

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Клюева Никиты Андреевича «Моделирование турбулентных течений с применением пенализированных пристеночных функций» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность диссертационной работы. Диссертационная работа посвящена разработке и обоснованию пенализированных пристеночных функций (ППФ) для повышения вычислительной эффективности расчетов турбулентных течений с помощью RANS подхода, реализованного в распараллеленном пакете NOISEtte. В работе предлагается несколько вариантов ППФ и метод искусственной анизотропной вязкости для повышения устойчивости расчетов на неструктурированных сетках. Создан модуль, инкорпорируемый в пакет NOISEtte. Проведены тестовые расчеты на модельных задачах и продемонстрировано применение разработанного инструмента для решения промышленно-ориентированной задачи обтекания воздушного судна. Работа согласуется с Перечнем основных направлений технологической модернизации РФ (5. Стратегические информационные технологии, включая вопросы создания суперкомпьютеров и разработки программного обеспечения). Проблематика диссертации находится в русле приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ (5. Интеллектуальные транспортные и телекоммуникационные системы, включая автономные транспортные средства) и связана с разработкой критических технологий РФ (13. Технологии создания доверенного и защищенного системного и прикладного программного обеспечения, в том числе для управления социальными и экономически значимыми системами). Диссертация подготовлена в пользующейся мировой известностью научной школе ИПМ им. М.В. Келдыша. Таким образом, представленную диссертацию можно признать актуальной.

Научная новизна этой фундаментальной работы несомненна.

1. Развита эффективная методология численного моделирования течений вязкого совершенного газа в рамках подхода RANS с интерпретацией турбулентности в рамках модели Спаларта–Аллмараса и с использованием модифицированного метода пенализированных пристеночных функций, реализованного в виде модуля в программном комплексе NOISEtte21 с применением технологий параллельного программирования MPI и OpenMP на языке C++.
2. Разработан метод адаптации положения точки сшивки решений, учитывающий локальные характеристики течения и пристеночное разрешение сетки, позволивший обобщить метод пенализированных пристеночных функций на случай отрывных течений.
3. Предложен подход к стабилизации численного решения в рамках метода пенализированных пристеночных функций на неструктурированных сетках, основанный на введении направленной искусственной вязкости в уравнение для расчёта скорости трения.
4. Создан с применением гибридного параллелизма (MPI + OpenMP) программный модуль, инкорпорируемый в пакет NOISEtte и реализующий метод пенализированных пристеночных функций с включением нового алгоритма адаптации точки сшивки и стабилизированного уравнения для скорости трения.
5. При решении модельных двумерных задач подтверждено снижение сеточной зависимости и повышение точности расчётов при использовании метода пенализированных пристеночных функций в сравнении с традиционным методом пристеночных функций.

6. Обоснована эффективность методологии численного моделирования турбулентного обтекания модели воздушного судна с использованием модифицированного метода пенализированных пристеночных функций в качестве примера решения промышленно-ориентированных задач аэродинамики и показано снижение требований к пристеночному разрешению расчётной сетки.

Квалификационная состоятельность работы как кандидатской диссертации по физико-математическим наукам по специальности 1.2.2 не вызывает сомнений.

Научная и практическая значимость работы вполне убедительные.

Разработка, реализация и верификация предложенной методологии численного моделирования турбулентных течений на основе метода ППФ позволяет проводить расчёты практически значимых задач с существенно меньшими вычислительными затратами без потери точности получаемого решения.

Апробация работы приемлемая (3 в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ). Статья в *Mathematical Models and Computer Simulations*.

Высокая степень достоверности численных прогнозов обеспечивается сравнением результатов моделирования с применением метода ППФ с данными расчётов, выполненных с помощью верифицированного на широком классе задач программного комплекса NOISEtte без применения методов пристеночных функций. Часть тестовых случаев основана на материалах ресурса NASA, посвящённого верификации и валидации численных реализаций моделей турбулентности, с данными которого также проводится сравнение.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 131 страницу текста с 59 рисунками и 2 таблицами. Список литературы содержит **105** наименований.

Диссертация Ключева Н.А. производит благоприятное впечатление. Тема не потеряла своей актуальности. Работа хорошо выстроена и замечательно соответствует канону диссертаций по численному моделированию. В ней есть аналитическая проработка материала, связанная с разработкой новых пристеночных функций для решения осредненных по Рейнольдсу (Фавру) уравнений Навье-Стокса. Есть записанный на C++ расчетный модуль, который подсоединяется к созданному в ИПМ им. М.В. Келдыша отечественному пакету NOISEtte. В ней присутствует тестовое исследование, связанное с решением двумерных модельных задач с акцентом на распараллеливание вычислительных операций. И, наконец, представляется решение с использованием разработанного инструмента промышленно-ориентированной задачи турбулентного обтекания воздушного судна на крейсерском режиме.

Несколько слов о теме диссертации. Для решения инженерных задач проблема эффективных и точных пристеночных функций в реализации RANS подхода остается актуальной. Оптимизация конструкций и выбор рациональных режимов эксплуатации требует значительных вычислительных ресурсов. Решаемые промышленные задачи отличаются пространственной архитектурой и нестационарными процессами. Особенно актуальными пристеночные функции были в 80-90-х годах прошлого века на заре компьютерного бума, когда расчетные сетки были экономными. Но и сейчас при наличии многоядерных комнатных станций ресурсов для решения задач не хватает, что стимулирует поиск упрощенных методов их решения. Поэтому выполненная работа важна для прикладной математики и практических приложений. Однако, несмотря на в целом положительное ее восприятие, возникает ряд замечаний и вопросов, касающихся ее улучшения.

1. По тематике пристеночных функций сложно добиться полноты обозреваемых литературных источников. Однако упомянуть две работы следует. Одна из них принадлежит оппоненту: Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. Учебное пособие. СПб: БГТУ, 2001. 107с. Вторая (на русском языке) вышла в организации, в которой работает диссертант. Луцкий А.Е., Северин А.В. Простейшая реализация метода пристеночных функций. // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2013. № 38. 22 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-38>

2. Опора на отечественный пакет NOISEtte похвальна, особенно в свете импортозамещения иностранного программного обеспечения. Однако нехорошо игнорировать зарубежные разработки Ф.Ментера и др., реализованные в пакетах ANSYS-Fluent, CFX, StarCCM+ и др. Ведь все равно возникает вопрос о мировой значимости представленной разработки для фундаментальной науки.

3. Следующие вопросы и замечания возникли в процессе чтения работы.

3.1. По умолчанию предполагается неструктурированность сетки до стенки, так? Или как обычно у стенки вводится слой структурированных ячеек.

3.2. Искусственная анизотропная вязкость - это чья разработка? Требуется ссылка.

3.3. Хотелось уточнить неплохо бы уточнить про ТПФ. Чьи они? Это не от Ментера?

3.4. Вопрос эффективности вычислений количественный! Требуются количественные оценки.

3.5. Хотелось бы разобраться со смыслом предложения «Идеи предложенного метода адаптации положения точки шивки могут быть использованы для индикации отрывных течений в других приложениях, основанных на некотором масштабе скорости».

Поразительный термин ИНДИКАЦИЯ требует расшифровки. Из ИНЕТа: Индикация – это процесс наглядного отображения информации о состоянии или параметрах работы оборудования. В связи с этим термином смысл масштаба скорости хотелось бы также уточнить.

3.6. еще одно предложение вызвало вопрос.

«Практическая значимость диссертации заключается в разработке, реализации и верификации методики численного моделирования турбулентных течений на основе метода ППФ, которая позволяет проводить расчёты практически значимых задач существенно меньшими вычислительными затратами без потери точности получаемого решения, что подтверждается решением широкого круга тестовых задач».

Существенно - это сколько; порядок величины?

Также имеется вопрос к предложению "При этом метод ППФ лишён недостатков, присущих традиционным методам пристеночных функций". Что это за недостатки?

3.8. Крайне важен вопрос, а если выбирается не СА-модель? Какова степень зависимости от выбранной модели турбулентности?

3.9. Нет количественных оценок эффективности ППФ в сравнении с ТПФ и отсутствию ТПФ.

3.10. О какой именно величине снижения точности решения идет речь при обсуждении снижения требований к пристеночному разрешению расчетной сетки для промышленно ориентированных задач аэродинамики?

3.11. Три варианта ППФ представлены, причем последний с градиентом давления. Трансформируется ли последний вариант во второй при отсутствии градиента давления?

3.12. Помимо ППФ вводится анизотропная искусственная вязкость для повышения устойчивости расчета. Но ведь здесь надо учитывать опору на методологию пакета NOISSEtte. Каково его влияние?

3.13. Какой из вариантов ППФ используется в NOISSEtte?

3.14. Странно, что ТПФ все-таки выдал ошибку на примитивной задаче развития ТПС на пластине? И для этой задачи все-таки надо было уточнить расчетные сетки структурированные и неструктурированные!!!

3.15. Не понял отличия прогнозов с ПФ от референтного решения на рис.6.

3.16. В таблице интегральных характеристик нет данных по ТПФ. Почему? Разница с экспериментом по C_m существенная. Как ее объяснить?

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Заключение

Указанные замечания не умаляют общей положительной оценки диссертации Клюева Никиты Андреевича, которая является законченной научно-квалификационной работой, посвященной разработке, обоснованию и применению пенализированных пристеночных функций для расчета турбулентных течений с помощью модифицированного пакета NOISSEtte. Выполненная работа удовлетворяет квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям, в том числе соответствует требованиям п.9 “Положения о присуждении ученых степеней”, а ее автор Клюев Никита Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент

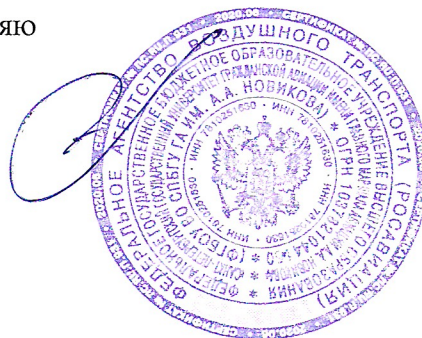
Заведующий лабораторией фундаментальных исследований Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации,
доктор физико-математических наук по специальности 01.02.05 механика жидкости, газа и плазмы, профессор

20 апреля 2026 года

isaev3612@yandex.ru 196210, СПб, Пилотов, 38, info@spbguga.ru, 9214045516

Подпись профессора Исаева С.А. заверяю

И.о. проректора по научной и инновационной работе



Г.А. Костин