

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Клюева 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 диссертации. Численное моделирование турбулентных течений является неотъемлемой частью современного аэродинамического проектирования. Подходы на основе решения осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS) остаются основным инструментом для решения прикладных задач благодаря балансу между точностью и вычислительными затратами. Однако корректное моделирование пристеночных течений с большими числами Рейнольдса требует высокого разрешения сетки в пограничном слое, что существенно увеличивает стоимость расчётов, особенно для задач параметрической оптимизации и анализа сложных конфигураций.

Метод пенализированных пристеночных функций (ППФ) был разработан для ускорения расчетов за счет снижения требований к разрешению пограничного слоя. Метод основан на дифференциальной формулировке условия сшивки и был сформулирован в первую очередь для преодоления сеточной зависимости, возникающей у многих альтернативных методов. До начала исследований автора метод ППФ был реализован и протестирован лишь для узкого класса двумерных задач. В связи с этим развитие методики численного моделирования с применением метода ППФ, направленное на повышение точности моделирования отрывных течений и расширение применимости на случай трёхмерных промышленных расчётов на неструктурированных сетках, является актуальной научной задачей вычислительной аэродинамики.

Общая методология и методика исследования. В основе работы лежит математическая модель сжимаемого совершенного газа, описываемая осреднёнными по Фавру уравнениями Навье–Стокса с замыканием моделью турбулентности Спаларта–Аллмараса. Для моделирования пристеночной области применяется метод пенализированных пристеночных функций, который формулируется на уровне дифференциальных уравнений в частных производных для вспомогательного поля скорости трения.

Численная реализация выполнена в рамках вершинно-центрированного конечно-объёмного подхода с использованием противопоточных схем реконструкции (EBR) и неявной схемы интегрирования по времени. Программная реализация методики выполнена автором в виде модуля для параллельного программного комплекса NOISEtte с использованием технологий MPI и OpenMP. Проведён широкий спектр численных экспериментов по моделированию тестовых и практически значимых задач: от обтекания плоской пластины до трёхмерного обтекания модели пассажирского самолёта с выпущенной посадочной механизацией.

Степень обоснованности и достоверность научных положений. Все представленные в диссертации результаты получены с использованием строгих математических формулировок и современных численных методов, реализованных в верифицированном программном комплексе NOISEtte. Достоверность результатов подтверждается

сравнением с экспериментальными данными, с данными, полученными с помощью других авторитетных программных комплексов (например, CFL3D NASA), а также с результатами расчётов на подробных сетках с разрешённым вязким подслоем. Проведённые исследования сеточной сходимости и анализ точности решения на различных сетках свидетельствуют о корректности и надёжности предложенной методики.

Основные результаты диссертации опубликованы в 3 печатных работах, входящих в перечень ВАК, две из которых индексируются в Web of Science и Scopus. Результаты докладывались на 6 всероссийских и международных конференциях.

Научная новизна. Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан новый метод адаптации положения точки сшивки в методе ППФ, который основан на локальных характеристиках течения. Предложенный метод не зависит от настраиваемых под конкретную задачу констант. Это позволило успешно обобщить метод ППФ для моделирования отрывных турбулентных течений в присутствии продольного градиента давления.
2. Предложен подход к стабилизации численного решения метода ППФ на неструктурированных сетках путём введения анизотропной искусственной вязкости, локализованной вдоль нормалей к стенке. Для её аппроксимации разработана компактная схема на основе метода Галёркина.
3. Создана эффективная параллельная программная реализация метода ППФ с предложенными модификациями в рамках программного комплекса NOISEtte с использованием гибридного параллелизма (MPI+OpenMP).
4. Впервые проведён систематический сравнительный анализ эффективности метода ППФ и традиционных методов пристеночных функций, количественно подтвердивший преимущества метода ППФ по точности и сеточной независимости.
5. Впервые проведено тестирование разработанных модификаций метода ППФ на примере решения широкого класса задач внешней аэродинамики. Продемонстрирована применимость разработанной методики для моделирования обтекания модели самолёта с посадочной механизацией.

Теоретическая значимость работы состоит в дальнейшем развитии и обобщении метода пенализированных пристеночных функций, основанного на идеях метода характеристических штрафных функций. Предложенный метод адаптации положения точки сшивки, учитывающий градиент давления, является универсальным и может быть использован для индикации отрывных течений и в других приложениях, оперирующих масштабом скорости.

Практическая значимость диссертации определяется созданием, программной реализацией и верификацией экономичной и точной методики моделирования турбулентных пристеночных течений. Разработанная методика позволяет проводить расчёты аэродинамических характеристик летательных аппаратов и их элементов на расчётных сетках со значительно меньшим числом узлов в пограничном слое, что ведёт к существенному сокращению вычислительных затрат и времени моделирования.

Общая оценка содержания диссертации и её завершенность. Диссертация представляет

собой законченное, целостное научное исследование. Изложение работы хорошо и чётко структурировано: от обзора литературы и математической постановки к разработке численных методов, их программной реализации и верификации на возрастающем уровне сложности тестовых задач. Все поставленные цели и задачи достигнуты. Логика изложения последовательна, аргументация обоснована. Работа выполнена на высоком научном уровне. Автореферат адекватно и полно отражает основное содержание диссертационной работы, её основные положения, выводы и результаты.

Замечания

1. Для моделирования турбулентности в качестве модели замыкания уравнений RANS автор использует однопараметрическую модель Спаларта-Аллмараса, никак не обосновывая сделанный выбор. Требуется пояснить, почему именно этот подход был предпочтен другим распространенным моделям.
2. Представленный обзор по методам пристеночного моделирования недостаточно полон. Большинство статей из обзора вышли ранее 2016 года, некоторые важные методы не рассмотрены. Например, метод пристенной декомпозиции (NDD, Nearwall Domain Decomposition). Хотя он активно развивается и в настоящее время. Вышел ряд статей, посвященных применению метода NDD для нестационарных течений, течений с наличием ламинарно-турбулентного перехода.
3. В тесте по обтеканию модели самолета проводится непосредственное сравнение расчета с разрешением пристенной области и расчета с применением ППФ. В тесте не хватает сравнения с альтернативными подходами пристеночного моделирования. В других тестах проводится сравнение с некоторым обобщенным подходом, который автор называет традиционным (ТПФ), что не кажется удачным решением. Автор не обосновывает, почему предложенный вариант можно считать лучшим среди альтернатив. Целесообразнее сравниваться с актуальными альтернативными методами.
4. Предложенный автором метод моделирования направлен на ускорение расчетов. Тем не менее реальная оценка ускорения расчета с использованием ППФ приводится только для одного теста – обтекания профиля крыла. В других тестах, в частности наиболее практически значимом, обтекании модели самолета, не приводятся никакие конкретные измеримые показатели, насколько реально ускорился расчет по сравнению с расчетом без применения пристеночных функций.

Указанные замечания не снижают ценности работы. Таким образом, диссертация Ключева Никиты Андреевича «Моделирование турбулентных течений с применением пенализированных пристеночных функций» является научно-квалификационной работой, в которой решена важная научно-прикладная задача разработки эффективной методики пристеночного моделирования турбулентных течений. Полученные результаты характеризуются научной новизной и практической значимостью. Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от

24.09.2013 г. № 842, а её автор Ключев Никита Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент,
к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры вычислительной физики,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»,

141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.
+7(917)5455935, mikhail.petrov@phystech.edu


(подпись)

Петров Михаил Николаевич

Подпись Петрова М.Н.
удостоверяю:

ФИО и подпись удостоверяющего

Дата 18.05.2026

Гербовая печать



ЗАВЕРЯЮ
УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
УЧЕНОГО СОВЕТА МФТИ
ЕГ ЧЗБЕВ