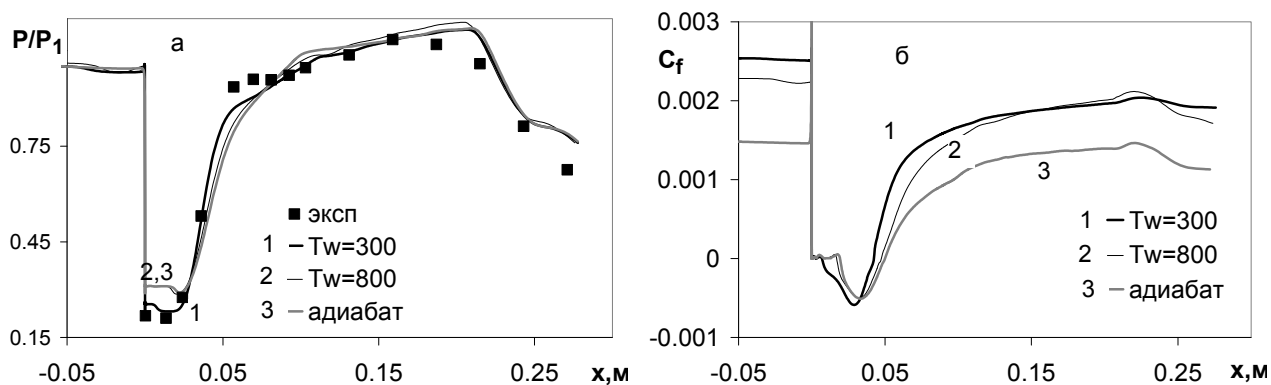


Рис. 5. Распределение давления (а) и коэффициента трения (б), $M_\infty=2.8$, $T_0=1400$ К

При $M_\infty=6$, $T_0=3000$ К, $T_w=300$ К выполнены расчеты без учета и с учетом изменения удельной теплоемкости (C_p) в зависимости от температуры газа. Показано, что учет реальных свойств газа усиливает эффект холодной стенки.

При изменении температуры стенки значительные изменения происходят в вихревой структуре течения. При адиабатических условиях на стенке в рециркуляционной области наблюдается высокий уровень статической температуры ($T_w \approx 1100$ К) и реализуется режим течения с двумя большими вихрями (рис. 6). Для холодной стенки ($T_w=300$ К) наблюдается режим течения с одним большим вихрем, а уровень температуры в отрывной области снижается до значений в набегающем потоке. Максимальная температура реализуется в области присоединения потока.

Причиной описанных выше изменений уровня донного давления и длины отрывной области является снижение температуры стенки, что приводит к снижению уровня статической температуры в рециркуляционной области

(рис. 7, а). Плотность при этом практически не меняется, поэтому статическое давление в донной области снижается, а длина отрыва сокращается.

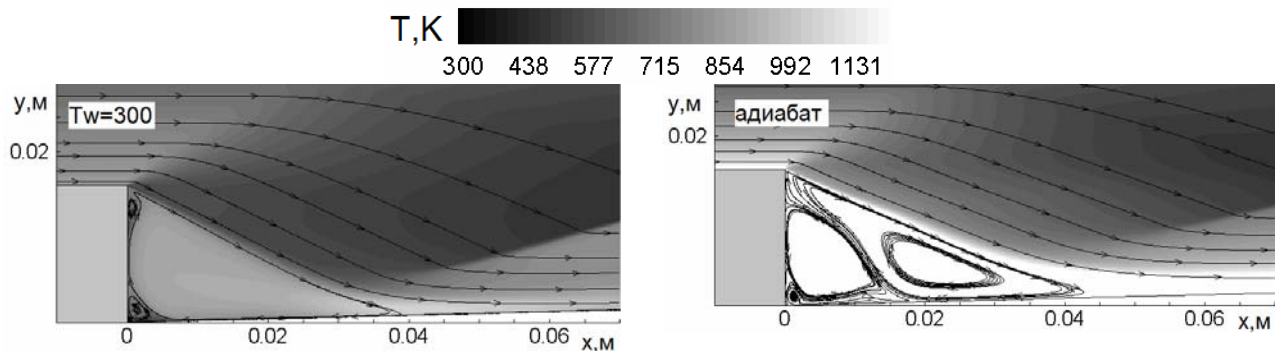


Рис. 6. Поля статической температуры и линии тока для $M_\infty=2.8$

Кроме того, анализ данных о влиянии температуры стенки на параметры турбулентного пограничного слоя показал, что при снижении температуры стенки происходит существенное изменение профилей основных параметров в сечении перед уступом. Данные таблицы 1, в которой приведены толщины пограничного слоя перед уступом, а также величины относительного донного давления и длины отрыва, показывают, что в зависимости от температуры стенки изменяются интегральные характеристики пограничного слоя. Для холодной стенки ($T_w=300$ К) в сечении перед расширением наблюдается более толстый пограничный слой. Однако значение относительной толщины вытеснения для адиабатической стенки остается больше, чем для холодной.

Таблица 1. Результаты расчетов течений в канале с уступом

M_∞	T_w , К	δ , мм	δ^* , мм	P_b/P_∞	L_{sep} , мм
2	300	9.2	1.4	0.37	49
	500	9.2	1.65	0.4	52
	900	9.2	2.0	0.44	56
	1200	9.2	2.3	0.47	60
2.33	300	10	1.93	0.3	45
	600	10.2	2.47	0.35	48
	900	10.4	2.91	0.37	50
	1400	10.4	3.2	0.41	55
2.8	300	10.7	2.77	0.25	43
	800	10.4	2.8	0.27	48
	1790	9.04	2.88	0.31	52

При сохранении расхода по каналу увеличение относительной толщины вытеснения пограничных слоев на верхней и нижней стенках приводит к уменьшению эффективной высоты канала. Поэтому при адиабатических условиях на стенке струя, срывающаяся с кромки уступа, пробивает дальше, и тем самым увеличивается длина отрывной области. Увеличение длины отрыва в зависимости от относительной толщины вытеснения подтверждает зависимость, представленная на рис. 7, б.

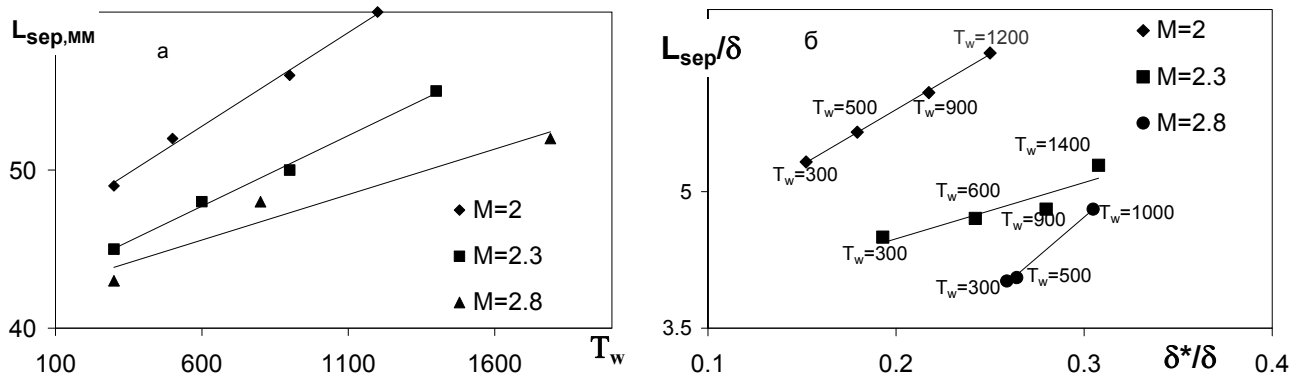


Рис. 7. Изменение относительной длины отрыва в зависимости от температуры стенки (а) и относительной толщины вытеснения пограничного слоя (б)

В §2 представлены результаты численного и экспериментального исследования влияния конфигурации уступа на структуру течения в условиях адиабатической / неадиабатической стенки. Уступ с изменяемой геометрией часто используется для улучшения смешения воздуха и топлива, инжектируемого в канал перед областью расширения. Рассматривались три конфигурации уступа: 1 - прямой уступ, 2 - уступ с предварительным поджатием 8° , 3 - с предварительным расширением 8° (рис. 8).

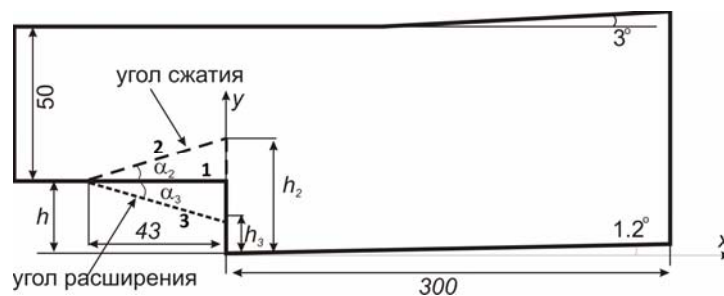


Рис. 8. Схема модели с измененной формой кромки

Численное моделирование проводилось для условий экспериментов, выполненных в трубе ИТ-302М при следующих параметрах: $M_\infty=2.8$, $T_0=1800\div 2000$ К. Показано, что наличие предварительного сжатия/расширения приводит к изменению волновой картины течения по каналу. Ударная волна, образующаяся в угле сжатия (конфигурации 2, рис. 9, а), переотражается от стенок канала, в результате чего образуются области высокого статического давления и отрывные зоны. При использовании такой конфигурации в качестве модельной камеры сгорания наличие дополнительных отрывных зон будет способствовать воспламенению смеси. Для конфигурации 3 (рис. 9, б) давление в области расширения снижается более плавно, что может быть использовано для уменьшения донного сопротивления.

Для каждой конфигурации численно исследовано влияние температуры стенки на структуру и параметры течения за уступом. Для конфигурации 2 обтекание предварительного угла сжатия 8° осуществлялось безотрывно. Расчетные распределения статического давления на нижней стенке хорошо совпада-

ют с экспериментальными данными (рис. 10, а). Максимальная протяженность отрывной области за уступом наблюдалась при адиабатических температурных условиях (рис. 10, б).

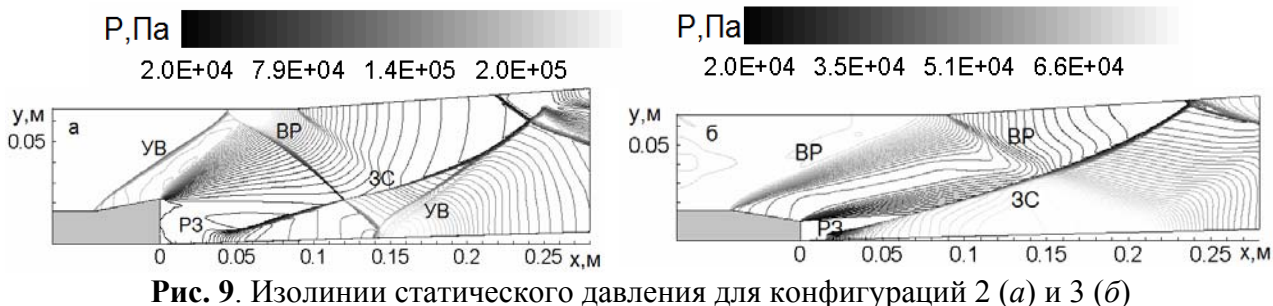


Рис. 9. Изолинии статического давления для конфигураций 2 (а) и 3 (б)

Холодная стенка значительно сокращает размер как основной, так и вторичных отрывных зон, обусловленных падением отраженных скачков на нижнюю стенку. Значение коэффициента трения для условий холодной стенки остается выше как перед областью взаимодействия, так и за областями отрывных зон, образованных вследствие воздействия скачка (рис. 10, б). Для этой конфигурации при $T_w=300$ К уровень относительного донного давления составлял $P/P_1=0.22$.

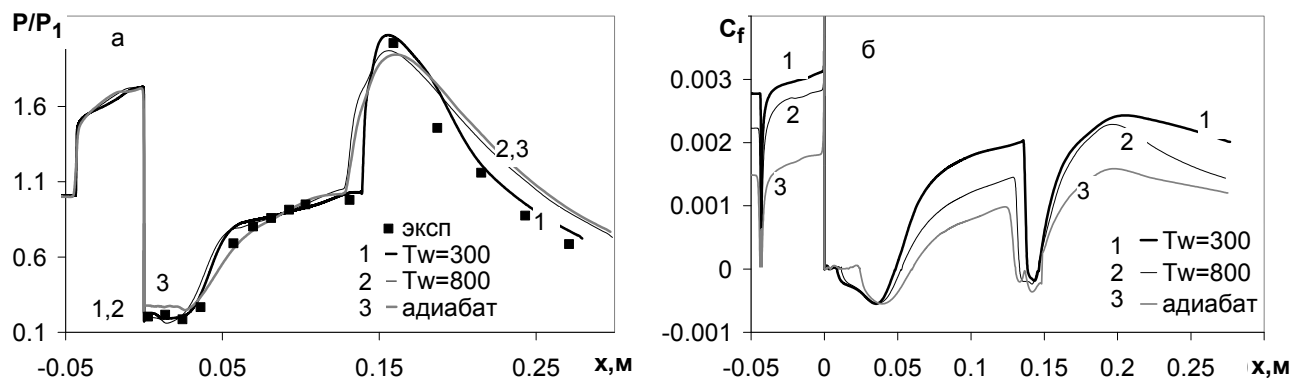


Рис. 10. Распределение давления (а) и коэффициента трения (б), $M_\infty=2.8$, конфигурация 2

Для конфигурации 3 наблюдалось увеличение уровня относительного давления в донной области ($P/P_1=0.26$), что вызвано более плавным расширением потока за счет предварительного угла расширения и уменьшения высоты уступа. За областью присоединения потока ($x > 0.04$ м) уровень статического давления выше, чем перед областью взаимодействия, затем происходит снижение давления вследствие падения на нижнюю стенку волны разрежения (рис. 11, а). Сравнение расчетного и экспериментального распределения статического давления показало удовлетворительное соответствие. Все тенденции в изменении длины отрыва, уровня донного давления и поведения коэффициента трения сохраняются такими же, как и для рассматриваемых выше конфигураций (рис. 11, б).

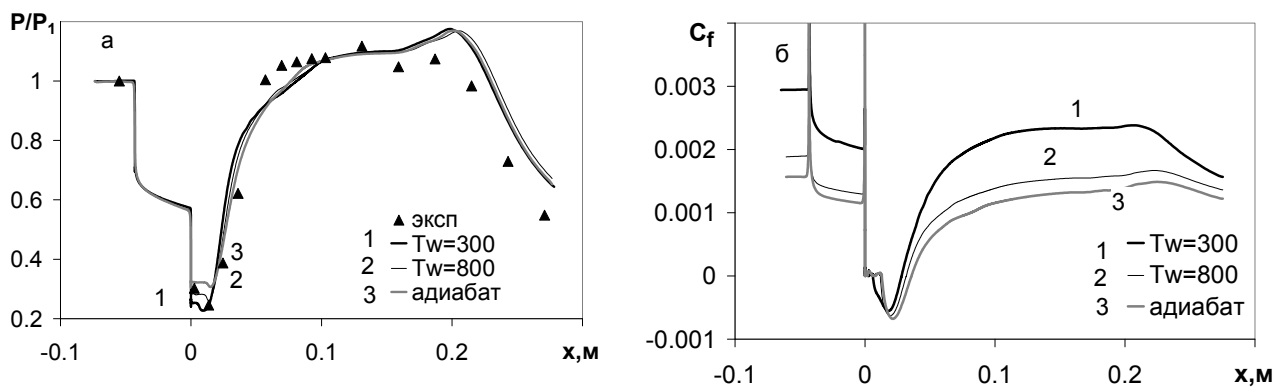


Рис. 11. Распределение давления (а) и коэффициента трения (б), $M_\infty=2.8$, конфигурация 3

Анализ влияния температуры стенки на длину отрывной зоны для конфигураций 2 и 3 показал, что так же, как и для конфигурации 1, увеличение температуры стенки приводит к увеличению относительной толщины вытеснения. Это приводит к уменьшению эффективной высоты канала и росту отрывной области (рис. 12). Самый большой отрыв получен для конфигурации 2, самый маленький – для конфигурации 3.

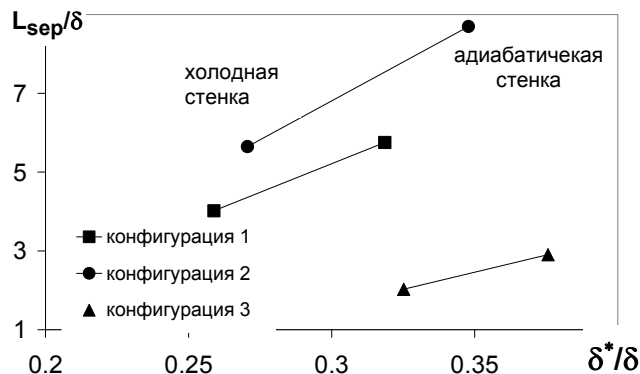


Рис. 12. Изменение относительной длины отрыва в зависимости от относительной толщины вытеснения пограничного слоя

В пятой главе представлены результаты численного и экспериментального исследования течения в канале с каверной. Приводится описание типов каверн и характерных особенностей течений. Геометрия канала представлена на рис. 13. В качестве начальных данных для расчетов были выбраны типичные условия экспериментов импульсной трубы ИТ-302М.

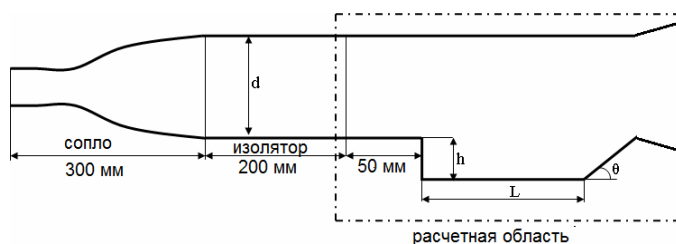


Рис. 13. Геометрия канала с каверной

В §1 численно исследовано влияние числа Маха ($M_\infty=2, 2.5, 3$) и полной температуры ($T_0=1500, 1800, 2000$ К) на течение в канале с каверной. Типичная картина течения в канале с каверной при $M_\infty=3, \theta=22.5^\circ$ представлена на рис. 14, а. В этом случае вблизи передней кромки образуется волна разрежения (ВР). Внутри каверны формируется дозвуковая рециркуляционная зона (РЗ). Течение внутри каверны остается дозвуковым при всех рассматриваемых числах Маха. В окрестности присоединения слоя смешения вблизи задней кромки

формируются волны сжатия, далее образующие ударную волну (УВ). С ростом числа Маха происходит более интенсивное расширение потока в окрестности передней кромки и увеличение угла разворота слоя смешения в окрестности задней стенки каверны, что приводит к образованию более интенсивной волны сжатия (рис. 14, б).

В §2 представлены результаты по влиянию геометрии каверны (длины каверны L и угла отклонения задней стенки θ) на изменение структуры течения и распределения основных параметров. Расчеты проведены для $h=16$ мм, $P_0=30$ бар, остальные параметры исследованных течений представлены в таблице 2.

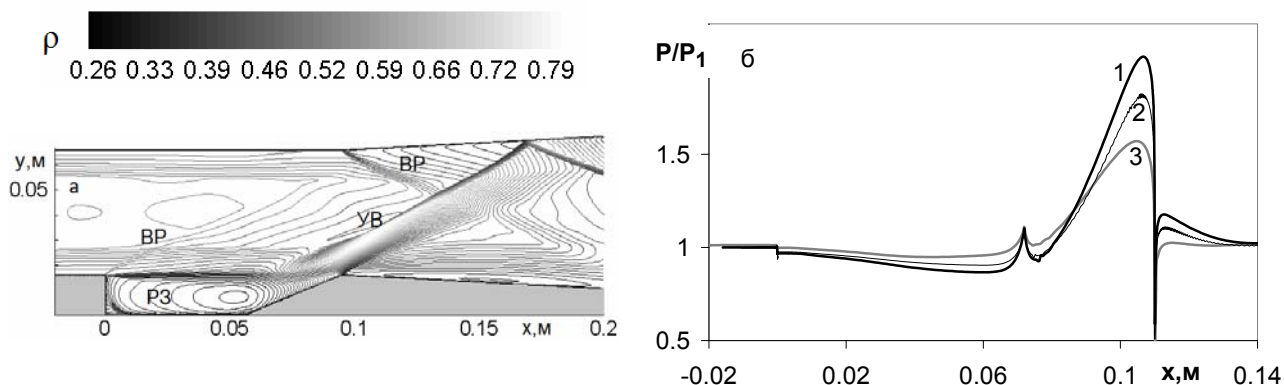


Рис. 14. Изолинии плотности $M_\infty=3$ (а), распределение давления $M_\infty=3$ (1), 2.5 (2) и 2 (3) (б)

Таблица 2. Параметры течений в канале с каверной

Увеличение L/h ($4.5 \leq L/h \leq 10$) приводит к росту интенсивности волны разрежения в окрестности передней стенки каверны, что хорошо видно из представленного на рис. 15 распределения давления для конфигураций №5-7 таблицы 2. Дальнейшее увеличение L/h приводит к изменению режима течения в каверне. При $L/h=10$ реализовывался режим открытой, а при $L/h=12$ - закрытой каверны. В случае закрытой каверны слой смешения присоединялся на нижнюю стенку каверны. В окрестности задней стенки образовывалась область высокого статического давления, что приводило к запираанию канала.

№	1	2	3	4	5	6	7	8
L/h	4.5	8	4.5	4.5	4.5	8	10	12
θ°	45	22.5	90	22.5				
M	2				3			
T_0, K	1500				2000			

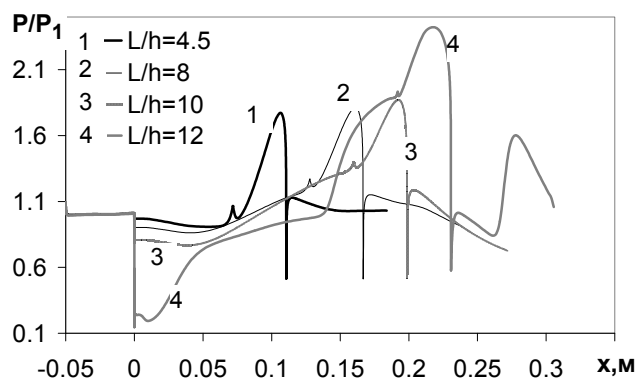


Рис. 15. Распределение статического давления на нижней стенке для различных длин каверн

Значительные изменения течения в канале с каверной происходят при изменении угла отклонения задней стенки θ . Как показывает рис. 16, а, в случае

№4 таблицы 2 (прямоугольная каверна) волна, образующаяся в области передней кромки каверны, является волной сжатия. В этом случае уровень статического давления внутри каверны выше, чем в набегающем потоке. Уменьшение угла отклонения задней стенки ($\theta = 45^\circ$) приводит к тому, что слой смешения проникает глубже в каверну, что снижает интенсивность ударной волны в области передней стенки. При этом интенсивность ударной волны вблизи задней стенки возрастает (рис. 16, б). При дальнейшем уменьшении $\theta=22.5^\circ$ в окрестности передней стенки формируется слабая волна разряжения. В этом случае внутри каверны уровень статического давления ниже, чем в набегающем потоке (рис. 16, в).

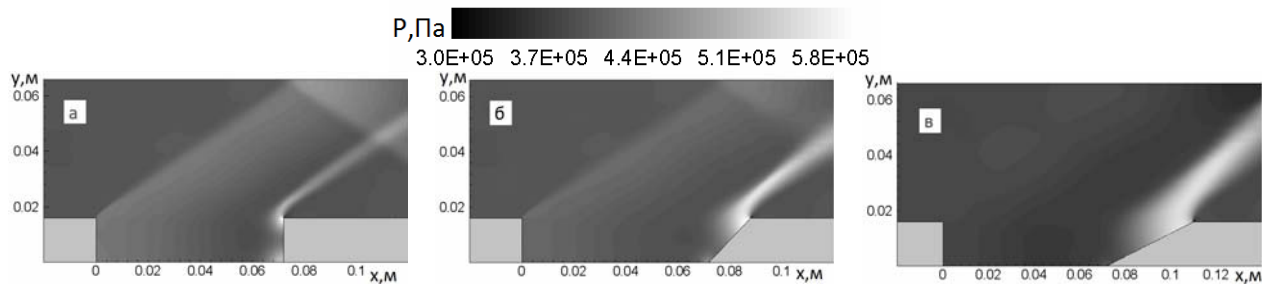


Рис. 16. Поля статического давления для: $\theta=90^\circ$ (а), 45° (б), 22.5° (в)

В §3 для $M_\infty=2.5$, $T_0=1800$ К, $P_0=30$ бар численно исследовано влияние масштабного фактора, то есть пропорционального изменения длины каверны L , глубины каверны h , высоты канала d и начальной толщины пограничного слоя δ (таблица 3). Эти данные являются важными с точки зрения возможности переноса результатов, полученных в аэродинамических трубах, на натурные размеры.

Таблица 3. Геометрические параметры.

№	d , мм	h , мм	L , мм	δ , мм	θ°	T_w , К
1	25	8	28.2	5	22.5	300
2	50	16	56.4	10		
3	100	32	112.8	20		

Результаты расчетов показали, что пропорциональное изменение геометрических размеров каверны не влияет на распределение статического давления на стенках. При изменении геометрических масштабов происходит изменение числа Рейнольдса, что приводит к изменению в распределении коэффициента трения.

В §4 численно исследовано влияние температуры стенки на параметры течений в канале с каверной. Для $M_\infty=2.5$ (рис. 17, а) при снижении температуры стенки наблюдалось монотонное снижение давления над каверной и рост интенсивности ударной волны в окрестности задней стенки каверны. Распределение статического давления на нижней стенке для $M_\infty=2$ (рис. 17, б) показывает, что с уменьшением температуры стенки увеличивается интенсивность ударной волны вблизи задней стенки. При этом зависимость от температуры немонотонна: кривая (3) для $T_w=1125$ К на дне каверны ($0 < x < 0.072$) лежит выше, а на задней наклонной стенке ($0.072 < x < 0.11$) - ниже кривой (4), соот-

ветствующей адиабатической стенке. Аналогичный эффект имеет место для распределения коэффициента поверхностного трения. Этот эффект связан с изменением характера течения в окрестности передней стенки. Для холодных температур в окрестности передней стенки наблюдалась волна разрежения, тогда как для условий адиабатической стенки появлялась слабая ударная волна.

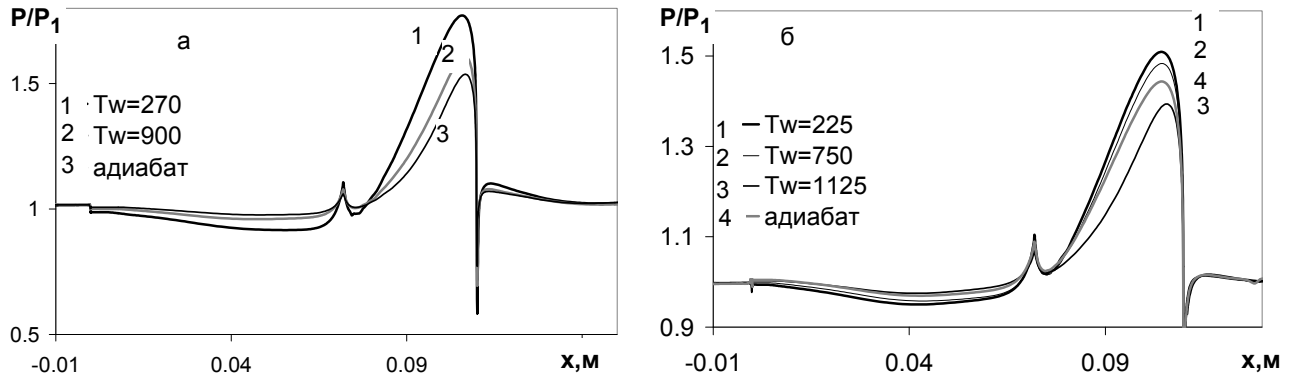


Рис. 17. Распределение давления на нижней стенке для $M_\infty=2.5$ (а), $M_\infty=2$ (б) для разных T_w

В §5 представлено сравнение результатов численного моделирования с экспериментом. Расчеты были проведены для конкретных условий экспериментов, выполненных в импульсной трубе ИТ-302М. Представленные на рис. 18, 19 распределения статического давления на стенках канала с каверной показывают хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.

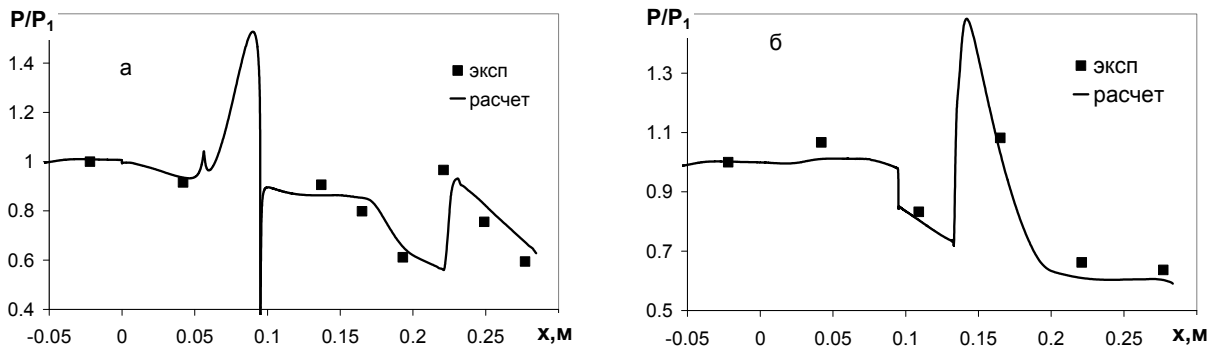


Рис. 18. Распределение давления на нижней стенке (а) и верхней стенке (б), $M_\infty=2$

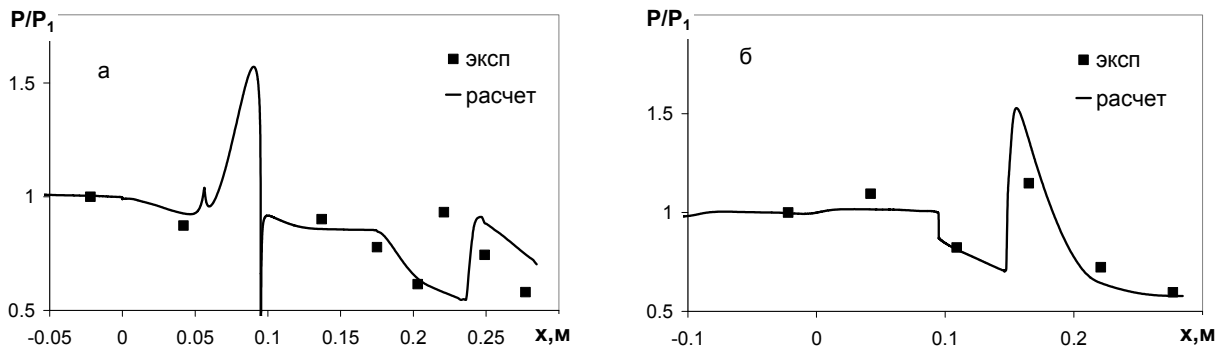


Рис.19. Распределение давления на нижней стенке (а) и верхней стенке (б), $M_\infty=2.33$

Кроме того, в этом параграфе приводятся результаты численного исследования влияния различных локальных возмущений (высту-

пов/уступов/ступенек), расположенных на стенках канала перед каверной. Показано, что наличие таких возмущений существенно перестраивает волновую картину течения по каналу и оказывает влияние на все параметры течения.

По результатам расчетов течений в канале с каверной получены различные режимы: закрытая каверна; открытая каверна с волной разрежения на передней кромке; открытая каверна с волной сжатия на передней кромке. Определены факторы, влияющие на переход от одного режима течения к другому: увеличение длины каверны, уменьшение угла отклонения задней стенки, увеличение числа Маха, снижение температуры стенки.

В заключении сформулированы основные выводы диссертации:

1. При числах Маха $M_\infty=2\div 4$ численно исследовано взаимодействие турбулентного пограничного слоя с последовательностью скачков уплотнения. Для адиабатических условий на стенке показано, что в случае отрывного течения на первом скачке способность пограничного слоя противостоять отрыву в области второго взаимодействия повышается. Для $M_\infty=2.8$ при высоких параметрах торможения ($P_0=45$ бар, $T_0=1700$ К) получено, что низкий температурный фактор сокращает размер отрыва на первом и втором взаимодействиях.

2. При $M_\infty=2\div 6$, $T_0=1200\div 3000$ К экспериментально и численно исследованы турбулентные течения в канале для трех различных конфигураций уступа (прямой 90° уступ, уступ с предварительным сжатием, уступ с предварительным расширением). Результаты расчетов для всех конфигураций удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными в высокоэнтампийной установке кратковременного действия ИТ-302М (ИТПМ СО РАН). Для всех конфигураций снижение температуры стенки в расчетах приводит к сокращению протяженности отрывной зоны; снижению статической температуры и уровня донного давления; перестройке вихревой структуры течения в отрывной зоне. Основными причинами подобных эффектов являются: снижение уровня статической температуры в отрывной зоне, а также уменьшение относительной толщины вытеснения пограничного слоя перед уступом.

3. Экспериментально и численно исследованы сверхзвуковые ($M_\infty=2\div 3$) высокоэнтампийные ($T_0=1500-2000$ К) турбулентные течения в канале с каверной. Впервые в расчетах получен стационарный режим течения типа открытой каверны с волной сжатия на передней кромке. Численно исследовано влияние различных факторов (геометрии каверны, числа Маха, масштабного и температурного фактора) на переход от одного режима течения к другому.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

1. Гольдфельд М.А., Захарова Ю.В., Федорова Н.Н. Исследование отрывных свойств турбулентного пограничного слоя при последовательном взаимодействии со скачками уплотнения различной интенсивности // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 3. С. 481-490.

2. Фалемпа Ф., Гольдфельд М.А., Семенова Ю.В., Старов А.В., Тимофеев К.Ю. Экспериментальные исследования различных методов регулирования сверхзвукового воздухозаборника // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 1. С. 1-10.
3. Захарова Ю.В., Бедарев И.А. Гольдфельд М.А., Захарова Ю.В., Федорова Н.Н. Исследование температурных полей в сверхзвуковом течении за обратным уступом // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 3. С. 375-386.
4. Федорова Н.Н., Бедарев И.А., Гольдфельд М.А., Захарова Ю.В., Федорченко И.А. Математическое моделирование высокоскоростных высокочастотных течений в каналах переменного сечения // Проблемы и достижения прикладной математики и механики: к 70-летию академика В.М. Фомина: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Параллель, 2010. С. 284-292.
5. Федоров А.В., Федорова Н.Н., Хмель Т.А., Бедарев И.А., Федорченко И.А., Кратова Ю.В., Захарова Ю.В. Математическое моделирование высокоскоростных течений гомогенных и гетерогенных смесей: монография; Новосиб. Гос. Архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин), 2010. – 170 с.
6. Semenova Yu. V., Goldfeld M.A., Starov A.V. Compressible boundary layer investigation for ramjet/scramjet inlets and nozzles // Proceedings of the Fifth European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles, 8-11 November 2004, Cologne, Germany (ESA SP-563, February, 2005). Noordwijk: ESA Publication Division, 2005. P. 547-551.
7. M.A.Goldfeld, N.N.Fedorova, Semenova Yu. V. Investigation of structure of turbulent boundary layer under action of large pressure gradients // Proceeding of the 8th International Symposium on Experimental and Computation Aerothermodynamics of Internal Flows, Lyon, 2-5 July 2007. Lyon: Laboratoire de Mecanique des Fluides, 2007. P. 103-113.
8. Fedorova N.N., Fedorchenko I.A., Semenova Y. V. Flow simulation of inlet components using URANS approach // Shock Waves. 26th International Symposium on Shock Waves. Goettingen, Germany July 15-20th 2007: Proceedings Vol. 2. Berlin et al: Springer, 2009. ISBN: 978-3-540-85180-6. P. 1261-1266.
9. Zakharova Yu.V., Goldfeld M.A., Starov A.V. Experimental Investigation of High-enthalpy flows over backward-facing step // Sixth European Symposium on Aerothermodynamics for space vehicles, 3-6 November, 2008: Proceedings. Versailles, France. Noordwijk: ESTEC, 2009. P. 230-237.
10. Zakharova Yu.V., Goldfeld M.A., Fedorova N.N., Fedorchenko I. Numerical simulation of mass flow supply processes in supersonic combustor // Sixth European Symposium on Aerothermodynamics for space vehicles, 3-6 November, 2008, Versailles, France: Proceedings. Noordwijk: ESTEC, 2009. P. 130-135.
11. Fedorova N.N., Bedarev I.A., Goldfeld M.A., Semenova Yu. V. Study of temperature factor effects on Supersonic Turbulent Flows over Backward Facing Steps // 2 European conference for aerospace sciences (EUCASS), Brussel, Belgium, July, 1-6, 2007: Book of abstracts. Brussel: VKI, 2007.

12. Goldfeld M.A., Fedorova N.N., Fedorchenko I.A., Zakharova Yu.V., Experimental and numerical investigation of high-enthalpy flows in a channel with gas supply // 27 International Symposium on Shock Waves, 19-24 July 2009, St. Petersburg, Russia: Book of Proceedings. Saint Petersburg: Ioffe Physical-Technical Institute, 2009. P. 93.
13. N.N. Fedorova, I.A. Fedorchenko, M.A. Goldfeld, Yu.V. Zakharova. Supersonic flows in channel of variable cross-section with mass supply // Proceedings of the XXXVIII Summer School – Conference Advanced Problems In Mechanics APM2010, St. Petersburg (Repino) July 1–5, 2010. St. Petersburg: Book of Abstracts. St. Petersburg: IPME RAS, 2010. P. 195-201.
14. Бедарев И.А., Кулинич Е.И., Семенова Ю.В., Федорова Н.Н. Влияние температурного фактора и формы кромки на структуру высокоэнthalпийных отрывных течений за прямым уступом // XXI Всероссийский семинар по струйным, отрывным и нестационарным течениям, Новосибирск, 15-18 августа, 2007: Тезисы. Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 2007. С.27-29.
15. Fedorova N.N., Goldfeld M.A., Semenova Yu. V. Investigation of turbulent boundary layer at successive influence of shock waves // Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research: Proc. Pt V. Novosibirsk, 2007. Novosibirsk: Parallel, 2007. P. 28-33.
16. Федорова Н.Н., Бедарев И.А., Гольдфельд М.А., Захарова Ю.В. Численное исследование температурных полей в сверхзвуковых течениях в канале с внезапным расширением // Тезисы Всероссийского семинара по аэродинамике, посвященного 90-летию со дня рождения С. В. Валландера. Санкт-Петербург, 5-7 февраля 2008 г. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский гос. ун., 2008. С. 115.
17. Fedorova N.N., Goldfeld M.A., Zakharova Yu. V. Flow investigation in combustor chamber with backward –facing step // Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research, June 30-July 6, 2008: Proc. P. II. Novosibirsk: Parallel, 2008. P.163-164.
18. Семенова Ю.В., Гольдфельд М.А., Фёдорова Н.Н. Структура турбулентного пограничного слоя под влиянием больших градиентов давления // Шестая Международная школа-семинар, «Модели и методы аэродинамики», Украина, Евпатория, 5–14 июня 2006: Тезисы докладов. Москва: Издательство Московского Центра непрерывного математического образования, 2006.
19. Захарова Ю.В., Гольдфельд М.А., Федорова Н.Н. Исследование температурных полей в сверхзвуковом течении за обратным уступом // Восьмая Международная школа-семинар «Модели и методы аэродинамики», Украина, Евпатория, 5–14 июня. 2008: Сборник докладов. Москва: Издательство Московского Центра непрерывного математического образования, 2008. С. 68-69
20. Семенова Ю.В., Нестуля Р.В. Database Technologies for Aerodynamic experiment results storage, processing, analysis and presentation // Intern. Conf.

21. Семенова Ю.В., Кулинич Е.И. Исследование развития турбулентного пограничного слоя при последовательном воздействии ударных волн // Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей: Тезисы докладов. Выпуск X. Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 2005. С. 154-157.
22. Семенова Ю.В., Нестуля Р.В. Программное обеспечение базы данных аэрофизических исследований ARROW // Международная конференция “Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений”: Тезисы докладов. Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 2004. С.490-492.
23. Семенова Ю.В., Нестуля Р.В. Использование баз данных для анализа результатов эксперимента // III Всероссийская конференция молодых ученых “Проблемы механики: теория, эксперимент, и новые технологии”: Тезисы докладов. Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 2004.

Ответственный за выпуск Ю.В. Захарова

Подписано в печать 27.05.2011
Формат бумаги 60×84/16, Усл. печ. л. 1.0,
Уч.-изд. л. 1.0, Тираж 100 экз., Заказ № 9

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