

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, доцента Гарбарука Андрея Викторовича 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

Моделирование сверхзвуковых течений, характеризующихся наличием в потоке ударных волн, – это одна из наиболее сложных задач механики жидкости и газа. В задачах аэродинамического проектирования авиационной техники возникновение ударной волны является важным процессом, оказывающим значительное влияние на распределение газодинамических величин в системе, поэтому важность достоверности воспроизведения данного процесса трудно переоценить.

Диссертация Стручкова Андрея Викторовича посвящена разработке подходов, обеспечивающих повышение точности и ускорение вычислительных алгоритмов для расчета сверхзвуковых течений. Необходимо отметить, что в настоящее время наиболее часто применяются неструктурированные расчетные сетки, что обусловлено удобством их построения в случае решения промышленно-ориентированных задач. Ввиду этого, все представленные в рамках работы схемы и алгоритмы разработаны и ориентированы для применения на таких сетках.

Для повышения точности решения в работе предложена модифицированная схема ограничителя потока и гибридная схема вычисления градиента. Новым элементом в схеме ограничителей потока является способ вычисления порога срабатывания на основе газодинамической величины, что позволяет активировать ограничитель лишь в областях ударной волны и исключить его случайное срабатывание в областях невозмущенного потока. В предложенной гибридной схеме вычисления градиента используется известный подход взвешивания методов Грина-Гаусса и наименьших квадратов, а новизна состоит в алгоритме вычисления весовой функции каждого из методов на основе анализа геометрической формы расчетной ячейки. Преимущества разработанных автором диссертационной работы численных схем продемонстрированы на ряде задач сверхзвукового обтекания.

Для повышения скорости сходимости решения автором разработан метод инициализации газодинамических величин на основе многосеточного метода. Согласно результатам диссертационной работы, метод многосеточной инициализации позволяет существенно сократить время расчета сверхзвуковых течений (ускорение достигает 20%). Также в работе разработан и реализован метод статической адаптации расчетной сетки для разрешения областей с большими градиентами (в том числе ударных волн). Локальное сгущение расчетной сетки позволяет существенно сократить ее размер без потери точности решения.



Эффективность разработанных Стручковым А.В. подходов продемонстрирована на ряде сложных сверхзвуковых течений, включающих течение в модели воздухозаборника и обтекание маневренного самолета. В задаче о течении в модели воздухозаборника предложены подходы для улучшения его аэродинамических характеристик за счет расположения в его тракте дополнительных элементов.

Работа Стручкова А.В. состоит из введения, трех глав и заключения.

Во *введении* обосновывается актуальность темы исследования, проводится краткий обзор современных подходов к моделированию сверхзвуковых течений, ставятся цели и определяются задачи исследования, излагается научная новизна и практическая значимость работы.

*Первая глава* диссертационной работы посвящена описанию разработанных в диссертации модификаций численных методов, применимых на произвольных неструктурированных сетках. В частности, в *параграфе 1.2* приводится описание системы уравнений Навье-Стокса с использованием общепринятых обозначений.

В *параграфе 1.3* представлено описание ограничителя Venkatakrishnan, используемого при расчете течений жидкости и газа для реконструкции решения и продемонстрированы его недостатки при решении задачи сверхзвукового невязкого обтекания клина. Предложена модификация данного ограничителя, подобраны ее параметры и продемонстрированы ее преимущества над оригинальной версией.

В *параграфе 1.4* рассматриваются способы расчета градиента (метод Грина-Гаусса и метод наименьших квадратов) на различных сетках. Показано, что точность методов зависит от формы расчетной ячейки. Предложен новый гибридный метод расчета градиента, построенный на комбинации методов Грина-Гаусса и наименьших квадратов, весовая функция которого учитывает форму ячейки.

*Параграф 1.5* посвящен демонстрации преимуществ разработанных методов при расчете таких сверхзвуковых течений как турбулентное обтекание цилиндра с иглой и обтекание пули. Основные выводы по *первой главе* приведены в *параграфе 1.6*.

Во *второй главе* представлены разработанные автором алгоритмы, предназначенные для ускорения расчетов, а именно алгоритм инициализации на основе геометрического многосеточного метода и алгоритм статической адаптации расчетной сетки под особенности течения.

В частности, в *параграфе 2.2* представлено описание процедуры многосеточной инициализации и алгоритм построения последовательности грубых сеток, а в *параграфе 2.3* описан алгоритм адаптации расчетной сетки под особенности течения, включая способ разбиения произвольного многогранника и выбор критерия.

Эффективность предложенных алгоритмов продемонстрирована на задачах сверхзвукового обтекания осесимметричного тела (*параграф 2.4*) и истечения сверхзвуковой струи из сопла (*параграф 2.5*). В *параграфе 2.6* просуммированы основные результаты второй главы.



Глава 3 посвящена исследованию сверхзвукового течения в модели воздухозаборника и сверхзвукового обтекания маневренного летательного аппарата с использованием схем и алгоритмов, разработанных в диссертации. Исследована ударно-волновая структура рассмотренных течений и получены важные количественные характеристики потока. В задаче о течении в модели воздухозаборника предложены подходы для улучшения его аэродинамических характеристик за счет расположения в его тракте дополнительных элементов.

В *Заключении* к диссертации приведены все результаты данной работы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке новых схем и алгоритмов для расчета сверхзвуковых течений, а также в результатах, полученных с их использованием. В частности, разработаны:

1. модифицированный вариант ограничителя потока, порог срабатывания которого основан на газодинамической величине;
2. гибридная схема вычисления градиента, весовая функция которой учитывает форму расчетной ячейки;
3. метод ускорения расчета за счет использования алгоритма инициализации газодинамических полей, основанного на геометрическом многосеточном методе, применимом к неструктурированным расчетным сеткам;
4. алгоритм адаптации расчетной сетки к особенностям течения, позволяющий существенно сократить размер расчетной сетки и, как следствие, вычислительные затраты без снижения точности расчета.

Достоверность полученных результатов обусловлена приведенным в диссертации обоснованием применимости математических моделей при условиях, для которых проводится численное моделирование рассматриваемых в работе сверхзвуковых течений, а также многочисленными результатами сопоставления полученных с помощью пакета Логос результатов с результатами других пакетов и экспериментальными данными.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что разработанные автором численные схемы и методы для сокращения времени расчета сверхзвуковых течений на неструктурированных сетках обладают большим потенциалом для проведения инженерного анализа характеристик обтекания разрабатываемых образцов авиационной техники.

Высоко оценивая диссертационную работу, необходимо отметить следующие замечания:

1. Текст диссертации и автореферата не всегда написан ясным языком, встречаются «жаргонизмы», присутствуют грамматические ошибки и опечатки, есть неточности в подписях к графикам и рисункам. Это затрудняет чтение и понимание работы и, возможно, явилось причиной следующих замечаний.
2. Непонятно, какую размерность имеет и куда входит величина  $\varepsilon$  в формуле (1.3.5), а также является ли она тензорно инвариантной.



3. Из диссертации непонятно, какие элементы многосеточного метода и алгоритма адаптации расчетной сетки разработаны автором, а какие являются составной частью уже существующих методов и просто реализованы автором в пакте Логос.
4. Из диссертации непонятно, как работает алгоритм адаптации «в сложных условиях». В частности, что происходит в случае наличия в базовой сетке невыпуклых ячеек или в случае существенной перестройки ударно-волновой структуры при адаптивном измельчении сетки.
5. Описание решаемых задач недостаточно полное. В частности, в большинстве случаев непонятно, какой тип течения рассматривается, ламинарное или турбулентное. Более того, представленных в работе данных недостаточно для оценки типа течения: число Рейнольдса не приведено, а отсутствие информации о линейном размере не позволяет его вычислить.
6. Для турбулентных течений, рассмотренных в диссертации, описание метода моделирования турбулентности приведено недостаточно полно.
7. Для большинства задач оценка эффективности предлагаемых модификаций численного алгоритма производится путем сравнения с экспериментальными данными, а не с «эталонным» решением на заведомо мелкой сетке. Этот подход может привести к ложным выводам, поскольку отличие результатов расчета от экспериментальных данных кроме ошибок дискретизации может быть обусловлено особенностями проведения эксперимента, несовершенством модели турбулентности в расчете и другими причинами, не связанными с рассматриваемыми численными алгоритмами. В итоге есть опасность того, что улучшение согласования будет вызвано компенсацией ошибок, а не снижением ошибки дискретизации.
8. В разделе 2.4 рассматривается сверхзвуковое обтекание осесимметричного тела, однако приведенная на рис. 2.4.3 и 2.4.4 сетка является несимметричной. Причина этого непонятна и требует объяснения.
9. В автореферате описание разработанных методов приводится в сокращенной форме, в результате некоторые обозначения не имеют пояснения.

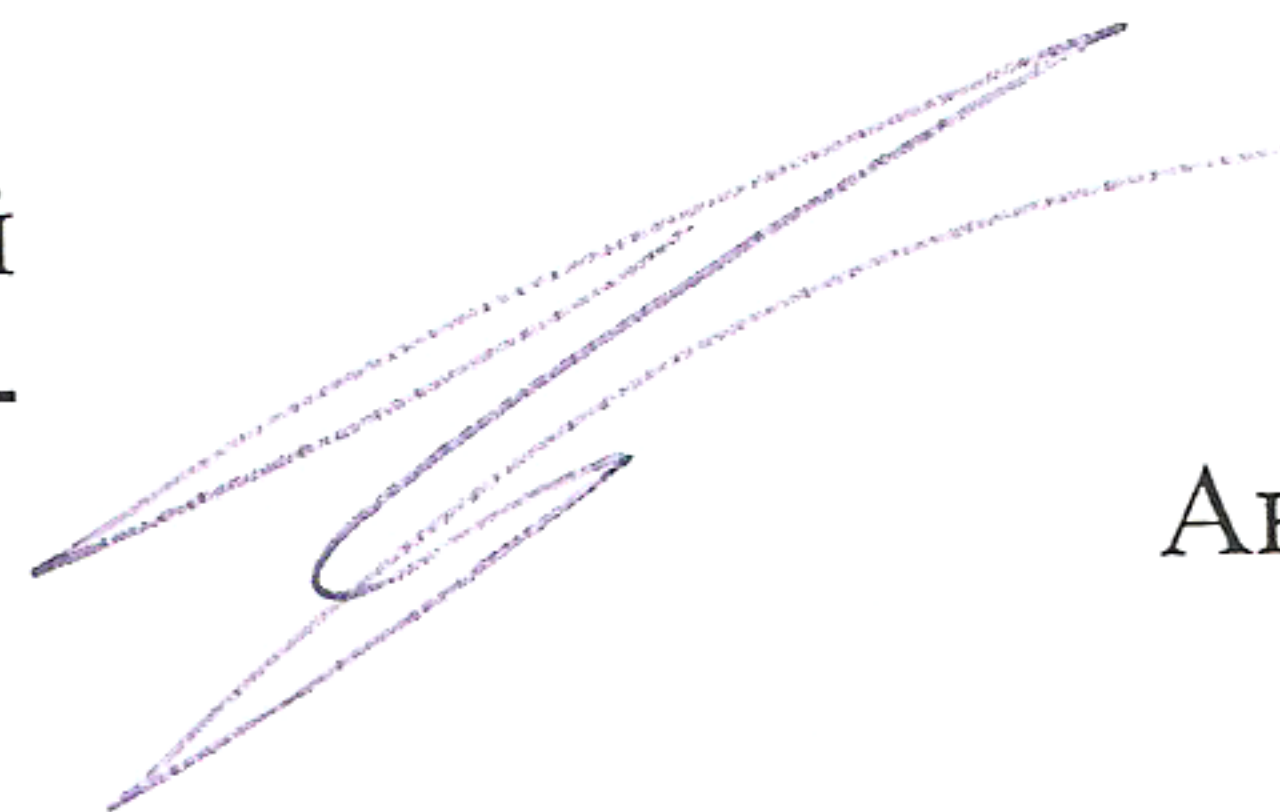
Несмотря на отмеченные замечания, считаю, что они не влияют на положительную оценку диссертационной работы, которая имеет высокий научный уровень. Считаю, что диссертация Стручкова Андрея Викторовича представляет собой законченное актуальное исследование, имеющее важное методическое, научное и практическое значение. Тема диссертации и полученные результаты соответствуют специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы». Название отвечает содержанию работы, а полученные результаты многократно обсуждались на всероссийских и международных конференциях, а также в полном объеме опубликованы в открытой печати и ободрены ведущими специалистами.



Отдельно отмечу, что автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

Считаю, что работа Стручкова Андрея Викторовича соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а диссертант достоин присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Профессор Высшей Школы Прикладной  
Математики и Вычислительной Физики Физико-  
Механического Института, д.ф.-м.н., доцент



Гарбарук  
Андрей Викторович

Сведения об организации: Федеральное государственное образовательное автономное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Адрес организации: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

Рабочий телефон: 8(812)3294792

E-mail: office@spbstu.ru



Гарбарук А.В.  
Состоверяю  
специалист  
Иван Васильевич  
11 2023 г.