



Государственная корпорация  
по космической деятельности «Роскосмос»  
**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО**  
**«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР**  
**РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**«ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР**  
**ИМЕНИ М.В.КЕЛДЫША»**  
**(АО ГНЦ «Центр Келдыша»)**

Онежская ул., д. 8, Москва, Россия, 125438  
Тел. +7 (495) 456-4608 Факс: +7 (495) 456-8228  
ОКПО 47430587 ОГРН 1217700095667 ИНН/КПП 7743355574 / 774301001  
kerc@elnet.msk.ru; <https://keldysh-space.ru>

Ученому секретарю  
диссертационного совета 24.2.345.04

22. 11. 2023 № 200-06/401

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

603155, г. Нижний Новгород,  
ул. Минина, 24, НГТУ им. Р.Е.  
Алексеева

Направляю Вам отзыв официального оппонента кандидата физико-математических наук Лаптева Игоря Вячеславовича на диссертацию Стручкова Андрея Викторовича «Повышение эффективности трехмерного численного моделирования сверхзвуковых течений при конечно-объемной дискретизации на неструктурированных сетках», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Приложение: отзыв официального оппонента Лаптева И.В., 5 л., 2 экз.

Учёный секретарь,  
кандидат военных наук

Ю.Л. Смирнов

Исполнитель – Лаптев И.В.  
тел. +7(495)453-92-44 (доб. 4-61)

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата физико-математических наук, Лаптева Игоря Вячеславовича на диссертацию Стручкова Андрея Викторовича «Повышение эффективности трехмерного численного моделирования сверхзвуковых течений при конечно-объемной дискретизации на неструктурированных сетках», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация Стручкова Андрея Викторовича посвящена исследованию вопросов численного моделирования сверхзвуковых течений на неструктурированных сетках. Всё более широкое применение такого рода расчётов при решении практических задач промышленности, в том числе как более дешёвая, быстрая и информативная альтернатива физическому эксперименту, делает исследование Стручкова А.В. крайне **актуальным**.

Необходимость проведения расчетов внешней и внутренней газовой динамики реальных технических объектов, которые характеризуются большими пространственными габаритами в сочетании с наличием мелкими деталями, вносящими существенный вклад в общую картину течения, требует разработки и реализации специальных вычислительных методов. Создание таких методов, определяющих **практическую ценность** работы, может гарантировать точность определения газодинамических характеристик сверхзвуковых течений и одновременно с этим быть приемлемыми в плане вычислительных затрат при сохранении устойчивости вычислений и возможности проведения массовых расчетов.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Материал диссертации изложен на 150 страницах (основное содержание работы на 118 страницах) машинописного текста, включающих 154 рисунка. Список используемой литературы включает 156 наименований.

Во *введении* обосновывается актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, выделана ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Так же представлены основные результаты, выносимые на защиту, даны сведения об апробации работы и приведены сведения о публикациях автора и его личном вкладе в проведенное исследование.

*Первая глава* диссертационной работы посвящена численным методам и алгоритмам повышения точности и устойчивости газодинамических расчётов.

В разделе 1.2 рассматривается система уравнений Навь-Стокса, усреднённая по Рейнольдсу, которая используется для описания нестационарных трехмерных течений газа. Приводится способ ее дискретизации на неструктурированных расчётных сетках.

В разделе 1.3 описывается способ модификации ограничителей потока величины через грани расчётной ячейки, основанный на введении зависимости порога срабатывания ограничителя от локального значения физической величины, для которой ограничитель применяется. На примере решения задачи невязкого сверхзвукового течения в канале с клином показана эффективность предложенного решения в сравнении с исходным видом ограничителя потоков. В частности, удалось устранить нефизичные осцилляции на фронте ударных волн и ложное включение ограничителя в областях невозмущенного потока, что существенно снижало точность проводимых расчётов. Автором выполнена обстоятельная калибровка константы порога срабатывания модифицированного ограничителя.

Раздел 1.4 диссертации посвящён сравнению двух схем вычисления градиента газодинамической величины – метод Грина-Гаусса и метод наименьших квадратов. На модельных структурированных сетках показано, что точность каждого из методов может зависеть от формы расчётной ячейки. Для получения универсальной схемы, применимой на неструктурированной сетке, автором предлагается гибридный подход. Данный метод позволяет учитывать оба способа расчёта градиента величины с весовыми коэффициентами, которые определяют долю каждого из методов в зависимости от геометрической формы расчётной ячейки. На модельных задачах показывается, что гибридная схема позволяет проводить численное моделирование и получать характеристики исследуемых объектов с большей точностью.

Глава 2 посвящена разработке сеточных методов повышения точности и скорости расчёта сверхзвуковых течений. В разделе 2.2 представлен способ введения процедуры многосеточной инициализации, основанный на автоматическом построении последовательности грубых сеток. В разделе 2.3 рассматривается применение статической адаптации расчётной сетки под особенности ударно-волновой структуры течения. В разделе 2.4 предлагаемые методы используются для получения качественного решения и исследования структуры сверхзвукового обтекания различных объектов. В разделе 2.5 автор работы так же рассматривает применение данных методов для получения характеристик сверхзвукового истечения из сопла.

Глава 3 диссертации полностью посвящена применению схем и алгоритмов, представленных в работе, для численного исследования

сверхзвукового течения в канале воздухозаборного устройства и сверхзвукового обтекания маневренного летательного аппарата. В разделах 3.2-3.3 представлено исследование взаимодействия отраженной ударной волны с пограничным слоем течения. Отдельно рассмотрена возможность изменять аэродинамические характеристики течения путем добавления конструктивных элементов на поверхность канала. В разделах 3.4-3.5 описано применение инструментов, разработанных автором диссертационной работы, для получения структуры течения вблизи поверхности летательного аппарата и определения его аэродинамических характеристик. Показаны повышение точности и скорости моделирования течения путем применения разработанных численных схем и методов.

В заключение к диссертации сформулированы основные результаты по всей работе.

Согласно тексту диссертационной работы, ее научная новизна заключается в следующем:

1. Представлена модифицированная схема расчета ограничителей потока на основе локальных значений газодинамических величин, проведена обстоятельная калибровка константы порога срабатывания модифицированного ограничителя.

2. Предложена гибридная схема расчета градиента величины в центре расчетной ячейки. Введена весовая функция для определения доли каждого из методов в итоговом значении градиента.

3. Разработан метод формирования начальных полей газодинамических величин на основе многосеточной инициализации применительно к неструктурированным сеткам.

4. Разработан метод адаптации неструктурированной расчетной сетки для качественного моделирования течений с ударно-волновыми структурами.

5. Проведено исследование ударно-волновой структуры течения при сверхзвуковом обтекании с использованием предложенных в работе схем и алгоритмов.

Достоверность результатов диссертационной работы доказана результатами моделирования на ЭВМ характерных тестовых задач и сопоставления получаемых численных решений с аналитическим решением, данными из литературных источников, а так же полученных в результате проведения эксперимента.

**Теоретическая и практическая значимость** выполненной работы выражается в получении теоретических и практических результаты по исследованию подходов к моделированию сверхзвуковых течений с

использованием неструктурированных расчетных сеток. Предложенные методы и алгоритмы позволяют повысить точность и эффективность решения задач по моделированию сверхзвукового обтекания объектов, получить достоверные характеристики моделируемых процессов. Разработки, выполненные в рамках диссертационной работы, реализованы в пакете программ ЛОГОС и применяются для решения промышленных задач авиастроения.

При изучении материалов диссертационной работы возник ряд вопросов и замечаний:

1. Все выводы по эффективности предложенных схемных решений строятся на моделировании стационарных задач газовой динамики. При этом, не понятно, как предложенные способы повышения точности и устойчивости моделирования проявляются при решении нестационарных задач газовой динамики?

2. Предложенный в диссертации метод статической адаптации расчётной сетки к структуре течения позволяет учитывать головные ударные волны, положение которых слабо зависит от размера расчётной сетки. Положение же более слабых замыкающих скачков уплотнения может существенно меняться в зависимости от получаемого на конкретной расчётной сетке решения, что может не позволить локализовать область измельчения сетки.

3. Из текста диссертации не понятно, как предложенный в работе метод построения грубых сеток для многосеточной инициализации меняет обтекаемую расчётную геометрию и решение на ней.

4. В параграфе 2.2 практически не проиллюстрирован примененный многоуровневый метод формирования грубых ячеек на основе построения равномерной кубической сетки. Сюда стоило бы добавить иллюстрации примерно также как для рассмотренных методов, разработанных другими авторами.

5. При описании влияние дополнительных механических элементов на распределение аэродинамических характеристик в разделе 3.3 диссертации не указаны абсолютные значения искусственных неровностей и степень влияния этих размеров на ударно-волновую структуру течения.

Отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки работы. Представленная Стручковым А.В. диссертация является научно-исследовательской работой, содержащей значительный объем результатов и методических рекомендаций, совокупность которых можно квалифицировать как весомое научное достижение в области вычислительной газодинамики.

Основные положения диссертации представлены в 8 публикациях, включенных в список ВАК и/или входящих в мировые индексы цитирования (SCOPUS, Web of Science), в 9 работах в трудах конференций. Содержание автореферата соответствует основным положениям и выводам диссертационной работы.

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы. Тема диссертации и проведенные исследования соответствуют специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Считаю, что диссертация Стручкова Андрея Викторовича является завершенной научно-квалификационной работой, соответствующей критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук согласно пунктам 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ. Автор диссертации Стручков Андрей Викторович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории  
Акционерного общества «Государственный научный центр Российской  
Федерации «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша»

22 ноября 2023 г.

И.В. Лаптев

Подпись к.ф.-м.н. Лаптева И.В. удостоверяю:  
Ученый секретарь АО ГНЦ «Центр Келдыша»

22 ноября 2023 г.



Ю.Л. Смирнов

Сведения об организации: Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В.Келдыша»

Почтовый адрес: ул. Онежская, д. 8, г. Москва, Россия, 125438

Контактный телефон: +7 (495) 453-92-44 (доб. 4-61)

Адрес электронной почты: laptev@kerc.msk.ru