



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

**Федеральное государственное
унитарное предприятие
РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР
Всероссийский
научно-исследовательский институт
экспериментальной физики
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)**

пр. Мира, д.37,
г. Саров, Нижегородская обл., 607188
Факс: 83130 25638 E-mail: staff@vniief.ru
ОКПО 07623615, ОГРН 1025202199791
ИНН 5254001230, КПП 525401001

07.07.2026 № 195-2025/198464

На № _____ от _____

Отзыв ведущей организации

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГУП «Российский ядерный
центр – ВНИИЭФ»

д.т.н., профессор



В.Е. Костюков

2026 г.

Отзыв

ведущей организации на диссертационную работу Ключева Никиты Андреевича на тему «Моделирование турбулентных течений с применением пенализированных пристеночных функций» по специальности 1.2.2. - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Актуальность темы исследования. Диссертационная работа Н.А. Ключева посвящена развитию методов пристеночного моделирования турбулентных течений в рамках осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS). Численное моделирование турбулентных течений с большими числами Рейнольдса остаётся одной из наиболее ресурсоёмких задач вычислительной аэродинамики. Основные вычислительные затраты связаны с необходимостью разрешения тонкого пограничного вблизи твёрдых поверхностей, что накладывает жёсткие ограничения на размер пристеночной ячейки расчётной сетки. Использование пристеночных функций позволяет снизить требования к сеточному разрешению, однако традиционные подходы часто демонстрируют зависимость решения от параметров сетки и способа дискретизации.

В работе исследуется и развивается перспективный метод пенализированных пристеночных функций (ППФ), основанный на дифференциальной формулировке условия сшивки внешнего решения с пристеночной функцией. Метод ППФ, сформулированный на уровне математической модели, а не её дискретного аналога, обладает потенциалом для преодоления недостатков традиционных методов. Диссертация направлена на расширение области применимости метода ППФ на отрывные течения с продольным градиентом давления, повышение устойчивости численного решения и демонстрацию эффективности метода для решения сложных прикладных задач аэродинамики.

Таким образом, тема диссертационной работы, связанная с разработкой экономических и точных методик моделирования турбулентного пограничного слоя, является актуальной как с научной, так и с практической точек зрения.

Научная новизна диссертационного исследования определяется комплексом оригинальных математических, алгоритмических и программных решений:

1. Предложен новый метод адаптации положения точки сшивки, основанный на учёте локального пристеночного разрешения расчётной сетки и параметров течения (величины трения и компонент градиента давления). Метод позволяет динамически смещать точку сшивки в вязкий подслои в областях отрыва и присоединения потока, что существенно повышает точность моделирования неравновесных течений.
2. Разработан подход к стабилизации численного решения уравнения для скорости трения на неструктурированных сетках путём введения анизотропной искусственной вязкости. Для её аппроксимации предложена компактная схема на основе метода локальных разбиений элементов (AES).
3. Создание программной реализации метода ППФ с предложенными модификациями в составе программного комплекса NOISEtte, включая поддержку гибридной параллелизации (MPI и OpenMP) для проведения расчётов на суперкомпьютерах.
4. Впервые проведен сравнительный анализ метода ППФ с традиционным методом пристеночных функций, наглядно продемонстрировавший снижение сеточной зависимости и повышение точности расчётов.
5. Эффективность метода ППФ с предложенными модификациями продемонстрирована результатами расчётов широкого класса двумерных и трёхмерных задач, включая промышленно-ориентированное моделирование обтекания самолёта с посадочной механизацией.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы. Теоретическая значимость диссертации заключается в переносе идей метода характеристических штрафных функций на новую область - методы пристеночных функций. Предложенный метод адаптации положения точки сшивки, основанный на локальных параметрах течения (градиенте давления), является универсальным и не требует подбора эмпирических констант для каждой задачи.

Практическая значимость работы определяется созданием, программной реализацией и верификацией методики численного моделирования турбулентных течений с применением метода ППФ в рамках программного комплекса NOISEtte. Разработанная методика позволяет проводить расчёты практически значимых аэродинамических задач с существенно меньшими вычислительными затратами (в 2,5 - 3 раза быстрее по времени сходимости и с сокращением объёма сетки до 30 - 40%) без потери точности, что особенно важно при параметрических исследованиях и оптимизации.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в научных и образовательных организациях, занимающихся численным моделированием турбулентных течений в авиационных и других областях (ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, ИТПМ СО РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, МАИ, СПбПУ, и др.).

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений

Достоверность результатов, полученных с применением разработанного автором метода пенализированных пристеночных функций, подтверждается сравнением с референсными

решениями, рассчитанными на подробных сетках с разрешением вязкого подслоя без использования пристеночных функций. Проводилось сопоставление результатов моделирования с данными из тестовых примеров ресурса NASA Langley Research Center Turbulence Modeling Resource, а также с экспериментальными данными. В работе проведено исследование влияния сеточного разрешения на получаемое решение и продемонстрировано хорошее согласие с референсными данными, что свидетельствует о надёжности предложенных модификаций метода и достоверности полученных научных выводов.

Соответствие паспорту специальности ВАК

Область исследования соответствует формуле специальности 1.2.2 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Диссертационная работа соответствует следующим пунктам области исследования паспорта специальности:

1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.
2. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.
3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.
8. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на 6 конференциях. По теме диссертации опубликовано 3 печатные работы в изданиях, входящих в перечень ВАК, 2 из которых индексируются в международных базах данных Web of Science и Scopus. Одна из статей опубликована без соавторов.

Содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и литературы. Общий объём работы составляет 131 страницу, включая 59 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 105 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология, положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации работы и публикациях автора.

Первая глава содержит обзор литературы по методам пристеночного моделирования и пристеночным функциям. Проведён анализ существующих подходов: от классических работ Патанкара и Спалдинга до современных методов, применяемых в моделировании крупных вихрей (LES) и RANS. Подробно рассмотрены традиционные методы пристеночных функций, их преимущества и недостатки, включая сеточную зависимость и вариативность их реализации. Отдельное внимание уделено аналитическим пристеночным функциям и способам их согласования с моделями турбулентности. Обзор выполнен на хорошем уровне и даёт чёткое представление о месте метода ППФ среди существующих подходов.

Вторая глава посвящена математической модели турбулентного обтекания с применением метода ППФ. Представлена система осреднённых по Фавру уравнений Навье-Стокса с моделью турбулентности Спаларта-Аллмараса. Детально описан вывод уравнения для скорости трения в методе ППФ, основанный на идеях метода характеристических штрафных функций. Центральным результатом главы является разработка новых методов адаптации положения точки сшивки внешнего решения и пристеночной функции. Автором описаны и исследованы три варианта: метод с простым ограничением скорости трения, метод с учётом локального пристеночного разрешения сетки и, наиболее совершенный, метод на основе учёта продольного и нормального градиентов давления. Два последних метода предложены автором в рамках диссертационной работы. Метод, основанный на нормальном градиенте давления, позволяет динамически смещать точку сшивки в областях неравновесного пограничного слоя и отрывных течений, что принципиально расширяет область применимости метода.

В третьей главе описывается методика численного решения уравнений математической модели. Подробно изложены процедуры расчёта с применением методов ППФ и традиционных пристеночных функций (ТПФ), численные схемы для решения уравнений RANS и модели турбулентности, а также метод решения уравнения для скорости трения. Важным вкладом является предложенный автором метод стабилизации численного решения на неструктурированных сетках на основе введения анизотропной искусственной вязкости в уравнение для скорости трения. Разработана аппроксимация оператора вязкости на основе метода локальных разбиений элементов (AES) с использованием метода Галёркина с кусочно-линейными базисными функциями. Также описаны вспомогательные процедуры метода ППФ, такие как устранение непостоянства положения точки сшивки вдоль нормалей и распространение величины пристеночного шага в объём сетки, позволяющие применять предложенные методы адаптации положения точки сшивки в задачах со сложной конфигурацией и геометрией течения.

Четвёртая глава представляет параллельную реализацию разработанной методики в программном комплексе NOISEtte. Описана архитектура модуля ППФ, его интеграция в существующий код с использованием технологий параллельного программирования MPI и OpenMP. Приведены результаты оценки параллельной эффективности на суперкомпьютере K-60 (с использованием до 896 процессорных ядер), демонстрирующие хорошую масштабируемость и незначительное (менее 10%) снижение эффективности по сравнению с базовой версией комплекса.

Пятая глава содержит результаты численного решения широкого круга тестовых и практически значимых задач: обтекание плоской пластины без градиента давления, обтекание пластины с неблагоприятным градиентом давления (отрывное течение), трёхмерное обтекание выпуклости в канале, обтекание аэродинамического профиля NASA 0012 при различных углах атаки, а также обтекание модели самолёта с посадочной механизацией CRM-HL. Проведён детальный сравнительный анализ метода ППФ с традиционным методом пристеночных функций и с референсными расчётами на сетках с разрешённым вязким подслоем. Продемонстрировано, что метод ППФ обеспечивает существенно меньшую сеточную зависимость, повышенную точность в областях отрыва и позволяет использовать расчётные сетки с пристеночным шагом, в десятки раз превышающим шаг, необходимый для разрешения вязкого подслоя.

В заключении сформулированы основные результаты работы, подчеркнута их значимость и намечены направления дальнейших исследований.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Со стороны ведущей организации к диссертационной работе имеются следующие **замечания и вопросы**.

1. Предложенный метод связан с решением дифференциального уравнения для нахождения трения на стенке, поэтому для практического использования данного метода важно оценить типичное время выполнения данной процедуры, по сравнению с общим временем одной итерации решения. В диссертации информация по данному вопросу отсутствует.
2. Замена алгебраических соотношений дифференциальными уравнениями в некоторых случаях может увеличить количество необходимых итераций для нахождения решения, что увеличит общее время расчета. В диссертации информация по данному вопросу отсутствует.
3. В предложенном методе вводится дополнительная «степень свободы» – коэффициент искусственной вязкости, оптимальное значение которого исследуется всего лишь на одной задаче. По нашему мнению, необходимо больше численных экспериментов, в том числе на более сложных геометриях.
4. В методе ППФ_р параметры C_{pt} и C_{pn} подбирались при решении задачи обтекания профиля NACA 0012 под углом атаки 5° таким образом, чтобы обеспечить устойчивость расчёта при наиболее близком к стенке положении точки сшивки. Насколько критичен этот выбор? Меняются ли рекомендованные значения при переходе к другим числам Рейнольдса или к другой геометрии?
5. В главе 5 указано, что в расчетах использовались исходный и оптимизированный наборы параметров в пристеночной функции. Однако не ясно, как происходила оптимизация констант, только на задаче обтекания пластины или использовался более широкий круг задач?
6. В диссертации расчеты проводятся для слабосжимаемых течений с малыми числами Маха. Есть ли принципиальные ограничения метода ППФ для дозвуковых/сверхзвуковых течений?
7. В диссертации не приведена информация о соответствии изложенного материала направлениям исследований паспорта научной специальности 1.2.2 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Считаем, что это должно быть отражено с привязкой к конкретным разделам диссертационной работы.

Изложенные замечания не снижают ценности работы, полученных результатов и общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Ключева Никиты Андреевича «Моделирование турбулентных течений с применением пенализированных пристеночных функций» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научной задачи – разработки экономичной и точной методики численного

моделирования пристеночных турбулентных течений на основе метода пенализированных пристеночных функций.

Работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Ключев Никита Андреевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Диссертация обсуждена, и отзыв на диссертацию утвержден на заседании НТС НИО-08 ИТМФ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (протокол № 195-96/2798-ПР от «19» мая 2026 г.).

Председатель НТС НИО-08

Заместитель директора РФЯЦ-ВНИИЭФ
по приоритетному технологическому
направлению, заместитель научного
руководителя РФЯЦ-ВНИИЭФ, первый
заместитель директора ИТМФ –
начальник научно-исследовательского
отделения, доктор физико-
математических наук,
член-корреспондент РАН



Р.М. Шагалиев

Отзыв подготовил:

Начальник научно-исследовательского
отдела – главный конструктор по
направлению Логос Аэро-Гидро, доктор
физико-математических наук



А.С. Козелков

Сведения об организации: Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Федеральное государственное унитарное предприятие РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ»); 607188, Нижегородская обл. г.Саров, пр. Мира, д.37, Факс 83130 25638, E-mail: staff@vniief.ru.

Циберева Юлия Александровна
8 (83130) 28017