

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу Рощина Антона Сергеевича «МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕЧЕНИЙ В ГАЗОВЫХ ТРАКТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНЫХ СЕТОК», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Актуальность темы диссертации определяется необходимостью проведения большого количества газодинамических расчетов при проектировании высокоскоростных воздухозаборных устройств для современных летательных аппаратов. Другой важной задачей является моделирование работы газодинамических наземных стендов, имитирующих высотные условия работы сопел с высокой геометрической степенью расширения сверхзвуковой части. Данные задачи требуют высокой степени разрешения газодинамических разрывов, что может быть достигнуто только при использовании численной схемы высокого порядка точности на адаптированных к особенностям решения расчетных сетках. Еще одной особенностью газодинамических течений в этих практических задачах является то, что параметры течения (например: температура) изменяется в очень широком диапазоне (от 3000К до 50К). Это обуславливает значительное различие значений коэффициентов переноса газовой среды (вязкости, теплопроводности) в разных зонах в расчетной области. Использование постоянных значений этих коэффициентов в некоторых случаях может привести к некорректным численным результатам. Корректное математическое моделирование в рассматриваемых в настоящей работе задачах позволяет существенно снизить объем дорогостоящих стендовых высотных испытаний, сократить время и повысить качество проектирования воздухозаборных устройств.

Работа Рощина А.С.. посвящена созданию методики моделирования высокоскоростных потоков в газовых трактах с учетом изменения теплофизических свойств газа.

Вычислительный эксперимент как основной инструмент математического моделирования газодинамических процессов, имеющих пространственный характер, включает в себя решение следующих подзадач: 1. твердотельное моделирование, задание геометрии расчетной области и обтекаемых поверхностей; 2. генерация расчетной сетки в расчетной области, оптимизация этой сетки и ее адаптация к получаемому решению задачи; 3. использование "расчетного кода", то есть реализацию алгоритма решения уравнений, описывающих динамику среды с учетом тех физических

процессов и явлений, которые следует учитывать в конкретном случае. Данный пункт включает в себя задание адекватных задаче граничных условий; 4. проведение серии расчетов (непосредственно вычислительный эксперимент); 5. визуализация полученных данных и анализ результатов.

Автор диссертации внес самостоятельный вклад в разработку второго третьего и четвертого пунктов. Основная заслуга автора заключается в проведении серии вычислительных и физических экспериментов течений в воздухозаборном устройстве, а так же в газодинамической трубе для испытаний высотных сопел, в интерпретации полученных результатов и осмыслении физического смысла численных решений.

Работа состоит из четырех глав, заключения и списка литературы.

Первая глава посвящена постановке задачи исследования. Здесь сформулированы цели и задачи исследования, рассмотрены физические особенности рассматриваемых процессов, обоснована актуальность исследования и достоверность основных положений, выносимых на защиту. Приводится литературный обзор методам расчета сложных течений, в котором кратко рассмотрены методы решения базовой системы уравнений, методы генерации сеток и модели турбулентности.

Во второй главе рассматриваются вопросы дискретизации расчетной области. Конкретно рассматривается триангуляция с ограничениями Делоне плоских, двумерных областей, ограниченных кусочно-криволинейными границами. Расчетная сетка может адаптироваться к особенностям решения или к геометрии области. С разной степенью подробности (в основном очень кратко) описаны такие разделы, как структуры данных для хранения информации о триангуляции, критерии качества построенной расчетной сетки, триангуляция вблизи криволинейной границы. Рассмотрены некоторые операции над элементами триангуляционной сетки, такие как: разбиение треугольника, разбиение ребра, переворот диагонали четырехугольника состоящего из двух треугольников, удаление ребра. Данные операции затем используются в алгоритмах преобразования триангуляции для увеличения (уменьшения) разрешающей способности сетки (адаптации). В заключение главы, описываются алгоритмы аппроксимации градиента функции на нерегулярной сетке. Это важно для построения численной схемы повышенного порядка точности.

В первых разделах третьей главы описывается построение численной схемы повышенного порядка используемой, в работе для аппроксимации исходной системы уравнений на нерегулярных расчетных сетках. Используется схема Годунова с точным решением задачи Римана для определения потоков через грани контрольного объема с учетом изменения теплофизических параметров газа. Приведена параметрическая модель турбулентности Спаларта-Аллмараса. Описана постановка начальных и граничных условий.

Приведены тестовые и методические расчеты двумерных и трехмерных идеального и вязкого газа, в результате которых определен диапазон параметров течения, для которого нужно учитывать переменность показателя адиабаты. Результаты расчетов сравнивались с аналитическими решениями, данными экспериментов и численными результатами других авторов опубликованными в литературе.

Четвертая глава посвящена исследованию актуальных практических задач. Здесь решаются две задачи, первая из которых, это моделирование течения в сверхзвуковом воздухозаборном устройстве изменяемой геометрии и комбинированном воздухозаборном устройстве. В этой части работы проводятся и сопоставляются как экспериментальные, так и численные исследования автора. Получены такие важные характеристики работы воздухозаборного устройства как коэффициенты восстановления полного давления и расходы газа различных трактов устройства во всем диапазоне параметров работы. В рамках модели пространственного течения невязкого газа с теплофизическими параметрами, зависящими от температуры, исследовано гиперзвуковое обтекание воздухозаборного устройства прямого двигателя под углом атаки. В последнем параграфе четвертой главы приведено моделирование запуска сопла при испытаниях на наземном стенде с использованием газодинамической трубы и эжектора. Подобраны давления в камере сгорания, при которых при установившемся течении в тракте газодинамической трубы режим течения в сопле будет безотрывным.

В заключении приведены основные результаты полученные автором в процессе выполнения диссертационной работы.

По моему мнению, основные достижения автора следующие:

1. Им самостоятельно разработан достаточно надежно работающий генератор нерегулярной расчетной сетки для двухмерных областей с кусочно-криволинейными границами. Алгоритм генерации основан на триангуляции Делоне. Сетка адаптируется к границам расчетной области и к особенностям течения.
2. На нерегулярных расчетных сетках реализованы в двухмерном и трехмерном случае алгоритмы решения уравнений Эйлера и Навье-Стокса с моделью турбулентности. Алгоритм основан на методе Годунова второго порядка точности. В качестве нового элемента алгоритма стоит отметить учет зависимости теплофизических свойств среды от температуры.
3. Проведение численных и экспериментальных исследований достаточно сложных, актуальных прикладных газодинамических задач. Расчетным путем получены достоверные результаты о процессах в высокоскоростных воздухозаборных устройствах и стендах для наземных испытаний высотных двигателей. На решении этих задач автор демонстрирует высокую вычислительную квалификацию, умение гибко использовать как собственные алгоритмические и программные разработки,

так и имеющиеся в распоряжении программные средства (например генераторы трехмерных сеток).

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается сравнением с численными результатами других авторов и экспериментальными данными. Проведен значительный объем вычислительной работы по тестированию и настройке численного алгоритма, в связи с чем, выводы работы мне представляются обоснованными. Библиографический обзор содержит 97 источников, распределен по всем главам и включает, наряду с классическими, и современные работы.

По работе можно сделать следующие замечания и пожелания:

1) На стр.45 указывается, что “Полученные результаты сравниваются с результатами, полученными в результате работы общераспространённых программ Triangle [30], netgen [51] и gmsh [52]”. Было бы интересно привести таблицы сравнения результатов триангуаций по многим критериям для задач со сложными криволинейными границами.

2) В модели Спаларта-Аллмараса используется параметр  $d$  – расстояние от точки до ближайшей стенки. В тексте не описано как этот параметр считается (какой алгоритм или используются средства пакетов 3D моделирования и генерации сетки).

3) В тесте “Взаимодействие ударной волны с пристеночным слоем” стр.79 не указан размер используемой расчетной сетки.

4) В главе 4 в разделе “Сравнение результатов” стр.100 приводится сравнение результатов экспериментов и численных расчётов для расчётного режима работы диффузора. Сравнение производится по интегральным параметрам (зависимость коэффициента восстановления полного давления в камере при различных диаметрах критического сечения сопла). Было бы интересно посмотреть сравнение локальных параметров (распределение параметров течения в характерных сечениях) и сравнение физической и численной визуализации структуры течения.

Работа написана понятным языком с использованием общепринятой терминологии, правда, с некоторым количеством досадных ошибок и опечаток. Автореферат отражает основные результаты работы. Основные результаты диссертации опубликованы в журналах из списка ВАК (2 работы) и сборниках трудов научно-технических конференций по профилю работы (4 работы).

Несмотря на указанные замечания, диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для науки и практики. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы. Работа отвечает требованиям Положения ВАК РФ о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых

степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Рошин А.С. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Московский Государственный Университет  
имени М.В.Ломоносова, 119991, ГСП-1, Москва,  
Ленинские горы, д.1, стр.2, физический факультет.  
mail: [dean@phys.msu.su](mailto:dean@phys.msu.su) , тел: +7 (495) 939-16-82.

Доцент каф. Молекулярной физики,  
физического факультета МГУ, к.ф.м.н.  
mail: [ivanovmsu@physics.msu.ru](mailto:ivanovmsu@physics.msu.ru) , тел: +7 (495) 939 44 28.

*Иванов* И.Э.Иванов

Подпись доцента, к.ф.-м.н. Игоря Эдуардовича Иванова заверяю.  
n.o. Декан физического факультета МГУ

Н.Н.Сысоев

