

На правах рукописи



Колесник Елизавета Владимировна

**Вязко-невязкое взаимодействие в трехмерных течениях с
подковообразными вихревыми структурами:
численное моделирование**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Научный руководитель:

Смирнов Евгений Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Официальные оппоненты:

Егоров Иван Владимирович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор, главный научный сотрудник НИО-8, Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», город Москва

Карпенко Антон Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Гидроаэромеханики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», город Санкт-Петербург

Ведущая организация:

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр **Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша** Российской академии наук», город Москва

Защита диссертации состоится 29 марта 2021 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета У.01.02.05 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, корпус 1, 3-й этаж, ауд. 348-8.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте www.spbstu.ru/science.

Автореферат разослан «25» февраля 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.01.02.05
кандидат физико-математических наук



Гусева Екатерина Константиновна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Исследования и инженерный анализ сложных течений вязкого газа методами численного моделирования приобретают в настоящее время все большую важность и распространенность, так как позволяют существенно снизить объем дорогостоящих экспериментов и получить детальную информацию о структуре и особенностях, присущих конкретному потоку. В частности, для решения многих задач в области аэрокосмической техники и энергомашиностроения чрезвычайно актуальным является применение методов численного моделирования транс- и сверхзвуковых течений.

На практике часто встречаются задачи, которые требуют детальных знаний об особенностях обтекания сверхзвуковым потоком вязкого газа какого-либо препятствия, установленного на обтекаемой поверхности. Течения в такого рода конфигурациях являются, как правило, существенно трехмерными и им присущи сложные, не до конца изученные явления вязко-невязкого взаимодействия: формирование системы скачков и волн уплотнения, вид которой зависит не только от геометрии обтекаемого препятствия, но и от параметров пограничного слоя в набегающем потоке; образование перед препятствием отрывной области с системой подковообразных вихрей; высокая неоднородность локального теплообмена и т.д.

Для достоверного моделирования таких течений необходимы численные методы, обеспечивающие достаточно точное разрешение всех специфических особенностей, обусловленных вязко-невязким взаимодействием трехмерного характера. При этом создание собственного программного обеспечения (ПО) требуемого уровня позволяет не только снизить затраты на проведение расчетов, уходя от использования коммерческого ПО, но и, что особенно важно для организаций исследовательского профиля, дает возможность реализовывать и апробировать оригинальные алгоритмы, численные схемы и замыкающие модели, обеспечивающие высокое качество и эффективность численного моделирования.

Цели и задачи исследования

Целью настоящей работы является исследование газодинамики и теплообмена в трехмерных течениях с подковообразными вихревыми структурами на основе авторской программной реализации совокупности современных численных методов для расчета сжимаемых (до-, транс- и сверхзвуковых) течений вязкого газа.

Задачи диссертационной работы, отвечающие поставленной цели, состоят в следующем:

1. Обзор существующих численных методов для расчета сжимаемых течений на неструктурированных сетках и отбор успешно апробированных в литературе схем для реализации в исследовательском программном коде широкого назначения.

2. Реализация на базе разрабатываемого в СПбПУ неструктурированного конечно-объемного программного кода SINF/Flag-S численного метода, который позволяет проводить расчеты течений вязкого газа в широком диапазоне чисел Маха на основе единого подхода.

3. Верификация и валидация реализованных в программном коде численных методов. Проведение сопоставительных расчетов, тестирование и оценка работоспособности реализованных методов.

4. Обзор представленных в литературе работ по исследованию явлений вязко-невязкого взаимодействия в трехмерных течениях с подковообразными вихревыми структурами.

5. Численное исследование влияния сжимаемости среды на структуру потока и локальный теплообмен при турбулентном дозвуковом обтекании установленного на пластине затупленного тела. Проверка соответствия решения, рассчитываемого по разработанному алгоритму при очень малых значениях числа Маха, результатам вычислений по алгоритму, ранее реализованному в коде для расчетов течений несжимаемой жидкости.

6. Отработка методики численного исследования явлений вязко-невязкого взаимодействия на примере задачи сверхзвукового обтекания области сопряжения затупленного ребра и пластины, тестирование различных схем аппроксимации конвективных потоков и способов повышения порядка точности.

7. Численное исследование ламинарного обтекания вязким газом области сопряжения затупленного ребра и пластины при варьировании определяющих параметров задачи (числа Рейнольдса, числа Маха, температурного фактора, толщины пограничного слоя на пластине). Исследование вопросов перехода от стационарных режимов течения к нестационарным автоколебательным режимам при увеличении числа Рейнольдса.

8. Численное моделирование турбулентного режима обтекания установленного на пластине затупленного ребра на основе RANS подхода с применением одно- и двухпараметрических моделей турбулентности.

Научная новизна

На основе единого конечно-объемного подхода, используемого в коде SINF/Flag-S, проведено систематическое тестирование различных схем повышенного порядка точности, предложенных в литературе для расчета существенно сжимаемых течений на неструктурированных сетках, и получен большой объем новых данных о работоспособности этих схем на сетках с различным типом сеточных элементов.

Для задачи о дозвуковом турбулентном течении и теплообмене вблизи установленного на пластине затупленного тела, в виде цилиндра с обтекателем, получены новые данные о влиянии сжимаемости среды на структуру потока и локальный теплообмен, а также данные о влиянии типа термического граничного условия на пластине. Для случая несжимаемой среды впервые количественно определено влияние числа Прандтля на характеристики теплообмена, интенсифицируемого подковообразными вихревыми структурами, которые формируются вблизи обтекаемого тела.

На примере задачи о сверхзвуковом стационарном ламинарном обтекании области сопряжения затупленного ребра и пластины рассмотрены вопросы чувствительности предсказываемых характеристик трехмерного вязко-невязкого взаимодействия к выбору той или иной численной схемы второго порядка точности и сеточному разрешению. В результате многовариантных расчетов получены и систематизированы уточненные данные о

газодинамической структуре потока, протяженности передней области отрыва пограничного слоя и характеристиках локального теплообмена при различных наборах значений определяющих безразмерных параметров задачи.

Впервые установлено, что в некотором интервале значений числа Рейнольдса существуют два устойчивых стационарных решения задачи о сверхзвуковом ламинарном обтекании области сопряжения затупленного ребра и пластины. Эти решения отвечают различным метастабильным состояниям потока и, в основном, различаются по числу вихрей, формирующихся в передней отрывной зоне, и протяженности последней. Показано также, что с ростом числа Рейнольдса выявленные метастабильные решения приобретают автоколебательный характер. Получены новые данные о возникающих нестационарных тепловых и динамических нагрузках и их частотных характеристиках.

На основе RANS подхода, с применением одно- и двухпараметрических моделей турбулентности, проведены расчеты трехмерного обтекания установленного на пластине затупленного ребра сверхзвуковым потоком с турбулентным пограничным слоем. Получены новые данные о влиянии сеточного разрешения и модели турбулентности на предсказываемую динамическую картину вязко-невязкого взаимодействия в сопоставлении с представленными в литературе результатами измерений.

Практическая значимость

Существенно расширены возможности развиваемого в СПбПУ неструктурированного конечно-объемного гидродинамического кода SINF/Flag-S. Это достигнуто благодаря разработке автором комплекса программных модулей, в которых реализованы современные численные методики расчета сжимаемых течений, включая различные способы повышения порядка точности при работе с неструктурированными сетками.

Представленные в работе результаты методических исследований по оценке работоспособности различных схем и сеточной чувствительности численных решений сложных задач динамики вязкого газа могут быть полезны другим исследователям и инженерам, нацеленным на повышение качества трехмерных газодинамических расчетов с использованием неструктурированных сеток.

Полученные с использованием расширенной версии кода SINF/Flag-S численные решения уточняют представления о спектре газодинамических и теплообменных процессов, характерных для вязко-невязкого взаимодействия в трехмерных течениях с подковообразными вихревыми структурами. Глубокое понимание специфики данного класса течений важно, в частности, для дальнейшего совершенствования конструктивных элементов высокоскоростных летательных аппаратов и проточных частей газовых турбин и компрессоров.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Тема диссертации соответствует четырем пунктам паспорта специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы для физико-математических наук, а именно: п. 3. Ламинарные и турбулентные течения; п. 4. Течения сжимаемых сред и ударные волны; п. 15. Тепломассоперенос в газах и жидкостях; п. 18. Аналитические, асимптотические и

численные методы исследования уравнений кинетических и континуальных моделей однородных и многофазных сред (конечно-разностные, спектральные, методы конечного объема, методы прямого моделирования и др.).

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты систематического тестирования многочисленных вариантов схем повышенного порядка точности, предложенных в литературе для расчета существенно сжимаемых течений на неструктурированных сетках.
2. Расчетные данные по влиянию числа Прандтля и сжимаемости среды на локальный теплообмен и вихревую структуру в отрывной зоне, формирующейся при дозвуковом турбулентном обтекании тела с затупленной передней кромкой.
3. Данные методического характера о чувствительности предсказываемых характеристик сверхзвукового обтекания области сопряжения затупленного ребра и пластины к выбору той или иной численной схемы второго порядка точности и сеточному разрешению.
4. Результаты многовариантных расчетов сверхзвукового стационарного ламинарного обтекания области сопряжения затупленного ребра и изотермической пластины при различных наборах значений определяющих безразмерных параметров задачи; уточненные данные о влиянии определяющих параметров на газодинамическую структуру потока, протяженность передней отрывной зоны и характеристики локального теплообмена.
5. Результаты, свидетельствующие о возможной двойственности численного решения в задаче ламинарного обтекания сверхзвуковым потоком установленного на пластине трехмерного препятствия. Бифуркационные диаграммы, построенные для задачи стационарного обтекания затупленного ребра, и оценка критического значения числа Рейнольдса, при превышении которого существуют два метастабильных решения.
6. Данные численного моделирования нестационарных автоколебательных режимов обтекания сверхзвуковым потоком установленного на пластине затупленного ребра для условий, отвечающим существованию двойственного решения. Оценка значений числа Рейнольдса, при которых происходит переход к нестационарным режимам течения для двух решений.
7. Результаты RANS моделирования трехмерного обтекания установленного на пластине затупленного ребра сверхзвуковым потоком с турбулентным пограничным слоем. Данные методического характера о влиянии сеточного разрешения на предсказываемую динамическую картину вязко-невязкого взаимодействия и рекомендации по обеспечению высококачественного разрешения вязких эффектов и сложной ударно-волновой картины течения.

Достоверность полученных результатов

Все расчеты проведены с использованием разрабатываемого в СПбПУ программного кода SINF/Flag-S, который в настоящее время рассматривается как надежный вычислительный код для решения задач гидродинамики и широко применяется для расчетов течения и теплообмена в случае несжимаемой жидкости.

Для расширенной автором версии кода SINF/Flag-S проведена детальная верификация разработанных программных модулей, обеспечивающих возможность расчета существенно сжимаемых течений. Верификация проведена как при численном решении ряда относительно простых тестовых задач, в сопоставлении с известными аналитическими решениями, так и посредством сопоставления решений для нескольких вариантов трехмерных задач с имеющимися в литературе расчетными данными. Дополнительно, при решении одной из сложных задач было проверено, что решение, рассчитанное по разработанному алгоритму при очень малых значениях числа Маха, с высокой степенью точности соответствует результатам вычислений по алгоритму, ранее реализованному в коде для расчетов течений несжимаемой жидкости.

Сопоставление полученных в работе численных решений для отдельных постановок трехмерных задач с имеющимися экспериментальными данными показало хорошую согласованность результатов.

Апробация работы

Результаты работы были представлены на российских и международных конференциях и семинарах:

- Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург, 2017; Москва, 2019);
- Всероссийская конференция по аэрогидродинамике, посвященная 100-летию со дня рождения Сергея Васильевича Валландера (Санкт-Петербург, 2017);
- Международная конференция Физика.СПб (Санкт-Петербург, 2017, 2019, 2020);
- Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург 2017, 2018, 2019);
- XXV Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям (Санкт-Петербург, 2018);
- Профессиональный слёт разработчиков отечественных CFD кодов «Отечественные CFD коды» (CFD Weekend), ИПМ им. М.И.Келдыша (Москва, 2018, 2019, 2020);
- XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019);
- The 5th ECCOMAS Young Investigators Conference YIC2019 (Krakow, Poland, 2019);
- Всероссийская научная конференция с международным участием XI Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике (Санкт-Петербург, 2019);
- Доклад на видеосеминаре по аэромеханике ЦАГИ – ИТПМ СО РАН – СПбПУ – НИИМ МГУ (Санкт-Петербург, 2019);
- XX Международная конференция по методам аэрофизических исследований ISMAR 2020 (Новосибирск, 2020).

Публикации по теме диссертации и личный вклад автора

Основные результаты исследований отражены в 10 публикациях, в том числе 5 публикаций в рецензируемых журналах из перечня ВАК, 8 публикаций индексируемых в базах Scopus и Web of Science.

Автором существенно расширены возможности развиваемого в СПбПУ неструктурированного конечно-объемного гидродинамического кода SINF/Flag-S благодаря разработке комплекса программных модулей, в которых реализованы современные численные методики расчета сжимаемых течений, включая различные способы повышения порядка точности при работе с неструктурированными сетками. Все представленные в диссертации расчеты исследовательского и методического характера выполнены и обработаны лично автором; анализ полученных расчетных данных проводился совместно с научным руководителем.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, 3 приложений, списка литературы, состоящего из 189 наименований. Работа изложена на 193 страницах машинописного текста, включая 102 рисунка и 8 таблиц.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационного исследования, сформулирована цель исследования и перечислены основные задачи, решавшиеся для достижения заданной цели, определена научная новизна диссертационного исследования и его практическая значимость, дано обоснование достоверности результатов и сведения по их представлению на научных мероприятиях.

В **первой главе** дан обзор литературы, состоящий из двух частей. Первая часть (**параграф 1.1**) содержит обзор численных методов, применяемых для расчета сжимаемых течений, особое внимание уделяется методам повышения порядка точности при работе с неструктурированными сетками. Вторая часть (**параграф 1.2**) содержит обзор работ, в которых изучаются явления вязко-невязкого взаимодействия в трехмерных течениях с подковообразными вихревыми структурами.

Вторая глава посвящена описанию математической модели и численного метода, реализованного в коде SINF/Flag-S для расчета сжимаемых течений. Приведены уравнения, описывающие течения вязкого газа (**параграф 2.1**). Описаны основные положения метода конечных объемов (**параграф 2.2**), способы вычисления потоков на гранях контрольного объема (**параграф 2.3**), включая особенности вычисления потоков на граничных гранях. Дополнительная информация и описание схем аппроксимации конвективных потоков приведены в **приложениях 1 и 3**.

Рассмотрены предложенные в литературе подходы к построению схем второго порядка точности с применением ограничителей для обеспечения монотонности решения при работе с неструктурированными сетками (**параграф 2.4**). Приведены детали реализации двух основных

подходов (рис. 1): квазиодномерного подхода, связанного с локальным выделением для каждой грани некоего подходящего направления, и так называемого «скалярного» подхода, согласно которому значение единого для расчетной ячейки скалярного ограничителя вычисляется с использованием информации в соседних ячейках. Даны полные формулировки нескольких квазиодномерных схем и схем со скалярными ограничителями.

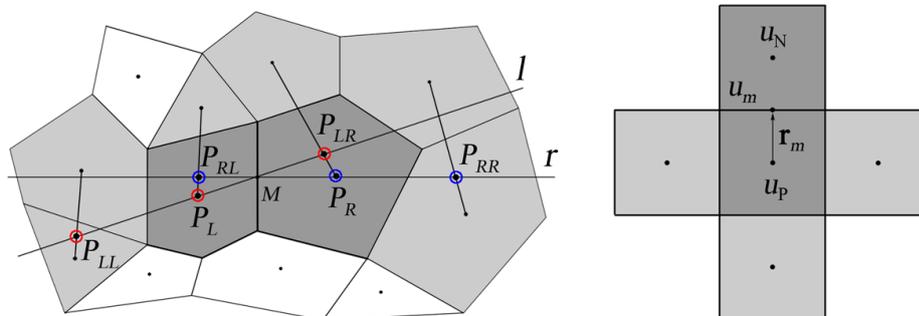


Рис. 1. Схема к восстановлению «опорных» точек для квазиодномерного подхода (слева) и шаблон для расчета скалярного ограничителя по одной из методик (справа)

Описаны два способа подавления ударно-волновой («карбункул») неустойчивости (**параграф 2.5**), которая может наблюдаться при расчете сверхзвуковых (в особенности, гиперзвуковых) течений.

Изложен алгоритм решения стационарных задач с использованием метода установления по неявной схеме «в приращениях» и его применение для расчетов нестационарных течений на основе неявной трехслойной схемы продвижения по физическому времени (**параграф 2.6**). Описан метод регуляризации (по Туркелу) системы уравнений динамики сжимаемого газа, применяемый для преодоления «жесткости» системы, которая возникает при существенно дозвуковых скоростях потока (**параграф 2.7**). Приведена формулировка метода Вейса и Смита для расчета вектора невязки потоков, заключающегося в регуляризации системы уравнений на основе метода Туркела совместно с модификацией схемы Роу для случая малых чисел Маха. **Приложение 2** содержит дополнительные выкладки для системы, регуляризованной с использованием метода Туркела.

Приведены детали программной реализации описанных численных схем и алгоритма метода установления на базе неструктурированного кода SINF/Flag-S, разрабатываемого в СПбПУ (**параграф 2.8**).

Третья глава содержит результаты верификации разработанной версии кода при численном решении ряда относительно простых тестовых задач, включая сопоставление с аналитическими решениями. Рассмотрен ряд невязких задач (рис. 2, 3): трансзвуковое обтекание профиля NASA-0012 (**параграф 3.2**), сверхзвуковое течение в канале с центральным клином (**параграф 3.3**). Для этих задач проводится детальное тестирование различных вариантов квазиодномерного и скалярного подходов при повышении порядка точности схемы, а также анализируется влияние вида ограничителей, для расчета используются сетки с различным типом сеточных элементов (рис. 2). Специальное внимание уделено анализу влияния на решение способа реконструкции давления на непроницаемых границах расчетной области (рис. 4). На

задаче гиперзвукового обтекания цилиндра проводится тестирование схем аппроксимации конвективных потоков и методов подавления «карбункул»-неустойчивости (параграф 3.4). В целях верификации модулей кода, требующихся при расчете течений вязкого газа, рассматривается задача о развитии пограничного слоя на плоской пластине, обтекаемой сверхзвуковым потоком (параграф 3.5), а также течение через решетку профилей сверхзвукового осевого компрессора (параграф 3.6). Результаты сопоставляются с известными аналитическими зависимостями и с экспериментальными данными.

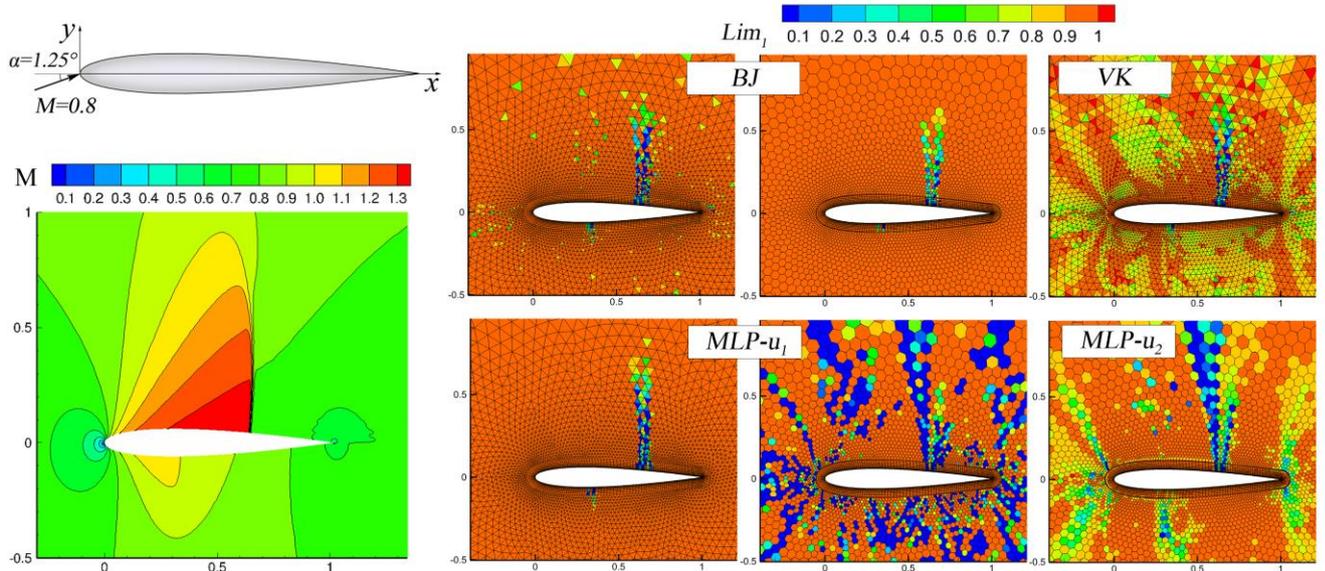


Рис. 2. Схема к задаче обтекания профиля NASA-0012, поле числа Маха и поля значений различных скалярных ограничителей при расчетах с различным типом сеточных элементов

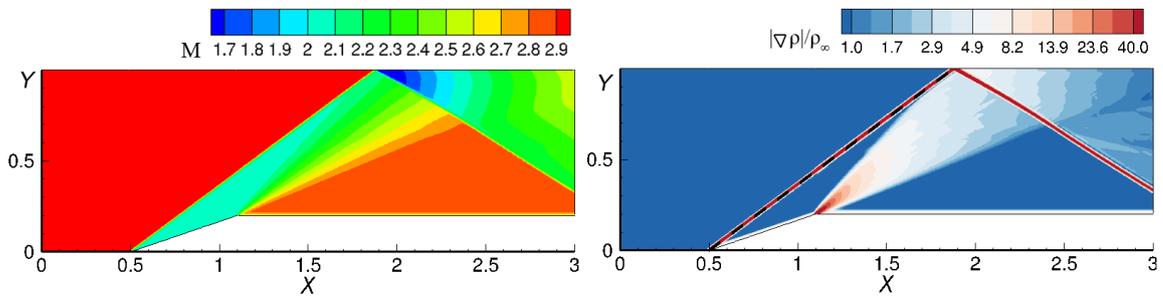


Рис. 3. Сверхзвуковое течение в канале с центральным клином: поле числа Маха (слева) и поле модуля градиента плотности (справа)

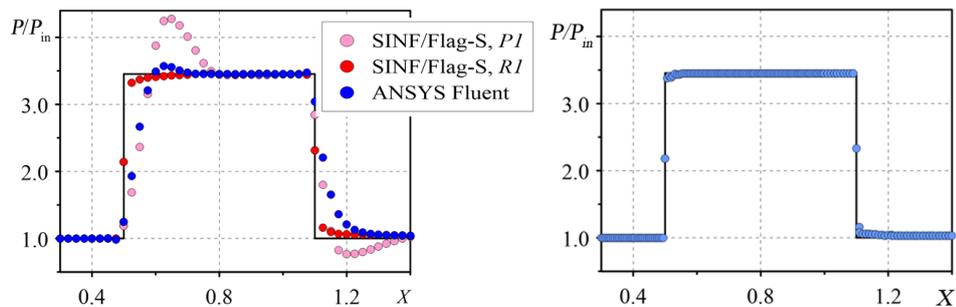


Рис. 4. Распределение давления вдоль нижней стенки канала с центральным клином: результаты расчетов на грубой сетке с использованием различных граничных условий (слева) и данные, полученные на мелкой сетке (справа)

В четвертой главе представлены результаты численного исследования структуры потока и теплообмена при турбулентном дозвуковом обтекании установленного на пластине тела с затупленной передней кромкой (рис. 5). В параграфе 4.1 дан обзор работ, посвященных моделированию дозвукового течения в конфигурациях данного вида. В параграфе 4.2 описаны детали постановки задачи и вычислительные аспекты для проведения серии расчетов данной направленности на основе системы RANS уравнений с $k-\omega$ SST моделью турбулентности.

В параграфе 4.3 описываются характерные особенности вихревой структуры в отрывной зоне, формирующейся перед затупленным телом и заполненной системой подковообразных вихрей (рис. 5). Излагаются результаты исследования вопросов чувствительности решения к сеточному разрешению; показано, что результаты, полученные в расчетах на достаточно подробной сетке, находятся в хорошем соответствии с известными из литературы экспериментальными (Praisner&Smith, J. Turbomach., V.128, 2006) и расчетными данными (рис. 6). В параграфе 4.4 для случая несжимаемой среды приведены данные по влиянию числа Прандтля (изменялось от 0.7 до 10) на характеристики теплообмена, интенсифицируемого подковообразными вихревыми структурами. Показано, что при сохранении схожести картин локального теплообмена с ростом числа Прандтля пиковые значения нормированного числа Стэнтона увеличиваются.

В параграфе 4.5 приводятся данные, показывающие, что решение, рассчитанное по разработанному алгоритму при очень малых значениях числа Маха, с высокой степенью точности соответствует результатам вычислений по алгоритму, ранее реализованному в коде SINF/Flag-S для расчетов течений несжимаемой жидкости. Оценено влияние на характеристики теплообмена типа термического граничного условия на пластине (постоянный тепловой поток или изотермическая пластина). В параграфе 4.6 приведены данные о влиянии сжимаемости среды на структуру потока и локальный теплообмен вблизи области сопряжения (рис. 6), число Маха варьировалось в диапазоне от 0.01 до 0.5. Показано, что заметное влияние сжимаемости среды сказывается при $M > 0.3$: размер подковообразных вихрей заметно увеличивается, и вихри несколько удаляются от обтекаемого тела.

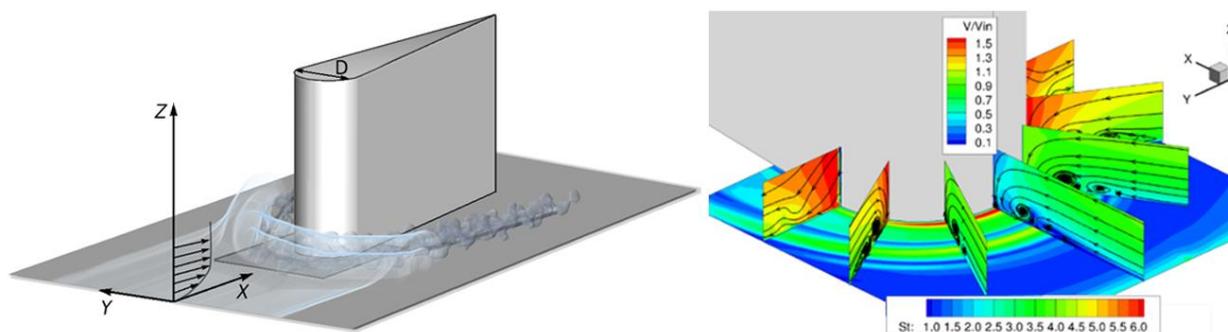


Рис. 5. Схема обтекания установленного на пластине затупленного тела и структура течения с подковообразными вихревыми структурами

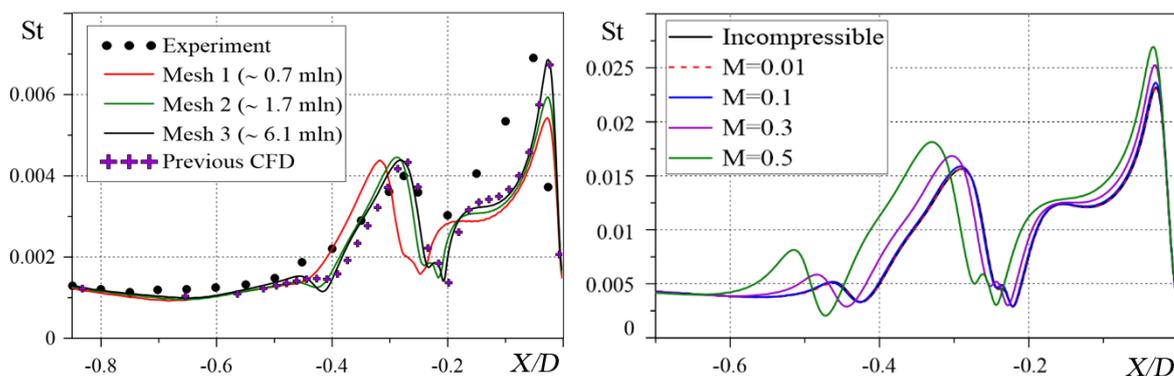


Рис. 6. Распределение числа Стэнтона вдоль линии симметрии на пластине: результаты вычислений на нескольких сетках в сопоставлении с экспериментом (слева) и расчетные данные, полученные при варьировании числа Маха (справа)

Пятая глава посвящена численному исследованию вязко-невязкого взаимодействия, возникающего при сверхзвуковом ламинарном обтекании области сопряжения затупленного ребра и пластины (рис. 7). Аналогично предыдущей главе, сначала (**параграф 5.1**) дан краткий обзор работ, посвященных численному моделированию течения в данной конфигурации, далее (**параграф 5.2**) описаны детали постановки задачи и отдельные вычислительные аспекты.

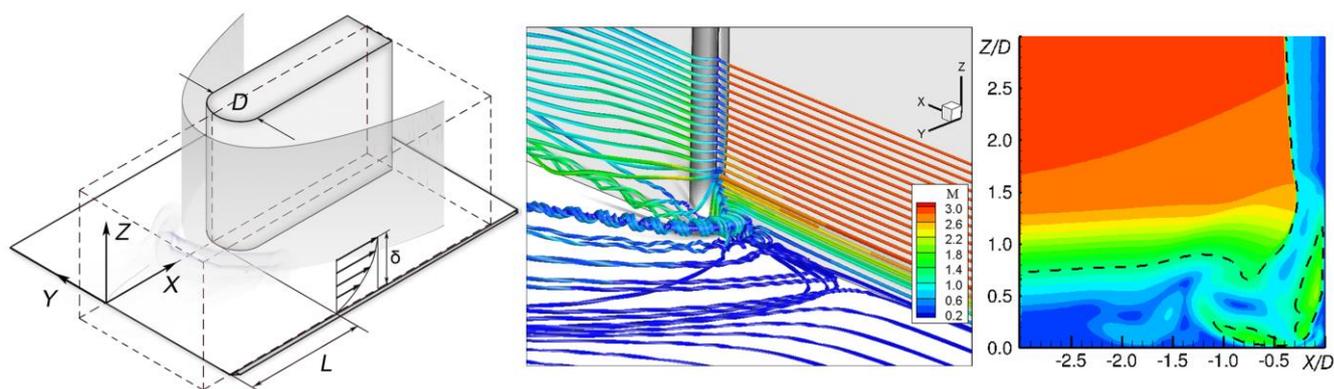


Рис. 7. Схема сверхзвукового обтекания установленного на пластине затупленного ребра, иллюстрация трехмерной структуры течения и поле числа Маха в плоскости симметрии

В **параграфе 5.3** для частной по параметрам задачи дан анализ структуры существенно трехмерного потока, которая включает протяженную отрывную область, содержащую систему подковообразных вихрей, а также область сложного ударно-волнового взаимодействия. Рассмотрены вопросы чувствительности предсказываемых характеристик к выбору той или иной численной схемы второго порядка точности и сеточному разрешению.

В **параграфе 5.4** представлены результаты многовариантных расчетов сверхзвукового стационарного ламинарного обтекания области сопряжения затупленного ребра и изотермической пластины при различных наборах значений определяющих безразмерных параметров задачи (числа Рейнольдса, числа Маха, температурного фактора, толщины пограничного слоя на пластине). Показано, что сложная структура потока перед обтекаемым телом приводит к возникновению нескольких зон повышенной теплоотдачи (рис. 8). Получены и систематизированы уточненные данные о влиянии определяющих параметров на газодинамическую структуру потока, протяженность передней отрывной зоны и характеристики

локального теплообмена. Выделены аналогичные тенденции, которые имеют место при следующих изменениях определяющих параметров: при увеличении числа Рейнольдса, при уменьшении числа Маха, при уменьшении температурного фактора. Во всех этих случаях длина отрывной области увеличивается, основной подковообразный вихрь отодвигается дальше от тела, при этом сама отрывная область становится тоньше, то есть больше «прижимается» к поверхности пластины, и в результате уменьшается высота расположения тройной точки. На рис. 8 показана обобщенная схема течения, представительные характеристики течения, рассчитанные при разных наборах определяющих параметров, приведены в таблице 1.

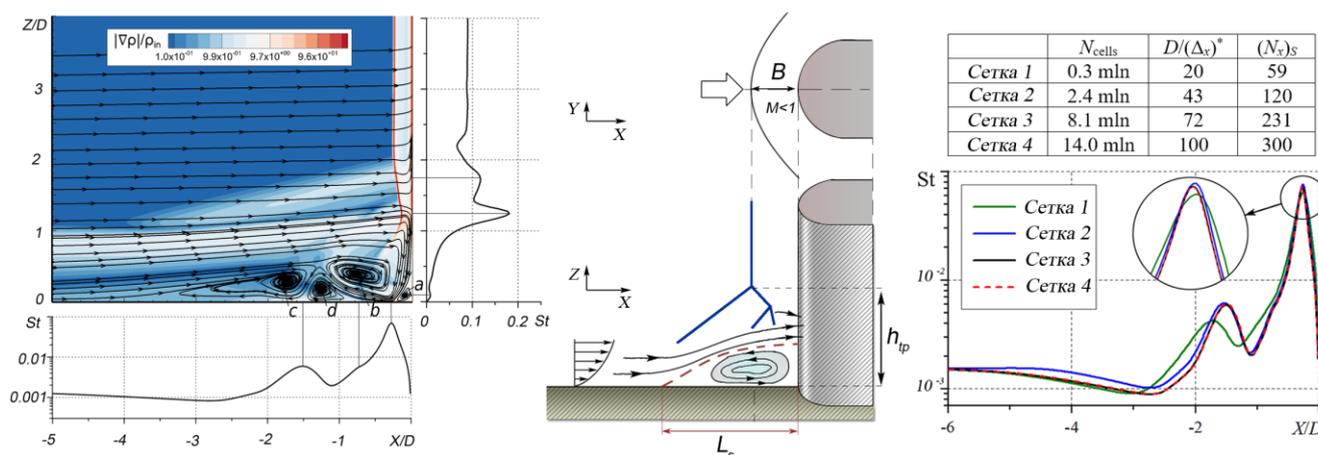


Рис. 8. Картина течения в плоскости симметрии в комбинации с распределениями числа Стэнтона вдоль поверхности тела и пластины, иллюстрация обобщенной структуры течения и влияния сеточного разрешения на распределение числа Стэнтона на пластине

Таблица 1. Параметры постановки и характеристики течения, рассчитанные при разных наборах определяющих параметров

M	5	5	5	5	4	6	5	5	5	5
Re _D	2000	4000	8000	12000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
L/D	30	30	30	30	30	30	12	50	30	30
T _w /T _∞	2.59	2.59	2.59	2.59	1.84	3.51	2.59	2.59	1.5	4
B/D	0.258	0.252	0.246	0.242	0.276	0.24	0.252	0.252	0.246	0.258
δ/D	1.36	0.98	0.68	0.55	0.71	1.29	0.63	1.26	0.766	1.23
h _{tp} /D	1.92	1.8	1.79	1.75	1.88	1.9	1.3	2.1	1.6	2.12
L _s /D	3.44	4.06	4.95	5.28	4.31	3.91	3.22	4.45	4.05	4.18
N _{vortex}	3	4	6	7	5	4	4	4	4	4

Шестая глава содержит результаты серии расчетов для конфигурации, соответствующей расчетно-экспериментальной работе Tutty et al (JFM, V.737, 2013), в которой исследовалось сверхзвуковое ламинарное обтекание области сопряжения затупленного ребра и изотермической пластины при числе Маха набегающего потока $M = 6.7$ и различных числах Рейнольдса Re_D . Аналогично предыдущим главам, сначала (**параграфы 6.1, 6.2**) приведен краткий обзор работ и детали постановки задачи.

В **параграфе 6.3** представлены результаты расчетов валидационного характера для наименьшего значения числа Рейнольдса ($Re_D = 1.25 \cdot 10^4$), которое отвечает реализации строго стационарного режима течения. Одно из численных решений, полученных в диссертационной

работе для этого значения Re_D хорошо согласуется с экспериментальными и расчетными данными Tutty et al (2013) (рис. 9). Вместе с тем, установлено, что для данного, частного значения Re_D существует два устойчивых стационарных решения, которые отвечают двум метастабильным состояниям потока с различной конфигурацией вихревой структуры в отрывной области (рис. 10). Первое («основное») решение характеризуется более протяженной отрывной областью, центр основного подковообразного вихря расположен дальше от передней кромки тела; во втором решении отрывная область более короткая, центр основного подковообразного вихря расположен почти в два раза ближе к обтекаемому телу. Оба решения сохраняют устойчивость при измельчении сетки (рис. 9) и при расчетах в полной постановке без наложения условия симметрии.

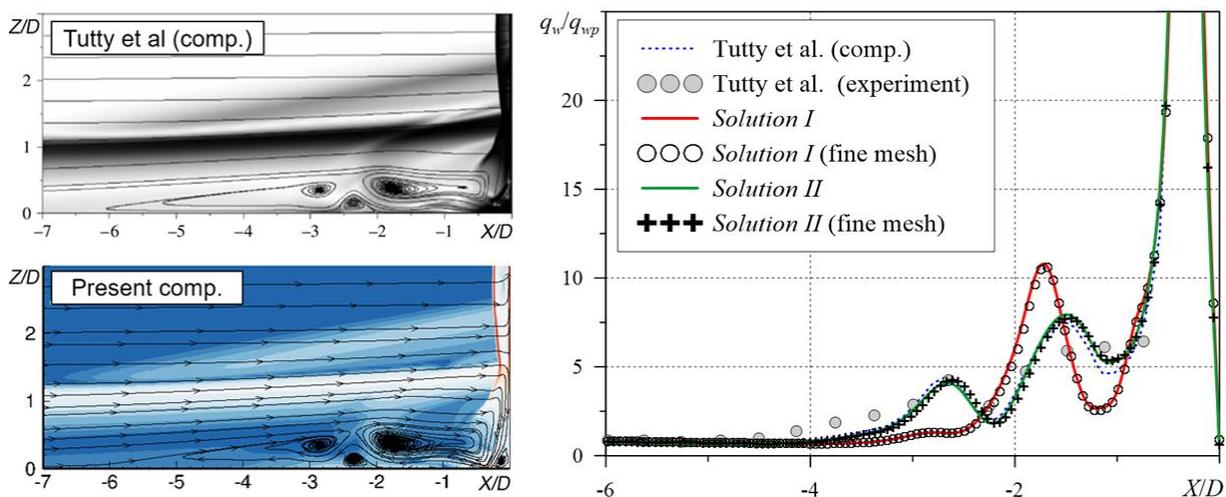


Рис. 9. Рассчитанная при $Re_D = 1.25 \cdot 10^4$ картина течения в плоскости симметрии (слева) и локальные значения нормированного теплового потока (справа) в сопоставлении с данными из работы Tutty et al (2003)

В параграфе 6.4 представлены результаты расчетов, нацеленных на более полное исследование вопросов двойственности численного решения. Проводились расчеты с «продолжением по параметру», в которых менялся диаметр затупленного ребра (охвачен диапазон изменений числа Рейнольдса от $5.0 \cdot 10^3$ до $2.0 \cdot 10^4$, включающий стационарные и нестационарные режимы течения). Построены бифуркационные диаграммы, показывающие, что первое решение с увеличением числа Рейнольдса меняется эволюционно, а второе решение, по-видимому, является изолированным решением; оценено критическое значение числа Рейнольдса ($Re_{D, crit.} \approx 9.25 \cdot 10^3$), при превышении которого возникает второе решение. Дан анализ отличительных особенностей двух решений, эволюционирующих с ростом числа Рейнольдса. Исследованы изменения в локальной теплоотдаче, обусловленные ростом числа Рейнольдса, и отмечены характерные особенности распределений теплового потока для решений двух типов (рис. 11). Показано, что в случае малого числа Рейнольдса решение содержит один локальный максимум теплового потока, при увеличении числа Рейнольдса вихревая структура перед обтекаемым телом усложняется: для первого решения характерно наличие двух локальных максимумов (помимо главного максимума), для второго изолированного решения наблюдается один локальный максимум.

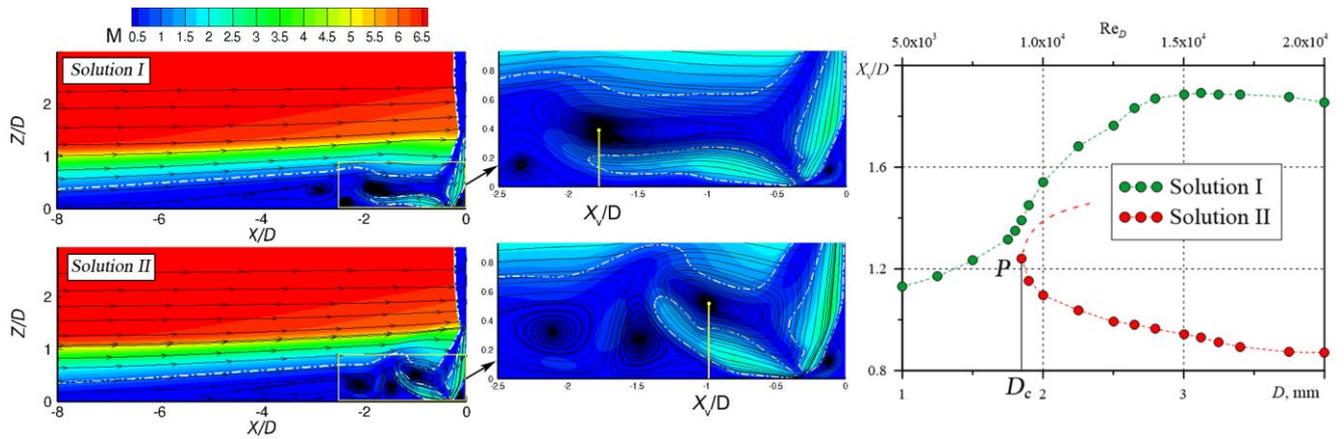


Рис. 10. Поля локального числа Маха и линии тока в плоскости симметрии для Solution I и Solution II при $Re_D = 1.25 \cdot 10^4$; бифуркационная диаграмма, показывающая положение центра основного подковообразного вихря

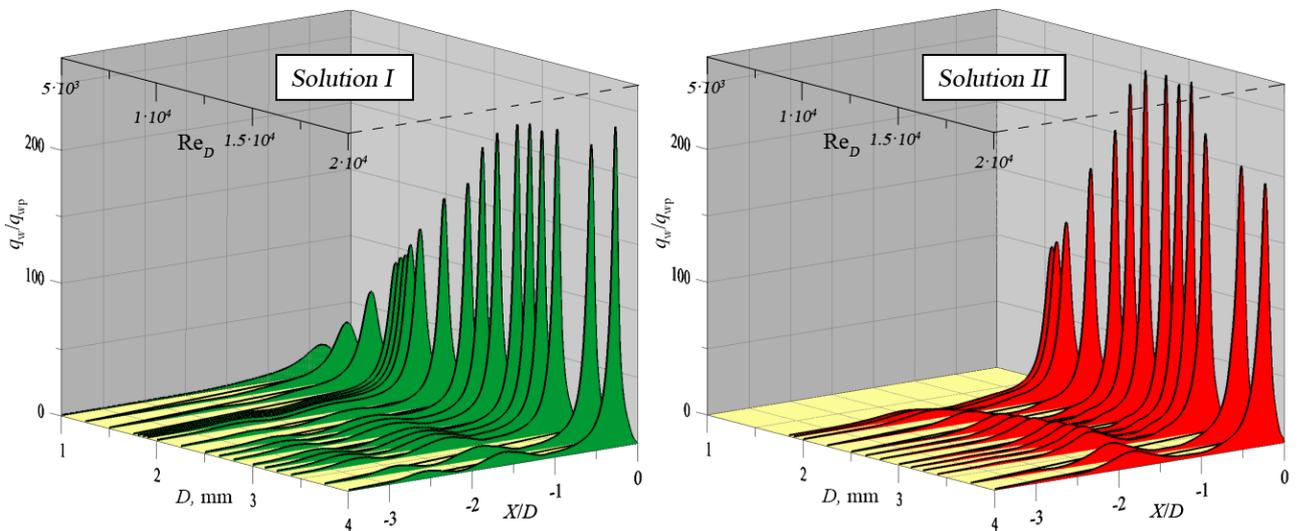


Рис. 11. Распределение теплового потока вдоль линии симметрии для различных диаметров (значений числа Рейнольдса)

На основе бифуркационных диаграмм (рис. 12), показывающих изменение значения теплового потока в отдельных точках на пластине (средние значения и амплитуда пульсаций), оценены значения числа Рейнольдса, при которых происходит переход к нестационарным режимам течения. В параграфе 6.5 представлены результаты расчетов автоколебательных режимов течения. В случае первого решения амплитуда пульсаций с ростом числа Рейнольдса нарастает постепенно, при этом спектр колебаний линейчатый и содержит только кратные гармоники основной частоты; в случае второго решения наблюдается переход с «жестким» возбуждением сложных многочастотных колебаний. Поля пульсаций теплового потока на пластине (рис. 13), построенные для двух решений, показывают, что наиболее интенсивные пульсации наблюдаются в области, где отошедший скачок уплотнения изгибается в сторону обтекаемого тела за счет взаимодействия с косыми волнами уплотнения, также интенсивные пульсации наблюдаются внутри областей сверхзвукового течения в отрывной области. Во всех областях, где присутствуют колебания, интенсивность пульсаций в случае второго решения заметно больше, чем для первого решения. Кроме того, область течения, вовлеченная в колебательный процесс, во втором решении более обширная.

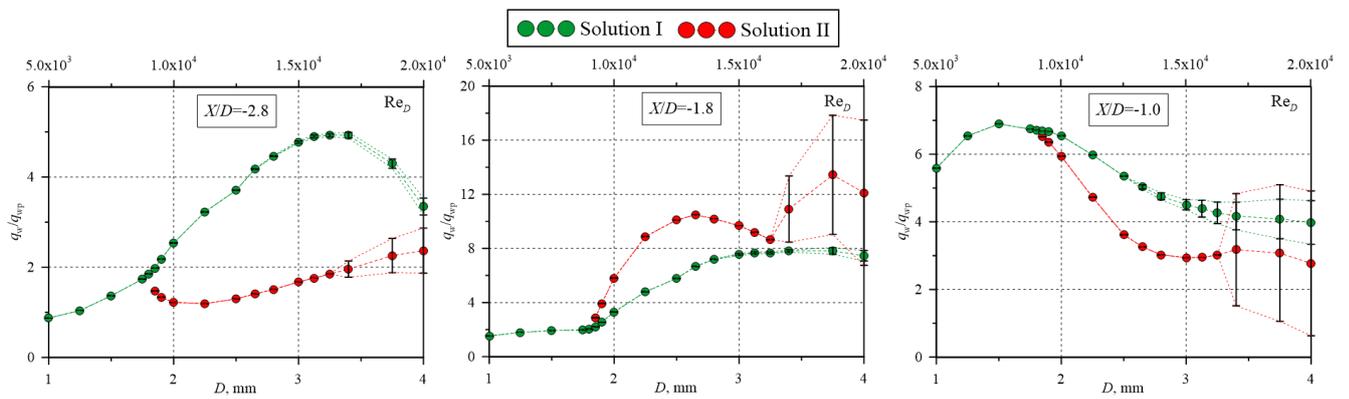


Рис. 12. Изменение теплового потока в зависимости от диаметра затупления ребра (или же от числа Рейнольдса) в точках на пластине $X/D = -2.8$, $X/D = -1.8$ и $X/D = -1.0$

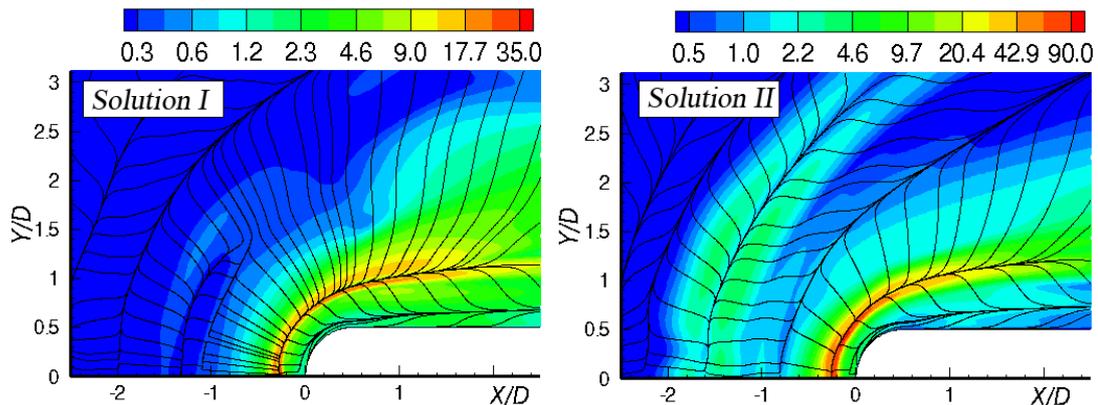


Рис. 13. Поля пульсаций теплового потока и поверхностные линии тока на пластине для двух решений при $Re_D = 1.70 \cdot 10^4$

В **седьмой главе** представлены результаты расчетов, полученные на основе RANS подхода с применением двухпараметрической $k-\omega$ SST модели турбулентности и однопараметрической модели Спаларта-Аллмараса (SA, «стандартной» и с поправкой на сжимаемость), трехмерного обтекания установленного на пластине затупленного ребра сверхзвуковым потоком ($M = 2.95$) с турбулентным пограничным слоем. Аналогично предыдущим главам, сначала, в **параграфе 7.1**, приводятся краткий обзор работ, посвященных применению различных подходов к моделированию турбулентности в задачах вязко-невязкого взаимодействия; в **параграфе 7.2** изложены детали постановки задачи и вычислительные аспекты.

В **параграфе 7.3** описаны характерные особенности предсказываемой динамической картины вязко-невязкого взаимодействия, которая в целом аналогична получающейся в случае ламинарного течения: перед телом образуется отрывная область, которая в данном случае имеет более простую конфигурацию (для осредненного движения) и содержит лишь один подковообразный вихрь.

В **параграфе 7.4** приведены данные методического характера о влиянии сеточного разрешения на предсказываемую динамическую картину вязко-невязкого взаимодействия и выработаны рекомендации, позволяющие получить высококачественное разрешение вязких эффектов и сложной ударно-волновой картины течения.

В параграфе 7.5 дается сопоставительный анализ результатов, полученных с применением моделей Спаларта-Аллмараса и $k-\omega$ SST Ментера, также анализируется влияние поправки на сжимаемость для модели SA, результаты вычислений сравниваются с детальными экспериментальными данными по усредненному во времени полю давления из работы Dolling&Bogdonoff (AIAA J., V.20, 1982). Показывается, что $k-\omega$ SST модель и «стандартная» SA модель дают, в целом, близкие результаты, удовлетворительно, а в отдельных областях течения и весьма хорошо согласующиеся с опытными данными (рис. 14). В случае использования модели $k-\omega$ SST отрыв пограничного слоя происходит немного раньше, а область между линиями отрыва и присоединения более широкая. Оказалось, вместе с тем, что введение поправки на сжимаемость ухудшает качество предсказания поля моделируемого течения.

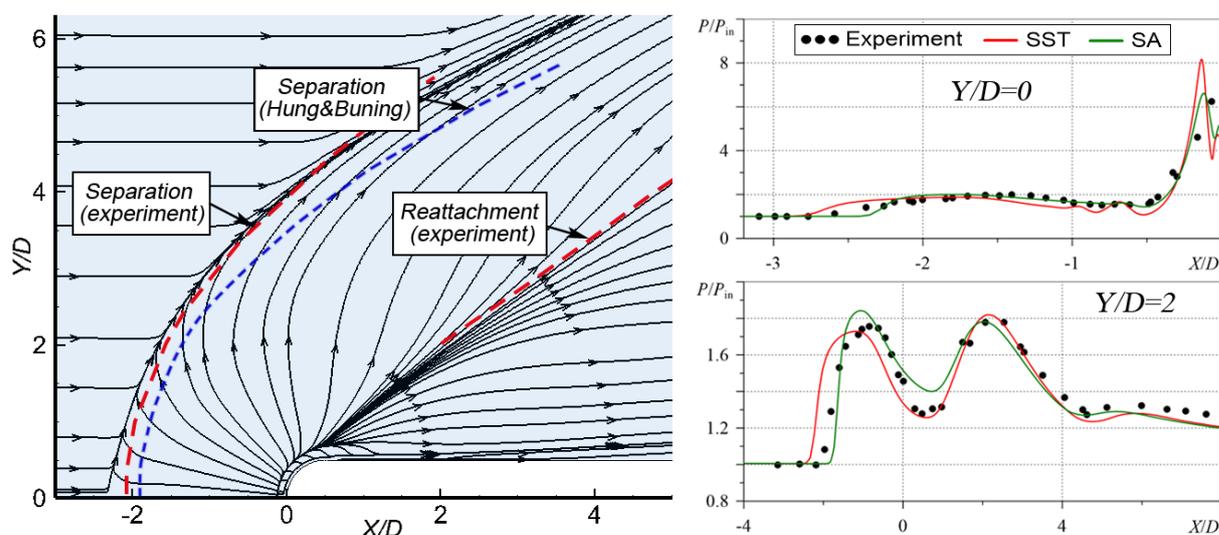


Рис. 14. Линии тока и распределение давление на поверхности пластины при натекании на затупленное ребро сверхзвукового потока ($M = 2.95$) с турбулентным пограничным слоем

Заключение

В процессе выполнения диссертационной работы существенно расширены возможности развиваемого в СПбПУ неструктурированного конечно-объемного гидродинамического кода SINF/Flag-S. Это достигнуто благодаря разработке автором комплекса программных модулей, в которых реализованы современные численные методики расчета сжимаемых течений, включая различные способы повышения порядка точности при работе с неструктурированными сетками. Разработанный код всесторонне протестирован и верифицирован на ряде «канонических» задач. С использованием разработанного кода проведено численное исследование вязко-невязкого взаимодействия в трехмерных ламинарных и турбулентных течениях с подковообразными вихревыми структурами, возникающими при обтекании потоком вязкого газа установленных на пластине одиночных препятствий в виде цилиндрического тела с затупленной передней кромкой.

В ходе выполнения работы получены следующие основные результаты:

1. Проведено систематическое тестирование многочисленных вариантов схем повышенного порядка точности, предложенных в литературе для расчета существенно сжимаемых течений на неструктурированных сетках, и получен значительный объем новых

данных о работоспособности этих схем на неструктурированных сетках с различным типом сеточных элементов. Показано, что квазиодномерный подход при варьировании типа сеточных элементов в целом демонстрирует превосходство по сравнению со «скалярным»: в частности, скалярные ограничители могут существенно ухудшать качество численного решения в случае использования многоугольных элементов.

2. Реализован и верифицирован численный алгоритм, позволяющий проводить расчеты течений вязкого газа в широком диапазоне чисел Маха на основе единого подхода. На примере задачи о дозвуковом турбулентном обтекании цилиндра с обтекателем показано, что решение, рассчитанное по разработанному алгоритму при очень малых значениях числа Маха, с высокой степенью точности соответствует результатам вычислений по алгоритму, ранее реализованному в коде SINF/Flag-S для расчетов течений несжимаемой жидкости.

3. Для случая дозвукового турбулентного обтекания тела с затупленной передней кромкой на основе RANS подхода, с применением двухпараметрической модели турбулентности, исследовано влияние числа Прандтля и сжимаемости среды на локальный теплообмен и вихревую структуру в отрывной зоне, формирующейся перед телом и заполненной системой подковообразных вихрей. Показано, что при сохранении схожести картин локального теплообмена с ростом числа Прандтля пиковые значения нормированного числа Стэнтона увеличиваются. С ростом числа Маха картина локальной теплоотдачи остается практически неизменной вплоть до значений числа Маха около 0.3. При дальнейшем увеличении числа Маха размер подковообразных вихрей заметно увеличивается, а сами вихри несколько удаляются от обтекаемого тела.

4. Проведены многовариантные расчеты сверхзвукового стационарного ламинарного обтекания области сопряжения затупленного ребра и изотермической пластины при различных наборах значений определяющих безразмерных параметров задачи (числа Рейнольдса, числа Маха, температурного фактора, толщины пограничного слоя на пластине). Рассмотрены вопросы чувствительности предсказываемых характеристик к выбору той или иной численной схемы второго порядка точности и сеточному разрешению. Получены и систематизированы уточненные данные о влиянии определяющих параметров на газодинамическую структуру потока, протяженность передней отрывной зоны и характеристики локального теплообмена.

5. Выполнена серия расчетов валидационного характера для конфигурации, полностью соответствующей расчетно-экспериментальной работе Tutty et al (2013), в которой исследовалось сверхзвуковое ламинарное обтекание области сопряжения затупленного ребра и изотермической пластины при числе Маха набегающего потока $M = 6.7$ и различных числах Рейнольдса, наименьшее из которых отвечает реализации строго стационарного режима течения. Полученное в диссертационной работе численное решение для этого режима хорошо согласуется с экспериментальными и расчетными данными, представленными в указанном источнике.

6. Впервые установлено, что в некотором диапазоне значений числа Рейнольдса задача об обтекании сверхзвуковым потоком области сопряжения затупленного ребра и пластины может иметь двойственное решение. Для конфигурации из работы Tutty et al (2013) проведена серия расчетов с продолжением по параметру, в которых, с небольшим шагом, варьировался диаметр

передней кромки затупленного ребра (и, соответственно, число Рейнольдса). Построены бифуркационные диаграммы, свидетельствующие о существовании двух метастабильных решений при превышении числом Рейнольдса некоторого (количественно оцененного в работе) критического значения. Дан анализ отличительных особенностей двух решений, эволюционирующих с ростом числа Рейнольдса. Оценены значения числа Рейнольдса, при которых происходит переход к нестационарным режимам течения. Установлено, что для первого («основного») решения амплитуда пульсаций с ростом числа Рейнольдса нарастает постепенно, а в случае второго решения наблюдается переход с «жестким» возбуждением сложных многочастотных колебаний.

7. На основе RANS подхода, с применением двухпараметрической $k-\omega$ SST модели турбулентности и однопараметрической модели Спаларта-Аллмараса (SA, «стандартной» и с поправкой на сжимаемость), проведены расчеты трехмерного обтекания установленного на пластине затупленного ребра сверхзвуковым потоком ($M = 2.95$) с турбулентным пограничным слоем. Получены данные методического характера о влиянии сеточного разрешения на предсказываемую динамическую картину вязко-невязкого взаимодействия и выработаны рекомендации, позволяющие получить высококачественное разрешение вязких эффектов и сложной ударно-волновой картины течения. Результаты вычислений сопоставлены с детальными экспериментальными данными по усредненному во времени полю давления из работы Dolling&Bogdonoff (1982). Установлено, что $k-\omega$ SST модель и «стандартная» SA модель дают в целом близкие результаты, удовлетворительно, а в отдельных областях течения и весьма хорошо согласующиеся с опытными данными. Оказалось, вместе с тем, что введение поправки на сжимаемость ухудшает качество предсказания поля моделируемого течения.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Колесник Е.В., Смирнов Е.М. Тестирование различных схем с квазиодномерной реконструкцией газодинамических переменных при расчетах на неструктурированных сетках // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2017. – Т. 10. – № 3. – С. 123–139. **(ВАК)**

2. Kolesnik E.V., Smirnov E.M. Analysis of performance of scalar limiters in high-order schemes used for unstructured-grid gasdynamic flow computations // Advanced Math. Models & Applications. – 2017. – Vol. 2. – № 3. – P. 258-266.

3. Kolesnik E.V., Smirnov E.M. Some aspects of numerical modeling of inviscid supersonic flow in a duct with a central wedge // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1038. – № 1. – P. 012133. **(Scopus)**

4. Колесник Е.В., Смирнов Е.М., Смирновский А.А. Численное решение трехмерной задачи обтекания установленного на пластине цилиндрического тела сверхзвуковым потоком вязкого газа при $M=2,95$ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2019. – Т. 12. – № 2. – С. 7-22. **(ВАК, Web of Science)**

5. Kolesnik E.V., Smirnovsky A.A. Numerical study of the vortex structure influence on heat transfer in the supersonic flow past a plate and a blunt fin junction // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1400. – № 077030. – P. 077030. (**Scopus**)

6. Колесник Е.В., Смирнов Е.М. Численное исследование вихревых структур и теплообмена при сверхзвуковом обтекании области сопряжения затупленного тела и пластины // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90. – № 2. – С. 185-192. (**ВАК, Scopus, Web of Science**)

7. Колесник Е.В., Смирновский А.А., Смирнов Е.М. Двойственность вихревой структуры, возникающей при сверхзвуковом обтекании области сопряжения затупленного тела и пластины вязким газом // Письма в ЖТФ. – 2020. – Т. 46. – № 12. – С. 10-13. (**ВАК, Scopus, Web of Science**)

8. Kolesnik E.V., Smirnovsky A.A., Smirnov E.M. Compressibility effect on heat transfer intensified by horseshoe vortex structures in turbulent flow past a blunt-body and plate junction // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1565. – P. 012104. (**Scopus**)

9. Kolesnik E.V., Smirnov E.M., Smirnovsky A.A. Self-excited periodic oscillations in a supersonic laminar flow past a blunt-fin body mounted on a plate // J. Phys. Conf. Ser. – 2020. – Vol. 1697. – P. 012223. (**Scopus**)

10. Колесник Е.В., Смирнов Е.М. Сверхзвуковое ламинарное обтекание затупленного ребра: двойственность численного решения // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91. – №5. – С. 764-771. (**ВАК, Scopus, Web of Science**)