

На правах рукописи

Гусева Екатерина Константиновна

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ,  
ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ УСКОРЕНИЕ ПЕРЕХОДА К ЧИСЛЕННО  
РАЗРЕШАЕМОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ  
НЕЗОННЫХ ГИБРИДНЫХ ПОДХОДОВ К РАСЧЕТУ ТУРБУЛЕНТНЫХ  
ТЕЧЕНИЙ

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого”.

**Научный руководитель:**

кандидат физико-математических наук, доцент Гарбарук Андрей Викторович

**Официальные оппоненты:**

Емельянов Владислав Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой плазмогазодинамики и теплотехники Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Денисихина Дарья Михайловна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета

**Ведущая организация:**

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

Защита состоится 22 февраля 2018 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.232.30 на базе Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д.28, математико-механический факультет, ауд. 405

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9 и на сайте <https://disser.spbu.ru/files/disser2/disser/Kc3tLVbdYt.pdf>.

Автореферат разослан «    » декабря 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Е.В. Кустова

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Расчет турбулентных течений является одной из важнейших задач вычислительной гидродинамики, поскольку именно турбулентная форма движения газов и жидкостей чаще всего реализуется в природе и в различных технических устройствах. В настоящее время, как и на протяжении многих последних десятилетий, доминирующим подходом к решению этой чрезвычайно сложной задачи остается подход, базирующийся на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS), замкнутых с помощью той или иной полуэмпирической модели турбулентности. Однако этот подход имеет принципиальные ограничения, связанные с его полуэмпирической природой, что делает невозможным построение универсальной полуэмпирической модели. В связи с этим, а также благодаря быстрому росту производительности вычислительной техники, в последние десятилетия все большее практическое применение находят так называемые вихре-разрешающие методы моделирования турбулентности, в частности, метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES) и, в особенности, гибридные RANS-LES методы, сочетающие в себе сильные стороны RANS и LES. Разработке и усовершенствованию гибридных методов посвящено большое количество исследований, в результате которых в этом направлении был достигнут значительный прогресс, но, тем не менее, все существующие методы обладают теми или иными недостатками. В частности, серьезным недостатком наиболее продвинутых относительно экономичных и простых в реализации *незонных* RANS-LES подходов является задержка перехода от полностью моделируемой турбулентности в присоединенных к обтекаемой поверхности областях, описываемых с помощью RANS, к разрешенной турбулентности в оторвавшихся слоях смешения, описываемых в рамках LES (в дальнейшем – «задержка RANS-LES перехода»). Данный недостаток приводит к значительным, а для ряда течений - к недопустимо большим погрешностям определения основных характеристик потока и, таким

образом, существенно ограничивает возможности практического использования незонных гибридных RANS-LES подходов.

В результате усилий, направленных на решение этой проблемы, был предложен ряд методов, позволяющих в той или иной степени ускорить RANS-LES переход. Однако сведения о сравнительной эффективности этих методов, по существу, отсутствуют. Это связано с тем, что авторы методов, как правило, ограничиваются демонстрацией их возможностей на примере расчета одного-двух течений, что, очевидно, не обеспечивает возможности их всесторонней оценки. Кроме того, при проведении тестовых расчетов в разных работах используются различные численные методы, что, как известно, может ощутимо сказываться на результатах и, следовательно, затрудняет объективную оценку достоинств и недостатков предлагаемых путей сокращения размеров «серой области», как таковых. Таким образом, в настоящее время сведения об относительной эффективности известных методов решения данной проблемы являются весьма фрагментарными, что крайне затрудняет выбор того или иного из них при расчете турбулентных течений в рамках незонных гибридных RANS-LES подходов. Именно это обстоятельство делает настоящую работу весьма актуальной и определяет ее цель и конкретные задачи.

## **Цель работы**

Целью настоящей работы является анализ предложенных в последние годы методов ускорения формирования разрешенных турбулентных структур в оторвавшихся от обтекаемой поверхности слоях смешения в рамках незонных гибридных RANS-LES подходов к моделированию турбулентности и объективная оценка сравнительной эффективности наиболее перспективных из этих методов.

Конкретные задачи, которые необходимо решить для достижения этой цели, состоят в следующем.

1. Проведение аналитического обзора существующих методов ускорения RANS-LES перехода в оторвавшихся слоях смешения и выбор наиболее перспективных из них для дальнейшего *систематического* исследования.

2. Формирование «матрицы» тестовых течений, позволяющей провести всестороннее исследование эффективности выбранных методов, и математическая постановка соответствующих задач вычислительной гидродинамики.

3. Разработка «гибридной» численной схемы для расчета турбулентных течений в рамках незонных RANS-LES подходов, автоматически обеспечивающей устойчивость вычислительного алгоритма в RANS и низкую диссипативность в LES подобластях расчетной области и пригодную для расчета всех тестовых течений.

4. Программная реализация выбранных методов ускорения RANS-LES перехода и разработанной гибридной схемы на базе CFD кода NTS<sup>1</sup>.

5. Численное решение сформулированных задач, анализ полученных результатов и оценка достоинств и недостатков рассматриваемых методов ускорения RANS-LES перехода на основе сравнения соответствующих результатов с экспериментальными данными.

## **Научная новизна работы**

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Разработана методическая основа для объективной всесторонней оценки эффективности различных путей решения проблемы «серой области» (ускорения RANS-LES перехода в оторвавшихся слоях смешения) в рамках незонных гибридных моделей турбулентности. В частности:

- сформирована представительная «матрица» тестовых течений, позволяющих провести такую оценку;
- разработана новая гибридная схема аппроксимации невязких потоков в исходных уравнениях переноса, обеспечивающая устойчивость алгоритма и высокую степень разрешения турбулентных структур при расчете как присоединенных, так и отрывных течений.

---

<sup>1</sup> Shur M.L., Strelets M.K., Travin A.K. High-Order Implicit Multi-Block Navier-Stokes Code: Ten-Year Experience of Application to RANS/DES/LES/DNS of Turbulence [Электронный ресурс] // [https://cfd.spbstu.ru/agarbaruk/doc/NTS\\_code.pdf](https://cfd.spbstu.ru/agarbaruk/doc/NTS_code.pdf)

2. Получены новые результаты, объективно и всесторонне характеризующие эффективность двух перспективных методов, обеспечивающих ускорение RANS-LES перехода в оторвавшихся от обтекаемой поверхности слоях смешения при проведении расчетов в рамках незонных гибридных RANS-LES моделей турбулентности. Первый из них базируется на использовании адаптированного к слоям смешения подсеточного масштаба турбулентности (Shur, 2015)<sup>2</sup>, а второй представляет собой *оригинальную* модификацию метода (Mockett, 2015)<sup>3</sup>, основанного на использовании в LES области альтернативной подсеточной версии базовой RANS модели турбулентности, учитывающей квази-двумерный характер течения на начальном участке оторвавшегося слоя смешения.

### **Достоверность полученных результатов**

Все расчеты, проведенные в рамках настоящей работы, были выполнены с использованием разрабатываемого в лаборатории аэроакустики и турбулентности СПбПУ кода NTS, который рассматривается в настоящее время как один из наиболее надежных кодов для расчета турбулентных течений. Эта оценка базируется на сопоставлении результатов, полученных с его помощью, с результатами расчетов, выполненных с использованием различных коммерческих и академических кодов для расчета задач гидродинамики.

Кроме того, достоверность выводов диссертации гарантируется детальным физическим анализом результатов расчетов, на которых они основаны, с одной стороны, и сравнением этих результатов с экспериментальными данными и результатами численного моделирования, известными из литературы, с другой.

---

<sup>2</sup> Shur M.L. и др. An Enhanced Version of des with Rapid Transition from RANS to les in Separated Flows // Flow, Turbul. Combust. 2015. Т. 95, № 4. С. 709–737

<sup>3</sup> Mockett C. и др. Two non-zonal approaches to accelerate RANS to LES transition of free shear layers in DES // Notes Numer. Fluid Mech. Multidiscip. Des. 2015. Т. 130. С. 187–201

## **Практическая ценность работы**

Практическая ценность работы заключается, прежде всего, в определении наиболее эффективных методов ускорения процесса формирования разрешенных трехмерных структур в слоях смешения, оторвавшихся от обтекаемой поверхности: их использование позволит значительно повысить точность расчетов отрывных течений в рамках незонных гибридных подходов и снизить необходимые для этого вычислительные затраты.

Отметим также, что практическая ценность некоторых методических результатов работы не ограничивается рамками темы диссертации. Так, предложенная матрица тестов для оценки различных путей решения проблемы серой области может использоваться в других исследованиях, посвященных валидации различных методов моделирования турбулентности. То же относится и к гибридной схеме аппроксимации невязких потоков и к новой SST  $\sigma$ -DDES гибридной модели, которые могут применяться для расчета широкого круга турбулентных течений.

## **Результаты и положения, выносимые на защиту**

«Матрица» тестовых течений, позволяющая провести всестороннюю оценку эффективности методов ускорения перехода к численно разрешаемым турбулентным структурам в оторвавшихся слоях смешения.

Новая незонная гибридная RANS-LES модель SST  $\sigma$ -DDES, обеспечивающая значительное ускорение формирования разрешаемых турбулентных структур в оторвавшихся слоях смешения.

Новая гибридная численная схема для незонных гибридных RANS-LES подходов, обеспечивающая устойчивость и низкую диссипативность вычислительного алгоритма.

Новые результаты расчетов отрывных течений в сопоставлении с экспериментальными данными.

Результаты детального сравнительного анализа эффективности методов, обеспечивающих ускорение RANS-LES перехода в оторвавшихся от обтекаемой

поверхности слоев смешения при проведении расчетов в рамках незонных гибридных RANS-LES моделей турбулентности.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы были представлены на следующих российских и международных конференциях и семинарах:

1. XX школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева (Звенигород, 2015)
2. Международная молодежная конференция Физика.СПб (Санкт-Петербург, 2015)
3. 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS (Греция, 2016)
4. Международная молодежная конференция Физика.СПб (Санкт-Петербург, 2016)
5. 11th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements (Italy, 2016)
6. XXI школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева (Санкт-Петербург, 2017)
7. Доклад на видеосеминаре по аэромеханике ЦАГИ - ИТПМ СО РАН - СПбПУ - НИИМ МГУ (Санкт-Петербург, 2017)
8. Международная молодежная конференция Физика.СПб (Санкт-Петербург, 2017)

### **Публикации по теме диссертации и личный вклад автора**

Основные результаты исследований, представленных в диссертации, опубликованы в шести научных статьях, список которых приведен в конце диссертации. Эти статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК, а четыре из них – в журналах, индексируемых в базе данных Scopus.

Вклад диссертанта во все публикации является определяющим. Лично автором разработана модель SST  $\sigma$ -DDES и гибридная схема для аппроксимации невязких



составляющих векторов потоков в исходных уравнениях переноса, осуществлена их программная реализация, выполнены соответствующие расчеты, осуществлены их графическая обработка и анализ. Соавторы публикаций – д.ф.-м.н. Стрелец М.Х. и к.ф.-м.н. Гарбарук А.В. – осуществляли консультирование диссертанта по общим вопросам, связанным с моделированием турбулентности, со свойствами численных алгоритмов и с постановкой рассматриваемых в работе задач. Доктор A. Probst и доктор D. Schwamborn предоставили результаты их расчетов, выполненных в DLR с помощью вычислительного кода TAU, а к.ф.-м.н. М.Л. Шур и к.ф.-м.н. А.К. Травин - результаты расчетов с помощью зонных гибридных RANS-LES подходов. Эти результаты использовались автором для сравнения с аналогичными результатами, полученными в диссертации.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы, состоящего из 117 наименований. Работа изложена на 134 страницах машинописного текста, включая 84 рисунка и 2 таблицы.

### **Содержание работы**

Во введении обоснована актуальность темы, ее научная и практическая значимость, сформулированы цель и основные задачи исследования.

**В первой главе** представлен обзор существующих *незонных* гибридных RANS-LES подходов к моделированию турбулентности и методов ускорения перехода к разрешенной турбулентности в оторвавшихся слоях смешения.

В частности, в **Разделе 1.1** основное внимание уделяется принципам построения, а также достоинствам и недостаткам нашедших наиболее широкое практическое применение гибридных подходов данного класса, которые представляют собой развитие первого из таких методов Detached Eddy Simulation (DES<sup>4</sup>), предложенного в 1997г.

---

<sup>4</sup> Spalart P.R. и др. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach // Proceedings of first AFOSR international conference on DNS/LES. Ruston, Louisiana, USA, 1997. С. 137–147

В рамках DES для описания присоединенного пограничного слоя, населенного относительно мелкими универсальными вихревыми структурами, которые достаточно точно описываются полуэмпирическими моделями турбулентности, применяется RANS подход. В противоположность этому, в отрывной части потока, населенной крупными «отсоединенными» вихрями, принципиально зависящими от конкретной геометрии и режима течения, используется LES в сочетании с подсеточной версией используемой полуэмпирической модели турбулентности.

Как показали многочисленные дальнейшие исследования, оригинальная версия DES обладает рядом недостатков. Так, измельчение шагов расчетной сетки в рамках DES может привести к активации LES моды *внутри* пограничного слоя, в результате чего точность решения снижается, а при наличии неблагоприятного градиента давления может происходить даже ложный («индуцированный сеткой») отрыв пограничного слоя. Для устранения этого недостатка и обеспечения работы RANS ветви метода во всем присоединенном пограничном слое независимо от используемой расчетной сетки был предложен метод Delayed DES (DDES<sup>5</sup>). В настоящее время этот метод в сочетании с базовой  $k-\omega$  Shear Stress Transport (SST) моделью Ментера<sup>6</sup> считается одним из наиболее эффективных и широко используемых гибридных методов расчета отрывных течений. В связи с этим сравнительное исследование эффективности различных путей решения проблемы задержки RANS-LES перехода в оторвавшихся слоях смешения, которая, как уже отмечалось, является одной из наиболее важных и не до конца решенных проблем незонных RANS-LES подходов, проведено в диссертации именно в рамках SST DDES подхода.

Суть и причины задержки RANS-LES перехода в оторвавшихся слоях смешения обсуждаются в **Разделе 1.2** и состоят в следующем.

---

<sup>5</sup> Spalart P.R. и др. A New Version of Detached-eddy Simulation, Resistant to Ambiguous Grid Densities // Theor. Comput. Fluid Dyn. 2006. Т. 20, № 3. С. 181–195

<sup>6</sup> Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Т. 32, № 8. С. 1598–1605

При высоких числах Рейнольдса пограничный слой перед отрывом является турбулентным, поэтому оторвавшийся слой смешения также оказывается турбулентным и населенным достаточно мелкими трехмерными вихрями. Однако в рамках незонных гибридных подходов присоединенный пограничный слой описывается с помощью RANS, то есть не содержит разрешенных турбулентных структур и характеризуется высоким уровнем модельной турбулентной вязкости. В результате, на начальном участке слоя смешения, несмотря на формальное переключение метода в LES моду, отсутствуют разрешенные турбулентные структуры.

Процесс формирования разрешенных трехмерных турбулентных структур развивается по сценарию, который формально напоминает сценарий перехода к турбулентности в ламинарном слое смешения вследствие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. В результате, в расчетах оторвавшийся слой смешения сворачивается с образованием крупных квази-двумерных вихрей, а разрешенные трехмерные турбулентные структуры появляются лишь на некотором расстоянии от точки (линии) отрыва. Конвекция турбулентной вязкости из RANS подобласти, а также интенсивная генерация «подсеточной» вязкости на начальном участке оторвавшегося слоя смешения, связанная с сильной анизотропией расчетных сеток и большим градиентом скорости в этой области, приводят к высоким уровням «подсеточной» вязкости, в результате чего формирование разрешенной трехмерной турбулентности может происходить на достаточно большом расстоянии от отрыва. Это влечет за собой существенное искажение характеристик потока не только непосредственно в слое смешения, но и в течении в целом, и для повышения точности расчета необходимо тем или иным образом сократить длину области перехода от полностью моделируемой турбулентности в RANS подобласти к разрешенной турбулентности в LES подобласти.

Анализ известных методов решения этой задачи представлен в **Разделе 1.3** диссертации, являющемся ключевым разделом первой главы. Этот анализ свидетельствует о том, что наиболее эффективными из предложенных в настоящее время методов являются два подхода, основанных на учете особенностей расчетных

сеток и кинематики течения на начальном участке оторвавшихся слоев смешения, ответственных за высокий уровень подсеточной вязкости в этой области, а именно, сильной анизотропии сеток и квази-двумерного характера течения.

В рамках первого метода (Shur, 2015) снижение этого уровня достигается за счет соответствующей модификации определения величины подсеточного масштаба турбулентности, используемого в DES-подобных подходах (максимальный шаг ячейки расчетной сетки  $\Delta_{\max} = \max\{\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z\}$ ), вместо которого предлагается использовать адаптированный к слоям смешения (Shear-Layer-Adapted) масштаб  $\Delta_{\text{SLA}}$ . В отличие от масштаба  $\Delta_{\max}$ , этот масштаб в квази-двумерных областях потока не включает максимального шага сетки (на начальном участке слоя смешения максимальным обычно является шаг в трансверсальном направлении, от которого не должны зависеть характеристики турбулентности). Кроме того, в масштаб  $\Delta_{\text{SLA}}$  введена эмпирическая функция  $F_{KH}$  от кинематических характеристик потока, автоматически (в процессе расчета) определяющих квази-двумерные области потока. Эта функция построена таким образом, что на начальном участке слоя смешения подсеточный масштаб дополнительно (до 10 раз) уменьшается, что влечет за собой дополнительное (до 100 раз) падение уровня подсеточной вязкости.

Второй из упомянутых выше методов решения проблемы серой области основан на идее модификации подсеточных версий базовых дифференциальных RANS моделей, используемых в существующих незонных гибридных подходах типа DES в LES подобласти. В частности, вместо традиционно используемых версий, которые в равновесии (т.е. при равенстве генерации и диссипации подсеточной турбулентности) переходят в алгебраическую подсеточную модель Смагоринского, предлагается использовать версии, переходящие в равновесии в ту или иную алгебраическую подсеточную модель, обеспечивающую нулевую подсеточную вязкость в квази-двумерных областях потока (областях «чистого сдвига»). В качестве таковой в работе (Mockett, 2015) предложено использовать подсеточную модель  $\sigma^7$ . В результате построена незонная  $\sigma$ -DDES модель, представляющая собой

---

<sup>7</sup> Nicoud F. и др. Using singular values to build a subgrid-scale model for large eddy simulations // Phys. Fluids. 2011. Т. 23, № 8

модификацию DDES подхода на основе базовой RANS модели Спаларта-Аллмараса. Однако, как отмечается в Разделе 1.1, предпочтительной базовой RANS моделью для DDES является модель SST. Это послужило стимулом для построения в диссертации новой версии  $\sigma$ -DDES, основанной на этой модели.

В **Главе 2** представлена математическая формулировка рассматриваемых методов. В частности, в **Разделе 2.1** приведены уравнения движения, в **Разделе 2.2** приведены математические формулировки стандартного (использующего линейный подсеточный масштаб  $\Delta_{\max}$ ) метода SST-DDES, а в **Разделах 2.3 и 2.4** – формулировки разработанного в диссертации метода SST  $\sigma$ -DDES и метода DDES в сочетании с адаптированным к слоям смешения подсеточным масштабом  $\Delta_{SLA}$ .

Главной отличительной особенностью SST  $\sigma$ -DDES подхода является способ определения генерационного слагаемого в уравнении переноса кинетической энергии турбулентности. В частности, вместо инварианта тензора скоростей деформации  $S^2 = 2S_{ij}S_{ij}$  в этом члене используется выражение

$$S_{\sigma-DDES}^2 = S^2 - \theta(f_d - 0.99)\theta(l_{RANS} - C_{DES}\tilde{\Delta}_\omega)(S^2 - B_\sigma^2 S_\sigma^2).$$

Здесь  $\theta(a) = \begin{cases} 0, & \text{if } a \leq 0 \\ 1, & \text{if } a > 0 \end{cases}$  - функция Хевисайда,  $f_d$  и  $C_{DES}$  - «защитная» функция

и эмпирическая константа метода SST DDES,  $l_{RANS} = k^{1/2}/(0.09\omega)$  – линейный масштаб базовой RANS модели турбулентности SST, а  $B_\sigma = 57$  – эмпирическая константа SST  $\sigma$ -DDES модели, значение которой подбиралось на основе сопоставления результатов расчетов процесса затухания однородной изотропной турбулентности с экспериментальными данными (см. рис. 1).

Полученная в результате описанной замены гибридная модель, так же как и стандартный метод SST DDES, в RANS подобласти (т.е. при  $C_{DES}\Delta > l_{RANS}$  и  $f_d < 0.99$ ) работает в режиме  $k$ - $\omega$  SST RANS. В то же время используемая в LES подобласти подсеточная версия этой модели переходит в равновесии не в модель Смагоринского (как в рамках стандартного метода), а в  $\sigma$ -модель, согласно которой подсеточная вязкость в квази-двумерных областях потока равна нулю.

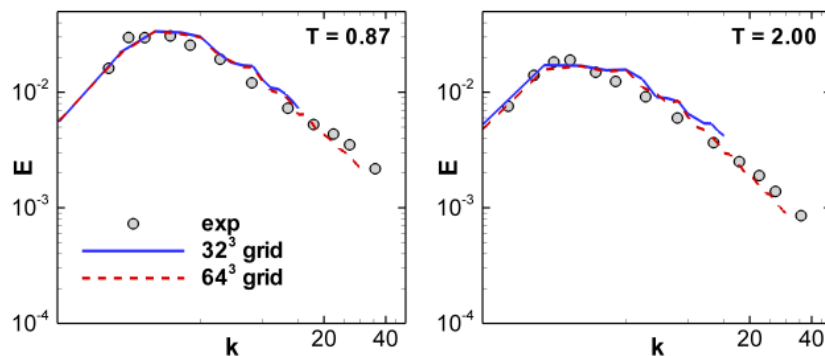


Рис. 1. Спектры разрешенной кинетической энергии турбулентности в задаче о затухании однородной изотропной турбулентности в безразмерные моменты времени  $T = 0.87$  и  $T = 2$ , рассчитанные с помощью подсеточной модели SST  $\sigma$ -DDES с константой  $B_\sigma = 57$  на двух сетках

**Глава 3** посвящена формированию тестовой базы для оценки возможностей двух представленных в главе 2 методов ускорения RANS-LES перехода в оторвавшихся слоях смешения. Эта тестовая база сформирована на основе анализа опубликованных экспериментальных исследований отрывных течений и результатов расчетов таких течений, направленных на валидацию незонных гибридных методов (в том числе расчетов, проведенных в рамках европейских проектов DESIDER, АТААС и Go4Hybrid, специально посвященных этой проблеме), и включает **шесть течений**:

- несжимаемое течение с массивной отрывной зоной (обтекание аэродинамического профиля NACA0021 под углом атаки  $60^\circ$ );
- два несжимаемых течения с локальной отрывной зоной и последующим присоединением потока, а именно, обтекание выпуклости на пластине (нефиксированный отрыв) и течение в канале с внезапным расширением (фиксированный отрыв);
- сверхзвуковое течение с фиксированным отрывом, формированием замкнутой отрывной области и переходом в ее след (продольное обтекание цилиндра с плоским донным срезом);
- трансзвуковое возвратное течение внутри выемки с фиксированным отрывом и присоединением оторвавшегося слоя смешения к поверхности (обтекание прямоугольной каверны, вмонтированной в пластинку);

- сложное трехмерное течение в проточной части двухконтурного авиационного двигателя.

Предлагаемая тестовая база включает широкий круг различных отрывных течений, при расчете которых с использованием незонных RANS-LES гибридов может существенно проявляться задержка перехода от полностью моделируемой турбулентности в RANS подобласти к разрешенной трехмерной турбулентности в LES подобласти. Кроме того, для всех этих течений в литературе имеются как достаточно надежные экспериментальные данные, так и результаты расчетов с использованием различных гибридных моделей. Это обеспечивает возможность всесторонней объективной оценки эффективности выбранных для анализа методов ускорения RANS-LES перехода.

Для всех тестовых течений в диссертации подробно представлены постановки соответствующих задач, в частности, конфигурации используемых расчетных областей, расчетные сетки и граничные условия.

**Глава 4** посвящена вычислительным аспектам рассматриваемой проблемы. Как уже отмечалось, результаты расчетов с помощью любых вихре-разрешающих подходов зависят от свойств используемых численных алгоритмов. Поэтому для объективной оценки методов ускорения RANS-LES перехода как таковых, получение которой является основной целью диссертации, для всех тестовых течений крайне желательно использовать единый численный метод.

В настоящее время для аппроксимации невязких составляющих векторов потоков в исходных уравнениях переноса в рамках незонных гибридных подходов общепринятым является использование различных вариантов взвешенных центрально-разностных и противопоточных схем, что, в принципе, позволяет одновременно добиться монотонности решения в RANS подобласти, низкой диссипативности схемы в LES подобласти, и устойчивости алгоритма в целом. Наиболее популярной из схем такого типа является гибридная схема (Travin, 2002)<sup>8</sup>,

---

<sup>8</sup> Travin A. и др. Physical and numerical upgrades in the detached-eddy simulation of complex turbulent flows // Adv. LES Complex Flows Proc. Euromech Colloq. 412. 2002. С. 239–254

в которой веса противопоточной и центрально-разностной схем определяются автоматически на основе анализа текущего решения и параметров используемой сетки. Однако эта схема была разработана для метода DES, применяемого, в первую очередь, для задач внешнего обтекания с массивными отрывными зонами. Из-за этого в пристенных течениях и течениях с умеренными отрывными зонами она работает не оптимально: противопоточная схема зачастую активируется в пограничных слоях, населенных разрешенными турбулентными структурами (LES подобласть), что приводит к диссипации разрешенных турбулентных структур, и в слоях смешения, что усугубляет проблему задержки RANS-LES перехода.

В связи с этим в настоящей работе была построена несколько иная взвешенная схема. В отличие от схемы (Travin, 2002), в невязком потоке и в присоединенных пограничных слоях, в которых отсутствует разрешенная турбулентность (RANS-область), эта схема переходит не в чисто противопоточную схему, а во взвешенную схему BCD (Bounded Central Differencing), которая является менее диссипативной, но, тем не менее, обеспечивает монотонность решения и устойчивость алгоритма. При этом в LES области (оторвавшиеся слои смешения и присоединенные области потока с разрешенными турбулентными структурами) используется низкодиссипативная центрально-разностная схема.

В рамках предложенной схемы аппроксимация невязких потоков  $F$  в исходных уравнениях переноса имеет вид:

$$F = (1 - \sigma)F_{CD} + \sigma F_{BCD}.$$

Здесь  $F_{CD}$  – значения невязких составляющих векторов потоков, определенные с помощью центрально-разностной схемы 4-го порядка точности, а  $F_{BCD}$  – значения невязких потоков, определенные с помощью схемы BCD, построенной как взвесь противопоточной схемы 3-го порядка и центрально-разностной схемы 4-го порядка. Наконец,  $\sigma = \max(\sigma_{\min}, f_{inv}, f_{vt}, f_{2D\ BL})$  представляет собой эмпирическую весовую функцию, обеспечивающую автоматическое переключение с одной схемы на другую. Аргументами этой функции являются минимально допустимое значение веса BCD схемы  $\sigma_{\min}$ , (оно задается пользователем), и функции  $f_{inv}$ ,  $f_{vt}$ ,  $f_{2D\ BL}$ . Эти функции позволяют автоматически (в процессе расчета) идентифицировать области течения,



в которых используется та или иная схема аппроксимации, а именно, невязкий поток, области двумерного присоединенного пограничного слоя, не содержащего разрешенные турбулентные структуры и области, в которых имеются разрешенные турбулентные структуры.

Описанная схема реализована в NTS коде, и ее эффективность продемонстрирована в заключительной части четвертой главы (**Раздел 4.2**) на примере расчетов двух тестовых отрывных течений (обтекание профиля NASA 0012 под углом атаки 60 градусов и сверхзвуковое продольное обтекание цилиндрического тела с донным срезом) в рамках стандартной модели SST DDES.

**Глава 5** представляет собой ключевой раздел диссертации. В ней подробно представлены и проанализированы результаты расчетов всех шести тестовых течений, полученные с использованием разработанной численной схемы в рамках стандартного SST DDES и его модификаций с применением двух выбранных методов ускорения RANS-LES перехода в оторвавшихся слоях смешения. Ниже в качестве примеров приводятся некоторые из этих результатов, которые свидетельствуют о том, что оба рассмотренных метода действительно позволяют значительно ускорить процесс формирования разрешенных трехмерных структур в слоях смешения и обеспечивает разрешение более мелких турбулентных вихрей в потоке в целом. Это отчетливо видно, в частности, на мгновенных полях завихренности, показанных на рисунке 2.

Данное преимущество рассматриваемых модификаций DDES само по себе имеет принципиальное значение при решении задач вычислительной аэроакустики. Наряду с этим, использование модифицированных моделей обеспечивает заметное улучшение согласования с экспериментом результатов расчета осредненных параметров потока, являющихся основными целевыми параметрами в задачах аэродинамики (см. рис. 3).

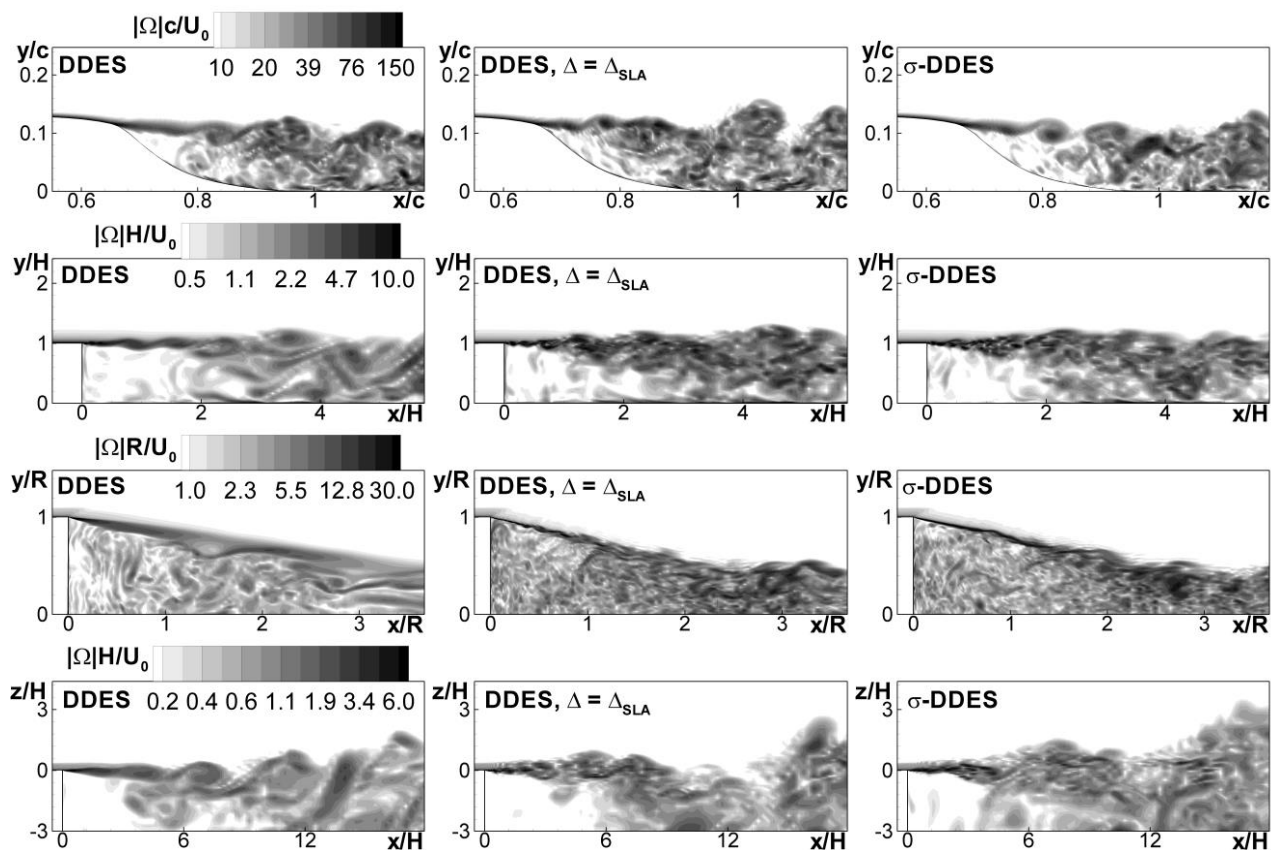


Рис. 2. Сравнение мгновенных полей модуля завихренности, рассчитанных с использованием стандартного метода SST DDES и двух рассматриваемых модификаций этого метода.

Сверху вниз: обтекание выпуклости на плоскости, течение в канале с внезапным расширением, течение в следе за цилиндрическим телом с донным срезом и течение в каверне, вмонтированной в стенку

Что касается сравнительной точности двух рассматриваемых модификаций, то, основываясь на результатах расчетов относительно простых тестовых течений, она оказывается практически одинаковой. Некоторое исключение в этом смысле составляет лишь течение в следе за продольно обтекаемым цилиндром с плоским донным срезом (рис. 3с). При его расчете в придонной области следа ( $x/R < \approx 2$ ) предпочтительной оказывается SST  $\sigma$ -DDES модель, а далее вниз по потоку – SST DDES в сочетании с линейным подсеточным масштабом  $\Delta_{SLA}$ , причем в этой области превосходство последней проявляется весьма существенно.

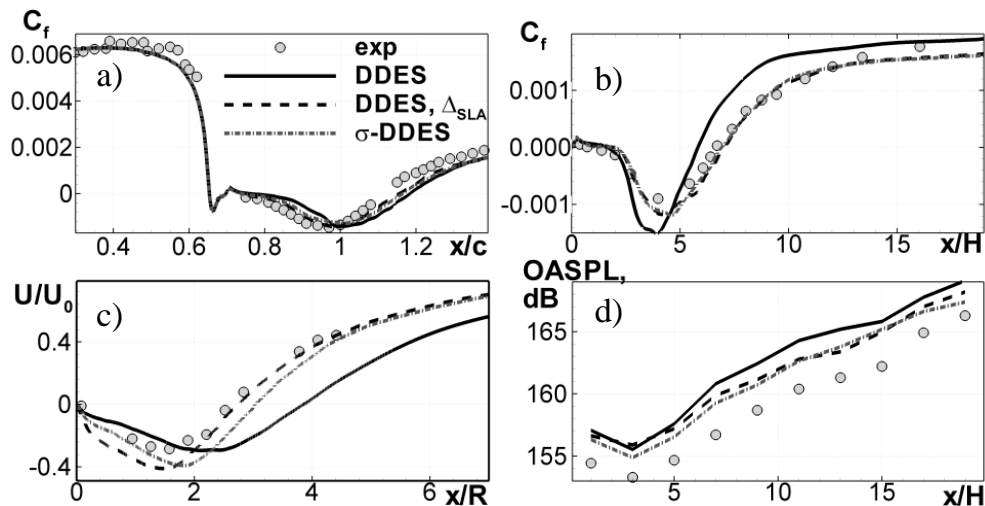


Рис. 3. Осредненные характеристики, рассчитанные с использованием стандартного метода SST DDES и двух рассматриваемых модификаций этого метода: а) распределение коэффициента трения вдоль поверхности выпуклости на плоскости; б) распределение коэффициента трения вдоль нижней стенки канала с внезапным расширением; в) распределение продольной скорости вдоль оси симметрии при продольном обтекании цилиндрического тела с донным срезом; д) уровень пульсаций давления на стенке каверны

При расчете наиболее сложного из рассмотренных тестовых течений (течение в тракте модели современного двухконтурного авиационного двигателя) использование обоих методов ускорения RANS-LES перехода обеспечивает более быстрое формирование трехмерных структур в следе лопаток вентилятора (см. рис. 4). Это, в свою очередь, приводит к более точному предсказанию осредненных параметров потока, в частности спектров продольной составляющей скорости, представленных на рисунке 5. При этом, как и при расчете течения в следе за продольно обтекаемым цилиндром при  $x/R > \approx 2$ , точность метода SST  $\sigma$ -DDES оказывается заметно ниже, чем точность метода SST DDES в сочетании с линейным подсеточным масштабом  $\Delta_{SLA}$ .

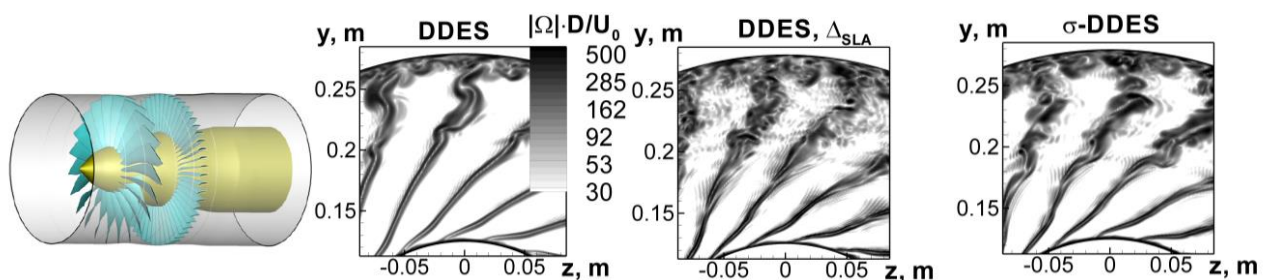


Рис. 4. Общий вид модельного двухконтурного авиационного двигателя и мгновенные поля завихренности в поперечном сечении ( $x = 0.1$  м), находящемся между ротором и статором, рассчитанные с использованием стандартного SST DDES и его двух модификаций

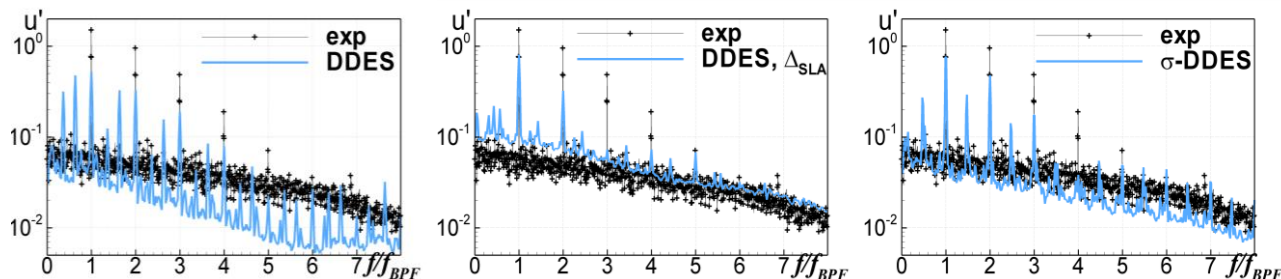


Рис. 5. Сравнение с экспериментом спектров продольной скорости в точке  $x = 0.1$  м,  $y = 0.25$  м,  $z = 0$  м, полученных с использованием стандартного SST DDES и двух рассматриваемых модификаций данного метода

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации, состоящие в следующем.

1. Проведен аналитический обзор существующих методов ускорения RANS-LES перехода в оторвавшихся слоях смешения в рамках незонных гибридных RANS-LES подходов к расчету турбулентных течений. На основе этого обзора для дальнейшего систематического анализа выбраны два наиболее перспективных метода. Первый из них базируется на использовании в рамках модели SST-DDES альтернативного подсеточного масштаба  $\Delta_{SLA}$ , учитывающего особенности течения на начальном участке слоя смешения, а второй - на использовании альтернативной подсеточной модели турбулентности ( $\sigma$ -модель).
2. Сформирована «матрица» тестовых течений, расчет которых позволяет провести всестороннее исследование эффективности выбранных методов, и сформулирована математическая постановка соответствующих задач вычислительной гидродинамики.
3. Создана и реализована в CFD коде NTS методическая база для объективной (в рамках единой незонной гибридной RANS-LES модели и единого для всех рассматриваемых задач вычислительного алгоритма) оценки эффективности выбранных методов. Ее новыми элементами являются модель  $\sigma$ -DDES на основе базовой RANS модели SST и «гибридная» конечно-объемная схема.
4. Получено численное решение сформулированных задач, проведен детальный анализ полученных результатов и выполнено их сравнение

с экспериментальными данными. Установлено, что оба рассмотренных метода позволяют ускорить формирование развитой трехмерной турбулентности в слоях смешения и существенно повысить точность расчета как нестационарных, так и осредненных характеристик всех тестовых течений по сравнению со стандартным методом DDES. При этом показано, что метод, основанный на использовании DDES в сочетании с модифицированным линейным подсеточным масштабом  $\Delta_{SLA}$ , является более эффективным, чем метод, использующий альтернативную подсеточную модель турбулентности  $\sigma$ .

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Е.К. Гусева, А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец. Тестирование метода DDES с подсеточным масштабом, адаптированным к слоям смешения // Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 7. № 12. С. 552-557 (**список ВАК**)
2. E.K. Guseva, A.V. Garbaruk, M.Kh. Strelets. Application of DDES and IDDES with shear layer adapted subgrid length-scale to separated flows // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Т. 769 С. 1-6 (**список ВАК, Scopus**)
3. E.K. Guseva, A.V. Garbaruk, M.Kh. Strelets. Assessment of Delayed DES and Improved Delayed DES Combined with a Shear-Layer-Adapted Subgrid Length-Scale in Separated Flows// Flow Turbulence Combustion. 2017. Т 98 №2. С. 481–502 (**список ВАК, Scopus**)
4. Е.К. Гусева, А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец. Разработка и тестирование  $\sigma$ -DDES подхода на основе  $k-\omega$  SST модели // Тепловые процессы в технике. 2017. Т. 9. № 10. С. 434-440 (**список ВАК**)
5. A. Probst, D. Schwamborn, A. Garbaruk, E. Guseva, M. Shur, M. Strelets and A. Travin. Evaluation of Grey Area Mitigation Tools within Zonal and Non-Zonal RANS-LES Approaches in Flows with Pressure Induced Separation // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2017. Т. 68 С. 237-247 (**список ВАК, Scopus**)
6. A. Garbaruk, E. Guseva, M. Shur, M. Strelets and A. Travin. 2D Wall-Mounted Hump. Глава в Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design.

Go4Hybrid: Grey Area Mitigation for Hybrid RANS-LES Methods. 2017. С. 173-187  
(**список ВАК, Scopus**)