

УТВЕРЖДАЮ

Директор

Института прикладной математики

им. М.В. Келдыша РАН

чл.-корр. РАН



А.И. Аптекарев

« 27 » ноября 2020 года

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

на диссертацию **Гарбарука Андрея Викторовича** «Численное моделирование и анализ устойчивости пристеночных турбулентных течений», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертация А.В. Гарбарука посвящена разработке математических моделей для численного моделирования пристеночных турбулентных течений, их всестороннему тестированию и применению для расчета сложных прикладных задач. В диссертационной работе, подробно описывающей научные достижения автора за последние 20 лет, даны формулировки широкого набора современных математических моделей и сопутствующих технологий, позволяющих достигать высокой точности численного предсказания разнообразных турбулентных течений жидкости и газа на вычислительных сетках различного разрешения. В работе представлены результаты расчетов исчерпывающего набора тестовых случаев, а также нескольких промышленно-ориентированных задач для конфигураций со сложной геометрией, требующих больших вычислительных затрат. Завершает работу описание методологии и алгоритмов для линейного анализа устойчивости стационарных решений уравнений Рейнольдса, корректность которых подтверждается результатами их верификации и применения для решения актуальной прикладной задачи.

Основная часть диссертации состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 285 стр. текста, включая иллюстрации и приложение. Список цитируемой литературы содержит 435 источников.

Во Введении определяются актуальность темы исследования и степень её разработанности, ставятся цели и задачи, раскрывается научная новизна диссертационной

работы, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, методология и методы исследования. Также во Введении сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится обзор современных методов, используемых для моделирования пристеночных турбулентных течений жидкости и газа, активно используемых в настоящее время. Обзор подкрепляется многочисленными ссылками на ключевые работы по теме диссертации. Сначала рассматриваются методы, основанные на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), приводится формулировка наиболее распространенных из них. Также в первой главе рассматривается текущее состояние в области вихререзающих подходов, при этом основной акцент делается на наиболее используемых в настоящее время гибридных RANS-LES методах семейства DES. В процессе аналитического обзора раскрываются не только основные достоинства, но и недостатки рассматриваемых подходов, которые в ходе работы над диссертацией были существенным образом смягчены или полностью устранены автором.

Вторая глава посвящена части новых методик, разработанных автором для усовершенствования полуэмпирических моделей турбулентности для замыкания уравнений Рейнольдса, расширяющие область их применения и улучшающие точность получаемых результатов. Среди наиболее интересных результатов отметим следующие. В работе представлена улучшенная модификация явной алгебраической модели Рейнольдсовых напряжений BSL EARSM, сформулирована нелинейная версия модели SST, предложена новая поправка на кривизну линий тока и вращения для модели SST Ментера (SST RC1), описана новая модель SST HL для расчета обтекания аэродинамических профилей при условиях, близких к срыву потока, разработана новая модификация модели Спаларта-Аллмараса (SA) для улучшения расчета осесимметричных течений (SA TC), а также сформулирована поправка модели SA для расчета пограничных слоёв при низких числах Рейнольдса (SA Low-Re). Далее, в разделе 2.2, описаны вычислительные алгоритмы и программные комплексы, которые использовались для реализации и тестирования разработанных моделей. Первый представляет собой внутренний исследовательский расчетный код NTS, работающий на структурированных многоблочных сетках. Второй – коммерческий программный комплекс ANSYS Fluent, работающий на неструктурированных сетках. Тестирование новых полуэмпирических моделей, результаты которого представлены в разделе 2.3, проведено на множестве репрезентативных расчетных случаев, представляющих собой известные канонические турбулентные течения, для которых имеются надёжные эталонные данные для сравнения. Все представленные результаты описаны достаточно подробно и чётко, они демонстрируют очевидный положительный эффект от применения новых разработанных моделей и технологий, сформулированных в разделе 2.1.

Третья глава, посвящённая усовершенствованию вихреразрешающих гибридных RANS-LES методов, как и предыдущая, состоит из трех частей: методической части, (раздел 3.1), описания вычислительных алгоритмов (раздел 3.2), сформулированных применительно к новым разработанным моделям, и раздела 3.3, в котором представлены результаты их верификации на заданном наборе тестовых случаев. Особое внимание в главе уделяется вопросам адаптации гибридных RANS-LES подходов DDES и IDDES к базовой модели SST и их модификации, направленной на решение одной из главных проблем «серой зоны», а именно на реализацию ускоренного перехода к развитой трёхмерной турбулентности в слоях смешения. Также в этой главе сформулирована технология применения зонных RANS-LES подходов с использованием объёмного источника турбулентных пульсаций, применимого для расчета задач в том числе на неструктурированных сетках. В дополнение к этому представлена новая, более гибкая и совершенная, функция взвешивания центрально-разностной и противопоточной аппроксимации конвективных потоков, использование которой обеспечивает эффективное использование гибридных RANS-LES методов в практических расчетах сложных турбулентных течений. Выбор тестовых случаев, на которых показаны преимущества предложенных методов и моделей, является достаточно репрезентативным. Он включает как достаточно простые несжимаемые канонические турбулентные течения, так и более сложные, в том числе сжимаемые, для которых имеются надёжные эталонные данные.

Четвертая глава диссертации содержит результаты численного моделирования высокорейнольдсовых сложных пристеночных турбулентных течений, демонстрирующих эффективность предложенных в главе 3 вихреразрешающих гибридных RANS-LES подходов для решения задач не только аэродинамики, но и аэроакустики. Сначала представлены результаты относительно «недорогих» (с точки зрения вычислительной стоимости) расчетов течений возле тандема цилиндров, трехэлементного профиля DLR-F15, конфигурации крыло-закрылок. Особую ценность не только в плане демонстрации эффективности разработанных автором методик, но и для практических целей, представляют результаты крупномасштабных расчетов нестационарных аэродинамических нагрузок на элементы пилотируемых космических кораблей, представленные в разделе 4.4. Главу завершает раздел 4.5, в котором представлены результаты рекордных по вычислительной стоимости расчетов трансзвукового обтекания выпуклости на цилиндрической поверхности как с помощью гибридного RANS-LES метода IDDES, так и прямого численного моделирования.

В заключительной, **пятой главе** диссертации сформулированы методики и алгоритм для линейного анализа глобальной устойчивости стационарных решений уравнений Рейнольдса. Верификация предложенного метода проведена на примере анализа устойчивости как ламинарных, так и турбулентных течений. Эффективность разработанной методики

продемонстрирована применительно к определению параметров начала трансзвукового бафтинга крыла для различных аэродинамических профилей.

В Заключение сформулированы основные научные результаты диссертации.

Оценивая диссертацию **в целом**, можно сказать, что автором внесен весомый вклад в развитие математических моделей и сопутствующих методик для эффективного расчета турбулентных течений жидкости и газа различного класса.

Актуальность данной работы не вызывает сомнений. Она обусловлена тем, что в настоящее время при возрастающем вовлечении численного моделирования в научные исследования и производственные высокотехнологичные процессы остро востребованы методы и модели, позволяющие численно воспроизводить широкий класс турбулентных течений с заданной высокой точностью.

Новизна результатов работы А.В. Гарбарука заключается, с одной стороны, в разработке ряда новых оригинальных модификаций полуэмпирических моделей турбулентности, расширяющих область их применения, а также новых версий вихреразрешающих гибридных RANS-LES подходов семейства DES вместе с сопутствующими вычислительными технологиями, повышающими эффективность их практического применения. С другой стороны, в работе получены новые данные, описывающие физические и аэродинамические свойства течений жидкости и газа, в том числе те, которые невозможно получить в рамках натуральных экспериментов (например, по аэродинамическим нагрузкам на поверхности ракет космического назначения).

Практическая значимость для науки и практики результатов работы заключается непосредственно в создании новых и модификации уже имеющихся методов и моделей, позволяющих с помощью численного моделирования изучать сложные турбулентные течения. Важным достоинством работы является то, что демонстрация эффективности разработок автора произведена как с помощью «структурированного», так и коммерческого «неструктурированного» программных комплексов, в которых они реализованы. Кроме того, в работе представлены практически значимые результаты расчетов сложных турбулентных течений возле сложных конфигураций. А разработанные алгоритмы для линейного анализа устойчивости стационарных решений уравнений Рейнольдса успешно применены для такой практически важной задачи, какой является задача определения условий возникновения трансзвукового бафтинга крыла.

Обоснованность и достоверность результатов подтверждена проведенным автором тщательным тестированием разработанных методик на основе ряда известных задач с последующим сравнением с доступными аналитическими выкладками, экспериментальными данными и эталонными численными результатами, полученными с помощью других программ.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в различных учебных, научных и промышленных организациях, проводящих высокотехнологичные исследования в области численного моделирования течений жидкости и газа и/или разрабатывающих собственные гидродинамические расчетные коды, таких как, например, ЦАГИ, ЦИАМ, МГУ, СПбПУ, Крыловский научный центр, ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, ИТПМ СО РАН, Институт теплофизики СО РАН, РФЯЦ ВНИИЭФ, предприятия, входящие в ОАК, ОДК и Роскосмос, и др. Отдельные результаты диссертации могут быть включены в спецкурсы по механике жидкости и газа и математическому моделированию.

Диссертация написана грамматически корректно, материал излагается чётко, ясно и с достаточной степенью подробности, структура работы логически продумана.

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

1. Для оценки возможности использования разработанных автором вихререзрешающих подходов на практике было бы полезно представить в работе более подробную информацию о вычислительной стоимости выполненных крупномасштабных расчетов (например, в терминах ядрочасов, необходимых для моделирования заданного временного интервала течения). Интерес представляет также сравнение стоимости расчетов с помощью различных использованных автором кодов (NTS и ANSYS Fluent) одной и той же задачи.
2. Одним из важнейших условий, определяющих устойчивость и эффективность расчетов сложных турбулентных течений с произвольной геометрией с помощью гибридных RANS-LES методов, является правильный выбор минимального веса (значение σ_{\min} в формуле 3.16) противопоточной диссипации в возмущённых областях потока. В тексте диссертации сказано, что «при решении сложных задач на не очень качественных сетках этот параметр может быть увеличен для повышения устойчивости алгоритма» (стр. 114). Отличалось ли данное значение от 0 при моделировании представленных в главе 4 задач (кроме течения возле тандема цилиндров) и каких максимальных значений оно достигало? Есть ли у автора критерии априорной оценки данного параметра, сформированные на основе его большого опыта проведения вихререзрешающих расчетов? Можно ли сформулировать сколь-нибудь универсальные критерии выбора минимального значения веса?
3. На наш взгляд, диссертацию мог бы обогатить раздел, систематизирующий все основные имеющиеся и новые, разработанные автором, полуэмпирические модели турбулентности и их модификации. Такой раздел имел бы не только очевидную практическую значимость, но и несомненную научную ценность.

Высказанные замечания не носят принципиального характера и нисколько не умаляют достоинств диссертационной работы А.В. Гарбарука, никак не снижая её высокую оценку. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая выполнена на высоком научном уровне и имеет важное научное и практическое значение. Тема работы безусловно актуальна и полностью соответствует специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы. Диссертация содержит имеющие научную и практическую ценность оригинальные результаты, касающиеся построения и исследования математических моделей для описания течений жидкости и газа, а также новые физические результаты, полученные на основе расчетов сложных турбулентных пристеночных течений и их анализа, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Работа прошла широкую апробацию на престижных отечественных и международных конференциях, все её результаты опубликованы в высокорейтинговых рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК. Автореферат диссертации вполне отражает ее содержание и основные результаты.

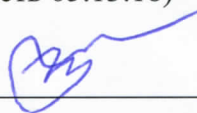
На основании изложенного считаем, что работа А.В. Гарбарука полностью удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО СПбПУ» в действующей редакции (пункты 2.1-2.8), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Андрей Викторович Гарбарук, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв обсужден и одобрен на Семинаре Института под руководством академика РАН Б.Н. Четверушкина и чл.-корр. РАН А.И. Аптекарева 29 сентября 2020 года (протокол № 1).

Главный научный сотрудник, и.о. зав. сектором ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
доктор физико-математических наук (специальность 05.13.18)



Козубская Татьяна Константиновна
Научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
кандидат физико-математических наук (специальность 05.13.18)



Дубень Алексей Петрович

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Адрес: 125047, г. Москва, Миусская пл., 4

Телефон: +7 499 978-13-14

Веб-сайт: <https://keldysh.ru/>

Электронная почта: office@keldysh.ru