

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

член-корр. РАН, доктор физ.-мат. наук

Якобовский М.В.



_____ 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Диссертация «Моделирование турбулентных течений с применением пенализированных пристеночных функций» выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

В период подготовки диссертации соискатель Клюев Никита Андреевич обучался в очной аспирантуре Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

В 2022 году он окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по специальности «Информатика и вычислительная техника».

Научный руководитель — кандидат физико-математических наук Жданова Наталья Сергеевна, старший научный сотрудник отдела № 8 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность темы диссертации обусловлена эффективностью применения численных расчетов для решения широкого класса промышленных задач аэродинамики и необходимостью разработки точных и экономичных методов математического моделирования пристеночных областей турбулентных течений, свободных от недостатков существующих подходов.

Целью диссертации является разработка эффективной методики моделирования пристеночных областей турбулентных течений на основе метода пенализированных пристеночных функций (ППФ).

Для достижения поставленной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Модификация метода ППФ для повышения точности решения задач с особенностями течения, включая точки отрыва и присоединения потока.
2. Повышение устойчивости разрабатываемой методики численного моделирования пристеночных турбулентных течений.
3. Параллельная реализация метода ППФ для расчёта на трёхмерных неструктурированных сетках.
4. Тестирование и верификация метода ППФ для численного моделирования турбулентного пограничного слоя на модельных задачах.
5. Сравнительный анализ применимости разработанной методики и традиционных методов пристеночных функций.

Основные результаты диссертации:

1. Развита метод адаптации положения точки сшивки решений для повышения точности расчета задач с особенностями течения при использовании метода ППФ.
2. Разработан устойчивый метод численного решения уравнения для определения скорости трения и выполнена численная реализация этого метода с применением локальных разбиений элементов для аппроксимации направленной искусственной вязкости.
3. Выполнена программная реализация методики моделирования турбулентных течений на основе метода ППФ с предложенными модификациями для двумерных и трехмерных задач в программном комплексе NOISEtte с применением технологий двухуровневого распараллеливания MPI + OpenMP.
4. Получены и проанализированы результаты верификации разработанной методики моделирования турбулентных течений на основе метода ППФ с предложенными модификациями.
5. Проведен сравнительный анализ численного решения тестовых задач с применением модифицированного метода ППФ и традиционного метода пристеночных функций. Продемонстрировано существенное снижение зависимости результатов расчётов от детализации расчётной сетки и повышение точности результатов при использовании метода пенализированных пристеночных функций.

Личный вклад соискателя заключается в модификации метода ППФ для повышения точности моделирования турбулентных течений с особенностями, обусловленными наличием продольного градиента давления, разработка метода повышения устойчивости численного расчёта с применением модифицированного метода, программная реализация в программном комплексе NOISEtte трёхмерного варианта метода ППФ и всех предложенных модификаций, проведение всех описанных в работе расчётов и анализ полученных результатов. Все результаты диссертации получены лично соискателем при научном руководстве Н.С. Ждановой.

Научная новизна заключается в следующем:

Разработан новый метод адаптации положения границы сшивки, основанный на учёте локальных характеристик течения и сеточного разрешения. Применение предложенного подхода позволяет значительно повысить точность метода пенализированных пристеночных функций для расчёта течений с областями отрыва и присоединения потока по сравнению с существующим вариантом.

1. Предложен новый подход включения искусственной анизотропной вязкости для метода ППФ, снижающий численные осцилляции при расчёте на неструктурированных сетках.
2. В рамках диссертации впервые проведено сравнение метода ППФ с другими методами пристеночных функций. Продемонстрированы на примере численного моделирования преимущества метода ППФ, которые раньше выдвигались только теоретически.
3. В диссертации представлена схема реализации метода ППФ для решения трёхмерных задач на неструктурированных сетках в виде модуля в программном комплексе NOISEtte.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что разработаны и реализованы модификации метода ППФ, позволяющие проводить расчёты практически значимых задач турбулентного обтекания с большей вычислительной эффективностью, то есть за меньшее время и при меньших компьютерных ресурсах при сохранении точности получаемого решения, что подтверждается решением различных тестовых задач. При этом метод ППФ свободен от недостатков традиционных методов пристеночных функций.

Достоверность полученных результатов обеспечивается сравнением результатов моделирования с применением метода ППФ с результатами расчётов, полученными с помощью программного комплекса NOISEtte (на

сетках с достаточным разрешением), без применения методов пристеночных функций и сравнением с работами других авторов и экспериментальными данными. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих рецензируемых научных журналах и изданиях из Перечня ВАК:

1. O. V. Vasilyev, N. S. Zhdanova, N. A. Kluev Comparative Study of Conventional and Penalized Wall Function Methods in Turbulent Flow Modeling // Mathematical Models and Computer Simulations. — 2024. — Vol. 16, Suppl 1. — S139—S161. (перечень ВАК, WoS, Scopus)
2. O. V. Vasilyev, N. S. Zhdanova, N. A. Kluev. Penalized Wall Function Method with Dynamic Solution Matching in the Separation and Reattachment Regions // Lobachevskii Journal of Mathematics. — 2024. — Vol. 45, no. 11. — P. 5932—5947. (перечень ВАК, WoS, Scopus)

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

Заключение принято на заседании научного семинара «Новые методы решения задач прикладной математики» им. К.И. Бабенко ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Присутствовало на заседании 15 чел. Выступили с положительной оценкой диссертации: В.Т. Жуков, А.Е. Луцкий, Т.К. Козубская.

Результаты голосования:

"за" — 15 чел., "против" — 0 чел., "воздержалось" — 0 чел..

Протокол № 1 от 25.06.2025 г.

Руководители

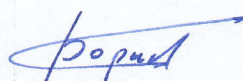


Жуков Виктор Тимофеевич
доктор физ.-мат. наук, г. н. с., и.о. зав. отд. №8



Рыков Юрий Германович
доктор математических наук, с. н. с. отд. №4

Ученый секретарь



Борисов Виталий Евгеньевич
кандидат физ.-мат. наук, с. н. с., отд. №11