

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

У.01.02.05 ФГАОУ ВО СПбПУ

по диссертации на соискание ученой степени доктора наук

аттестационное дело № ОДС-2020/5066
решение диссертационного совета
от 2 марта 2021 г. № 2

О присуждении ученой степени доктора физико-математических наук Гарбаруку Андрею Викторовичу, представившему диссертационную работу на тему «Численное моделирование и анализ устойчивости пристеночных турбулентных течений» по научной специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Принята к защите 11.09.2020 (протокол № 2) диссертационным советом У.01.02.05 СПбПУ.

Состав диссертационного совета утвержден в количестве 9 человек приказами ректора СПбПУ № 464 от «10» марта 2020 г. и № 1812 от «13» ноября 2020 г.

Соискатель Гарбарук Андрей Викторович 1970 года рождения, в 1996 году окончил Санкт-Петербургский государственный технический университет по специальности «Прикладная математика и физика» (диплом ЭВ № 031227).

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Современные полуэмпирические модели турбулентности для пристенных течений: тестирование и сравнительный анализ» по научной специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы защитил в 1999 году, в диссертационном совете, созданном на базе Санкт-Петербургского государственного технического университета (диплом КТ № 010435).

В период подготовки диссертации и на момент принятия диссертации к защите соискатель Гарбарук Андрей Викторович работал в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» в должности доцента ВШ ПМиВФ, ИПММ, а также в должности старшего научного сотрудника лаборатории «Вычислительная гидроаэроакустика и турбулентность» по внутреннему совместительству.

Диссертация выполнена в лаборатории «Вычислительная гидроаэроакустика и турбулентность» Научно-технологического комплекса «Математическое моделирование и интеллектуальные системы управления», Объединенного научно-технологического института, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный консультант - Стрелец Михаил Хаимович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией «Вычислительная гидроаэроакустика и турбулентность» Научно-технологического комплекса «Математическое моделирование и интеллектуальные системы управления», Объединенного научно-технологического института, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Официальные оппоненты:

1. Исаев Сергей Александрович, доктор физико-математических наук (01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы), профессор, заведующий лабораторией фундаментальных исследований, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации»;

2. Циркунов Юрий Михайлович, доктор физико-математических наук (01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы), профессор, профессор кафедры плазмодинамики и теплотехники, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»;

3. Утюжников Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук (05.13.16 – применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях), профессор, заведующий лабораторией математического моделирования нелинейных процессов в газовых средах, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», в своем положительном заключении, подписанном доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником и.о. зав. сектором Козубской Татьяной Константиновной и утвержденном директором ИПМ им. Келдыша РАН чл. корр. РАН Аптекаревым А.И., указала, что диссертация отвечает всем требованиям пп. 2.1-2.8 «Положения о присуждении учёных степеней» в ФГАОУ ВО «СПбПУ», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, А.В. Гарбарук, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Основные положения и выводы диссертационного исследования в полной мере изложены в 62 научных работах. В том числе в 39 публикациях в изданиях, индексируемых в международных базах данных, и в 18 публикациях в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК. Публикации полностью отражают основное содержание диссертации. Личный вклад соискателя состоит в разработке новых моделей и методов расчета турбулентных течений и анализа их устойчивости; проведении расчетов, обработке и анализе полученных результатов, подготовке публикаций.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Crouch J.D., Garbaruk A.V., Magidov D., Travin A.K. Origin of transonic buffet on aerofoils // Journal of Fluid Mechanics, Vol. 628, 2009. pp. 357–369.
2. Gritskevich M.S., Garbaruk A.V., Schütze J., Menter F.R. Development of DDES and IDDES Formulations for the $k-\omega$ Shear Stress Transport Model // Flow, Turbulence and Combustion, Vol. 88, No. 3, 2012. pp. 431–449.
3. Coleman G.N., Garbaruk A.V., Spalart P.R. Direct numerical simulation and theories of wall turbulence with a range of pressure gradients // Flow, Turbulence and Combustion, Vol. 95, No. 2-3, 2015. pp. 261–276.
4. Guseva E. K., Garbaruk A. V., Strelets M. Kh. Assessment of Delayed DES and Improved Delayed DES Combined with a Shear-Layer-Adapted Subgrid Length-Scale in Separated Flows // Flow Turbulence and Combustion, Vol. 98, No. 2, 2017. pp. 481–502.
5. Spalart P.R., Belyaev K.V., Garbaruk A.V., Shur M.L., Strelets M.K., Travin A.K. Large-Eddy and Direct Numerical Simulations of the Bachalo-Johnson Flow with Shock-Induced Separation // Flow, Turbulence and Combustion, Vol. 99, No. 3-4, 2017. pp. 865-885.
6. Crouch J.D., Garbaruk A.V., Strelets M.Kh. Global instability in the onset of transonic-wing buffet // Journal of Fluid Mechanics, Vol. 881, 2019. pp. 3-22.
7. Spalart P.R., Garbaruk A.V. A Correction to the Spalart-Allmaras Turbulence Model, Providing More Accurate Skin Friction in Boundary Layers at Low Reynolds Numbers // AIAA Journal Vol. 58, No. 5, 2020. pp. 1903-1905.

На диссертацию и автореферат поступило 9 положительных отзывов из:

1. Государственного научного центра «Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского». Отзыв подписан заместителем начальника отделения ФГУП ЦАГИ доктором технических наук, профессором Сергеем Михайловичем Босняковым и кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником отделения ФГУП ЦАГИ Алексеем Игоревичем Трошиным. В качестве замечаний указано:

1. Автор уделяет много внимания усовершенствованиям полуэмпирических моделей турбулентности, касаясь, судя по автореферату, только моделирования турбулентных

потоков импульса (напряжений Рейнольдса). На практике часто возникают задачи с теплообменом, при этом уточнению моделей турбулентных тепловых потоков внимание в работе не уделено.

2. При чтении автореферата складывается впечатление, что гибридная RANS-LES-модель и численный метод — почти независимые вещи: например, в разделе 3.1 автор модифицирует модели семейства DES и говорит об их точности, и только после этого в разделе 3.2 формулирует численную схему. В вихререзающих расчетах система уравнений и численный метод неразрывно связаны в единую математическую модель течения. Модификация любой из этих компонент может влиять на результат расчета. Изменение численного метода, как правило, требует перекалибровки коэффициентов модели. К сожалению, мысль о том, что численный метод является частью подхода LES, не звучит в автореферате явно.

3. В главе 5 линейный анализ устойчивости делается на базе модели турбулентности SA. Вызывает сомнения, что простая однопараметрическая модель турбулентности способна к корректному описанию развития нестационарных возмущений.

4. В автореферате не приводятся количественных сравнений моделей и методов. Неясно, например, является ли модель σ -DDES на основе SST более предпочтительной, чем SST-DDES с подсеточным масштабом ΔSLA . Недостаточно конкретно определены области применимости предлагаемых моделей и методов.

5. Выводы из работы заменены результатами, которые, в сущности, повторяют вводную часть текста.

2. Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук". Отзыв подписан ведущим научным сотрудником, доктором физико-математических наук, профессором РАН Андреем Владимировичем Горобцом. В качестве замечаний указано:

Что касается рекордов, конечно, для России расчет на 8-миллиардной сетке является очень крупным численным исследованием (мы вот пока только на 6 миллиардах узлов посчитались). Но в мире такими расчетами уже давно никого не удивишь. И дело тут в существенной степени в доступности вычислительных ресурсов. Но главное, конечно, не в сетках, а в том, что в работе представлен вычислительный эксперимент высокого качества. Поэтому, мне кажется, может и не стоило автору снисходить до того, чтобы меряться числом узлов. Ну и на рис. 13 можно было бы и указать, на каком именно α SST RANS так разбежался по Cr на предкрылке с экспериментом.

3. Федерального государственного унитарного предприятия «Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский Научно Исследовательский Институт Экспериментальной Физики». Отзыв подписан главным научным сотрудником, доктором физико-математических наук Юрием Николаевичем Дерюгиным. В качестве замечаний указано:

1. Имеются ряд опечаток (стр. 1., стр. 8).

2. Из-за краткости изложения материала в автореферате не обсуждаются вопросы качества сетки и ее влияние на результаты расчетов турбулентных течений.

4. Федерального государственного унитарного предприятия «Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский Научно Исследовательский Институт Экспериментальной Физики». Отзыв подписан начальником научно-исследовательского отдела, доктором физико-математических наук Андреем Сергеевичем Козелковым. В качестве замечаний указано:

1. Автореферат совсем не содержит описания разработанных моделей в формульном виде, надо было привести хотя бы основные модификации известных моделей (SA, SST).

2. Мало внимания уделено проблеме выбора и исследованию эффективности работы существующих подсеточных моделей турбулентности, функционирующих в LES области. Данный вопрос особенно актуален для задач внутренней гидродинамики (течения в гладких трубах), где отсутствуют условия для интенсивной турбулизации потока, обеспечение

баланса численной вязкости решения и подсеточной вязкости здесь существенно влияет на результат.

3. В автореферате отсутствует информация по программным решениям, используемым в качестве системы пре-постпроцессинга, включая генерацию сеточных моделей.

4. В автореферате совсем нет информации о способе реализации предлагаемых решений в рамках используемого академического кода. Нет информации об алгоритме распараллеливания (его эффективности) для решения на сетке в 8,3 млрд. ячеек.

5. Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет». Отзыв подписан профессором кафедры аэрогидромеханики, доктором физико-математических наук, профессором Александром Бенциановичем Мазо. В качестве замечаний указано:

1. Упоминание в автореферате имен выдающихся предшественников и современных исследователей турбулентности позволило бы читателю понять и оценить самопозиционирование автора в науке моделирования вихревых потоков.

2. Разнообразные модификации моделей турбулентности, предложенные в диссертации, не снабжены в автореферате достаточными комментариями с позиций механики жидкости и газа. Это затрудняет понимание побудительных мотивов введения новаций и понимание области приложения каждой усовершенствованной модели.

3. При представлении полученных результатов в автореферате отсутствуют сведения о числах Рейнольдса и параметрах сетки (шаги, сгущения, число узлов, за единственным рекордным исключением).

4. Диссертация вполне могла бы быть защищена и по специальности 05.13.18.

5. Диссертация имела бы завершённый вид и без последней главы. Научные и методические результаты этой главы, на мой взгляд, не вполне соответствуют вложенным гигантским затратам алгоритмических и вычислительных ресурсов.

6. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. Отзыв подписан заведующим лабораторией термогазодинамики, доктором физико-математических наук, профессором РАН Владимиром Викторовичем Тереховым. В качестве замечания указано:

Из автореферата можно лишь сделать вывод о том, насколько хорошо описывают разработанные автором модели динамику течения. К сожалению, такой интересный вопрос как предсказание тепло- или массообмена в сложных отрывных пристенных течениях в автореферате освещен достаточно слабо.

7. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. Отзыв подписан старшим научным сотрудником лаборатории физических основ энергетических технологий, доктором физико-математических наук, Рустамом Илхамовичем Мулляджановым и научным руководителем института, заведующим лабораторией проблем тепломассопереноса, доктором физико-математических наук, академиком РАН, Сергеем Владимировичем Алексеенко. В качестве замечаний указано:

1. Не отражен текущий вклад в развитие RANS-моделей методов машинного обучения.

2. Не упоминается роль немодальной теории устойчивости, основанной на неэрмитовых свойствами оператора эволюции в рамках линейной теории устойчивости.

8. ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева». Отзыв подписан начальником отдела аэрогазодинамики и теплообмена Максимом Викторовичем Михайловым и главным научным сотрудником отдела аэрогазодинамики и теплообмена, доцентом, доктором физико-математических наук Алексеем Кирилловичем Алексеенко. В качестве замечания указано:

При анализе устойчивости решений уравнений Рейнольдса не рассмотрены сценарии, связанные с немодовой неустойчивостью (Theferthen L.N. Hydrodynamic Stability without Eigenvalues// Science -1993.- v. 261 - N 5121. - pp. 578-584. Бойко А.В., Довгаль А.В., Сорокин

А.М. Немодовое нарастание стационарных возмущений ламинарного течения в зоне отрыва пограничного слоя // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 1. С. 109-115.)

9. Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет». Отзыв подписан ведущим научным сотрудником кафедры гидроаэромеханики, доктором физико-математических наук, Александром Григорьевичем Кузьминым и профессором кафедры гидроаэромеханики, доктором физико-математических наук, профессором Еленой Владимировной Кустовой. В качестве замечания указано:

В автореферате имеется несколько мелких опечаток, например, на стр. 1 в 9-й строке должно быть "включающему" вместо "включающий". Кроме того, автореферат выиграл бы, если бы, кроме констатации факта совпадения результатов вычислений с данными эксперимента по обтеканию тандема цилиндров, были приведены зависимости характеристик течения от удлинения цилиндров и, может быть, другие характеристики течения.

Ответы на замечания в отзывах на автореферат даны в ходе защиты.

Выбор ведущей организации и официальных оппонентов обосновывается их соответствием требованиям, установленным п.п. 3.12-3.17 «Положения о присуждении ученых степеней во ФГАОУ ВО СПбПУ», утвержденного приказом ректора ФГАОУ ВО СПбПУ от 19.10.2020 №1855. Оппоненты являются признанными специалистами в области механики жидкости и газа, численных методов и моделирования турбулентности. Ведущая организация Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН является одним из ведущих научных учреждений России.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- разработан ряд оригинальных модификаций двух полуэмпирических моделей турбулентности для расчета пристеночных турбулентных течений, а именно, модели переноса турбулентной вязкости Спаларта-Аллараса (SA модель) и двухпараметрической $k-\omega$ SST модели Ментера (SST модель): две нелинейные модели турбулентности, предназначенные для повышения точности расчета течений, в которых существенную роль играет анизотропия рейнольдсовых напряжений; новая поправка для учета влияния кривизны линий тока и вращения потока для модели SST; модификация модели SST, обеспечивающая повышение точности расчета обтекания аэродинамических профилей при условиях близких к срыву потока; две модификации модели SA, обеспечивающие повышение точности расчета осесимметричных течений и пограничных слоев при низких значениях числа Рейнольдса;
- предложены две модификации известных глобальных гибридных RANS-LES подходов (DDES и IDDES) на основе базовой SST модели, одна из которых повышает надежность предотвращения нежелательной активации LES-моды в присоединенных пограничных слоях, а другая позволяет без потери точности существенно упростить формулировку метода;
- расширена область применения двух эффективных методов ускорения перехода от полностью моделируемой к разрешенной турбулентности в оторвавшихся слоях смешения, разработанных для базовой SA модели, к гибридным RANS-LES подходам на базе SST модели;
- разработана эффективная технология реализации одностадийного зонного RANS-LES подхода с использованием объемных источников в уравнениях переноса импульса и кинетической энергии турбулентности для генерации турбулентного контента на интерфейсе между RANS и LES зонами, применимая на произвольных сетках;
- разработана новая гибридная конечно-объемная схема для аппроксимации невязких составляющих векторов газодинамических потоков в рамках глобальных гибридных RANS-LES подходов, одновременно обеспечивающая устойчивость алгоритма и высокую точность разрешения турбулентных вихревых структур при расчете как присоединенных, так и отрывных пристеночных течений;

- с использованием гибридных вихреразрешающих RANS-LES подходов получены новые данные об аэродинамических/аэроакустических характеристиках ряда сложных пристеночных течений: поперечное обтекание тандема цилиндров; обтекание трехэлементного аэродинамического профиля DLR-F15; обтекание модельной конфигурации крыло – закрылок; транс- и сверхзвуковое обтекание возвращаемого аппарата и отделяемого головного блока пилотируемого космического корабля в режимах взлета и аварийного отделения от ракеты-носителя;

- разработан новый зонный RANS-DNS-IDDES подход, с помощью которого выполнен расчет трансзвукового обтекания выпуклости на цилиндрической поверхности, сопровождающегося формированием скачка уплотнения с последующим отрывом и присоединением пограничного слоя;

- предложен новый подход к анализу глобальной устойчивости турбулентных течений, базирующийся на линейном анализе устойчивости стационарных решений уравнений Рейнольдса, с помощью которого определены параметры потока, отвечающие началу трансзвукового бафтинга прямого и стреловидного крыльев бесконечного размаха.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- разработаны новые полуэмпирические модели турбулентности и гибридные RANS-LES модели;

- изучены закономерности ряда турбулентных течений, представляющих значительный теоретический интерес;

- предложен новый подход к анализу глобальной устойчивости турбулентных течений и разработана соответствующая методология для проведения линейного анализа устойчивости стационарных решений уравнений Рейнольдса.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- повышена точность расчета ряда важных с практической точки зрения течений в рамках уравнений Рейнольдса;

- упрощена формулировка и повышена точность гибридных моделей DDES и IDDES на базе модели турбулентности SST;

- разработана новая гибридная схема для аппроксимации невязких составляющих газодинамических потоков, обеспечивающая повышение точности расчета в рамках глобальных гибридных RANS-LES подходов;

- получены детальные расчетные данные по нестационарным аэроакустическим нагрузкам на элементы пилотируемого космического корабля при полете в плотных слоях атмосферы;

- создана экономичная методология определения условий начала трансзвукового бафтинга крыла, и получены соответствующие расчетные данные для различных аэродинамических профилей крыла.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- использовались математические модели, основанные на фундаментальных законах сохранения механики жидкости и газа;

- полученные решения слабо зависят от расчетной сетки, шага интегрирования по времени и размеров расчетной области, что гарантирует отсутствие значительных вычислительных погрешностей;

- результаты, полученные в диссертации с использованием NTS кода, хорошо согласуются с результатами кода ANSYS FLUENT, прошедшего независимую верификацию;

- установлено хорошее согласование полученных результатов с экспериментальными данными и результатами прямого численного моделирования, известными из литературы.

Личный вклад соискателя состоит в разработке новых моделей и методов расчета турбулентных течений и анализа их устойчивости; проведении расчетов, обработке и анализе полученных результатов.

На заседании диссертационного совета У.01.02.05 СПбПУ 02.03.2021 принято решение о присуждении ученой степени доктора физико-математических наук Гарбаруку Андрею Викторовичу.

Присутствовало на заседании 8 членов совета, в том числе докторов наук по научной специальности рассматриваемой диссертации - 7. При проведении открытого голосования члены диссертационного совета по вопросу присуждения ученой степени проголосовали:

«за» 8,
«против» 0,
«воздержались» 0.

Председатель диссертационного совета




д.ф.-м.н. Смирнов Е.М.

Ученый секретарь диссертационного совета


к.ф.-м.н. Гусева Е.К.

02 марта 2021 г.