

На правах рукописи

Грицкевич Михаил Сергеевич

**Расчет турбулентных пристенных течений с использованием зонного RANS-LES подхода с объемным источником турбулентных пульсаций**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент  
Гарбарук Андрей Викторович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Снегирёв Александр Юрьевич  
кандидат физико-математических наук, доцент  
Денисихина Дарья Михайловна

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Балтийский государственный  
технический университет «Военмех» им. Д.Ф.  
Устинова»

Защита состоится «26» декабря 2012 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.07 в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, корпус 1, кафедра гидроаэродинамики).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук,

Зайцев Дмитрий Кириллович

# Общая характеристика работы

## Актуальность работы

Проблема расчета турбулентных течений является одной из ключевых в механике жидкости и газа и на протяжении многих десятилетий (начиная с классических работ О. Рейнольдса, опубликованных в конце XIX века) находится в центре внимания специалистов во всем мире. Тем не менее, в силу своей исключительной сложности, эта проблема остается до конца нерешенной вплоть до наших дней.

Среди многочисленных подходов к моделированию турбулентных течений, известных в настоящее время, наибольшее применение в инженерной практике находят подходы, базирующиеся на решении сформулированных Рейнольдсом в 1895 г. и получивших его имя осредненных по времени уравнений Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes или RANS). Эти подходы являются достаточно экономичными, однако используемые для замыкания RANS полуэмпирические модели турбулентности не универсальны и во многих случаях не позволяют достичь приемлемой для практики точности расчета. Кроме того, по самой своей природе, они неприменимы для решения задач аэроакустики, аэроупругости и других задач, в которых информация о нестационарных характеристиках турбулентности играет принципиальную роль.

Единственной радикальной альтернативой RANS является метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation или LES). Этот метод, в принципе, обеспечивает высокую точность расчета любых турбулентных течений. Однако для сложных пристенных течений при высоких числах Рейнольдса, представляющих наибольший интерес, необходимые для проведения LES вычислительные ресурсы очень велики, и даже по самым оптимистичным прогнозам относительно развития вычислительной техники широкое практическое использование LES ожидается не ранее середины нынешнего века.

В связи с этим в последние годы интенсивно развиваются так называемые «зонные» RANS-LES методы, сочетающие в себе высокую точность LES и экономичность RANS подходов. Это достигается, благодаря использованию LES только в ограниченных областях потока, где RANS методы неточны или недостаточно информативны, и применения RANS в остальной части потока. Одной из наиболее сложных проблем, возникающих при построении зонных подходов, является проблема создания искусственных турбулентных пульсаций («турбулентного контента») между RANS подобластью и находящейся вниз по потоку от нее LES подобластью. Это необходимо для исключения или, по крайней мере, сокращения переходной области, в которой, благодаря использованию LES, должны сформироваться реальные турбулентные структуры. Несмотря на то, что решению данной проблемы посвящено большое число работ, известные в настоящее время методы создания турбулентного контента на границе между RANS и LES подобластями обладают теми или иными существенными недостатками. В связи с этим задача создания гибких и эффективных методов генерации искусственной турбулентности при переходе между RANS и LES подобластями в рамках зонных RANS-LES подходов к моделированию турбулентных течений, решению которой посвящена диссертация, по-прежнему, является весьма актуальной и важной задачей вычислительной аэродинамики. Анализ литературы по данному вопросу (см. далее) свидетельствует о том, что эту задачу можно решить путем добавления в исходные уравнения нестационарных объемных источников. Именно такой подход применяется в настоящей работе.

## **Цели работы**

Целью настоящей работы является создание и всестороннее тестирование достаточно точного и универсального (допускающего возможность внедрения в рамках различных, в том числе, коммерческих CFD кодов общего назначения) метода генерации турбулентного контента для расчета пристенных турбулентных течений в рамках зонных RANS-LES подходов.

Конкретные задачи работы заключаются в следующем:

1. Разработка метода создания турбулентного контента с использованием идеи добавления в исходные уравнения нестационарных объемных источников.
2. Разработка зонного RANS-LES подхода на основе предложенного метода создания турбулентного контента.
3. Внедрение разработанного зонного RANS-LES подхода в CFD код общего назначения ANSYS-FLUENT и выбор наиболее подходящего вычислительного алгоритма для проведения расчетов.
4. Всестороннее тестирование разработанного подхода путем проведения расчетов канонических турбулентных течений.
5. Демонстрация эффективности предложенного подхода на примере расчета сложных пристенных течений.

### **Научная новизна работы**

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен новый гибкий и эффективный метод создания искусственных турбулентных пульсаций в произвольной области потока, базирующийся на идее добавления в уравнения переноса импульса и кинетической энергии турбулентности нестационарных объемных источников.
2. На основе этого метода построен зонный RANS-LES подход для расчета пристенных турбулентных течений, допускающий возможность внедрения в современные CFD коды общего назначения. Наряду с методом создания турбулентного контента, существенным новым элементом предложенного зонного RANS-LES подхода

является предложенная модификация гибридной модели IDDES<sup>1</sup>, используемая для описания течения в LES подобласти

### **Достоверность полученных результатов**

Все расчеты, представленные в работе, выполнены с использованием кода общего назначения ANSYS-FLUENT, прошедшего широкое тестирование в многочисленных расчетных исследованиях по моделированию турбулентных течений. Физическая адекватность и корректность реализации новых элементов разработанного метода подтверждаются систематическим сопоставлением полученных с его помощью результатов с экспериментальными данными, эмпирическими корреляциями и с результатами численного моделирования, известными из литературы.

### **Практическая ценность работы**

Практическая ценность работы заключается в том, что благодаря своей гибкости и эффективности предложенный зонный RANS-LES подход может использоваться для решения сложных прикладных задач гидро- и аэродинамики при приемлемых (вполне доступных в настоящее время) вычислительных затратах. Об этом свидетельствует, в частности, тот факт, что с его использованием в диссертации была успешно решена задача о течении в Т-образном соединении двух труб (см. раздел 5.3).

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались на следующих российских и международных конференциях и семинарах:

1. XVIII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева “Проблемы газодинамики и теплообмена в новых энергетических технологиях” (Звенигород, 2011)

---

<sup>1</sup> Shur M. L. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities / M. L. Shur, P. R. Spalart, M. K. Strelets, A. K. Travin // International Journal of Heat and Fluid Flow - 2008 - 29, с. 1638-1649.

2. Европейская конференция по аэрокосмическим наукам EUCASS-4 (Санкт-Петербург, 2011).
3. Симпозиум по безопасности ядерных реакторов CFD4NRS-4, (Южная Корея, Тэчжон, 2012)
4. Симпозиум по гибридным RANS-LES подходам (HRLM-4) (Китай, Пекин, 2011)
5. Доклад на видеосеминаре по аэромеханике ЦАГИ - ИТПМ СО РАН - СПбГПУ - НИИМ МГУ (Санкт-Петербург, 2012)
6. Доклад на семинаре по механике жидкости, газа и плазмы в Балтийском государственном техническом университете им. Д.Ф. Устинова («Военмех») (Санкт-Петербург, 2012)

### **Публикации по теме диссертации**

Основные результаты работы изложены в восьми публикациях.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 258 наименований, и двух приложений. Работа изложена на 120 страницах машинописного текста, включая 30 рисунков.

### **Содержание работы**

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

В **первой главе** представлен обзор существующих методов расчета пристенных турбулентных течений в рамках зонных RANS-LES подходов.

Как уже отмечалось выше, ключевой проблемой при построении таких подходов является проблема создания искусственных турбулентных пульсаций при переходе от RANS к LES подобласти. Помимо этого, для успешного функционирования зонных RANS-LES подходов необходимо обеспечить высокую точность и экономичность решения как в RANS, так в LES

подобластях. В связи с этим большое значение приобретает выбор используемых в обеих подобластях моделей турбулентности. С учетом указанных обстоятельств, обзор состоит из трех разделов. В **разделе 1.1** проведен анализ существующих подходов к созданию турбулентного контента в области перехода от RANS к LES, в **разделе 1.2** – рассмотрены различные полуэмпирические модели, используемые для замыкания RANS, а в **разделе 1.3** – вихреразрешающие подходы к моделированию турбулентности, нашедшие наиболее широкое применение в рамках RANS-LES подходов. Остановимся кратко на содержании этих разделов.

Существующие методы создания турбулентных пульсаций на входе в LES подобласть можно условно разбить на три группы, к первой из которых относятся методы «рециклинга» турбулентности, ко второй – методы, базирующиеся на использовании результатов вспомогательного расчета, а к третьей – методы генерации искусственных турбулентных пульсаций.

В тех случаях, когда применение методов рециклинга турбулентности оказывается возможным, такие методы позволяют создать нестационарные поля скорости, давления и других переменных с максимально близкими к параметрам реального течения характеристиками. Иными словами, такие методы являются наиболее точными. Однако область их применимости ограничена течениями со сравнительно простой геометрией, в которых характер развития потока вниз по течению априори известен (например, течение в пограничном слое на плоской пластине). Для более сложных течений возможно применение методов, использующих вспомогательный расчет, однако в этом случае приходится тем или иным образом модифицировать («перемасштабировать») результаты вспомогательного расчета, что значительно снижает точность метода или делает его непригодным для использования. Поэтому при решении сложных задач аэродинамики с использованием зонных RANS-LES подходов методы рециклинга турбулентности и методы, использующие вспомогательный расчет, практически не используются.



Методы создания турбулентного контента на входной границе LES с помощью искусственной («синтетической») турбулентности являются гораздо более универсальными и экономичными. Среди нескольких наиболее популярных методов данного типа, описанных в литературе, можно выделить Генератор Синтетической Турбулентности (ГСТ), предложенный недавно в работе Д.Ю. Адамьяна с соавторами<sup>2</sup>. Этот метод применялся при расчете достаточно сложных течений в рамках зонного RANS-LES подхода и позволил получить весьма точные результаты. Однако, как и другие аналогичные методы, ГСТ требует «привязки» границы между RANS и LES подобластями к конкретной сеточной поверхности, что накладывает определенные ограничения на используемые сетки. Кроме того, при реализации метода ГСТ путем сквозного расчета течения в RANS и LES подобластях, для подавления положительной обратной связи между входными параметрами генератора синтетической турбулентности и решением в RANS подобласти необходимо разделение выходной границы RANS и входной границы LES подобластей, для чего требуются коды, работающие на многоблочных перекрывающихся сетках. Это обстоятельство также значительно сужает возможности практического использования методов генерации синтетической турбулентности на входе в LES подобласть, вообще, и метода ГСТ, в частности. Наконец, использование этих методов при решении задач аэроакустики приводит к появлению мощных ложных источников шума, подавление или фильтрация которых требуют принятия специальных дополнительных мер и не всегда оказываются эффективными. В этой связи чрезвычайно привлекательной выглядит идея создания искусственной турбулентности путем введения в исходные уравнения нестационарных объемных источников турбулентности (ОИТ). Такой подход открывает принципиальную возможность разделения расчетной области на RANS и LES подобласти без явной привязки границы между ними к сетке, то

---

<sup>2</sup> Адамьян Д. Ю. Эффективный метод генерации синтетической турбулентности на входных границах LES подобласти в рамках комбинированных RANS-LES подходов к расчету турбулентных течений / Д. Ю. Адамьян, М. Х. Стрелец, А. К. Травин // Математическое моделирование - 2011 – 23 №7 - с. 3-20.

есть, руководствуясь исключительно физическими соображениями. Кроме того, он позволяет создавать турбулентные пульсации в произвольном объеме, что обеспечивает значительно более высокую гибкость метода и является важным потенциальным преимуществом при решении задач аэроакустики. Эти достоинства ОИТ подтверждаются результатами, полученными с использованием метода вихрей (МВ)<sup>3</sup>. Этот метод (в англоязычной литературе – Vortex Method), является в настоящее время единственным известным примером реализации идеи ОИТ в рамках зонных RANS-LES подходов и используется в CFD коде ANSYS-FLUENT. Однако МВ также не свободен от недостатков. В частности, качество создаваемой им искусственной турбулентности оказывается более низким, чем при использовании метода ГСТ, что приводит к значительному удлинению участка перехода от RANS к LES с соответствующим снижением общей точности расчета.

Таким образом, анализ литературы, посвященной методам создания искусственной турбулентности на входных границах LES подобласти в рамках зонных RANS-LES подходов к расчету турбулентных течений, проведенный в **разделе 1.1** диссертации, свидетельствует об ограниченности существующих методов и о возможности их усовершенствования на основе совместного использования идей методов ОИТ и ГСТ.

В **разделе 1.2** проведен краткий обзор полуэмпирических моделей турбулентности, используемых для замыкания уравнений Рейнольдса. Следует отметить, что в контексте зонных RANS-LES методов к этим моделям предъявляются не столь жесткие требования, как в случае «глобального» (во всем потоке) использования RANS. Это связано с тем, что в соответствии с идеей зонных подходов, RANS подобласть располагается в той части потока, расчет которой не представляет особых трудностей, а наиболее сложные элементы течения (зоны сильного продольного градиента давления, кривизны линий тока, существенной анизотропии Рейнольдсовых напряжений, отрыва и

---

<sup>3</sup> Mathey F. Aerodynamic noise simulation of the flow past an airfoil trailing-edge using a hybrid zonal RANS-LES / F. Mathey // Computers & Fluids – 2008 – 37 – с. 836–843.

присоединения потока) рассчитываются с помощью LES. С другой стороны, модель турбулентности для зонных методов должна включать как минимум два уравнения переноса турбулентных характеристик, так как для создания синтетической турбулентности обычно требуется задание кинетической энергии турбулентности и ее интегрального линейного масштаба. С учетом указанных специфических требований в **разделе 1.2** сделан вывод о том, что применительно к зонным RANS-LES подходам оптимальным выбором является  $k-\omega$  модель переноса сдвиговых напряжений Ментера (SST модель), которая сочетает в себе относительную простоту и надежность<sup>4</sup>, с одной стороны, и достаточную для создания искусственной турбулентности информативность, с другой стороны.

Последний раздел обзора литературы (**раздел 1.3**) посвящен вихреразрешающим подходам к моделированию турбулентности, используемым в LES подобласти зонных подходов. Как уже отмечалось, при расчете пристенных течений при высоких числах Рейнольдса, из-за малости размеров энергонесущих вихрей вблизи стенки, использование «полного» (с разрешением вплоть до стеки) LES требует недоступных в настоящее время вычислительных ресурсов. В связи с этим при расчетах турбулентных течений, как с использованием LES подходов во всей расчетной области, так и при использовании зонных RANS-LES подходов, используются гибридные подходы, в которых вдали от стенки течение описывается при помощи какого-либо вихреразрешающего подхода, а в пристенной области используются либо пристенные функции, либо RANS подход. Такие методы можно разделить на две группы, к первой из которых относятся методы, изначально созданные для турбулентных течений с массиванным отрывом (например, Detached Eddy Simulation (DES) или Scale Adaptive Simulation (SAS)<sup>5</sup>), а ко второй – методы,

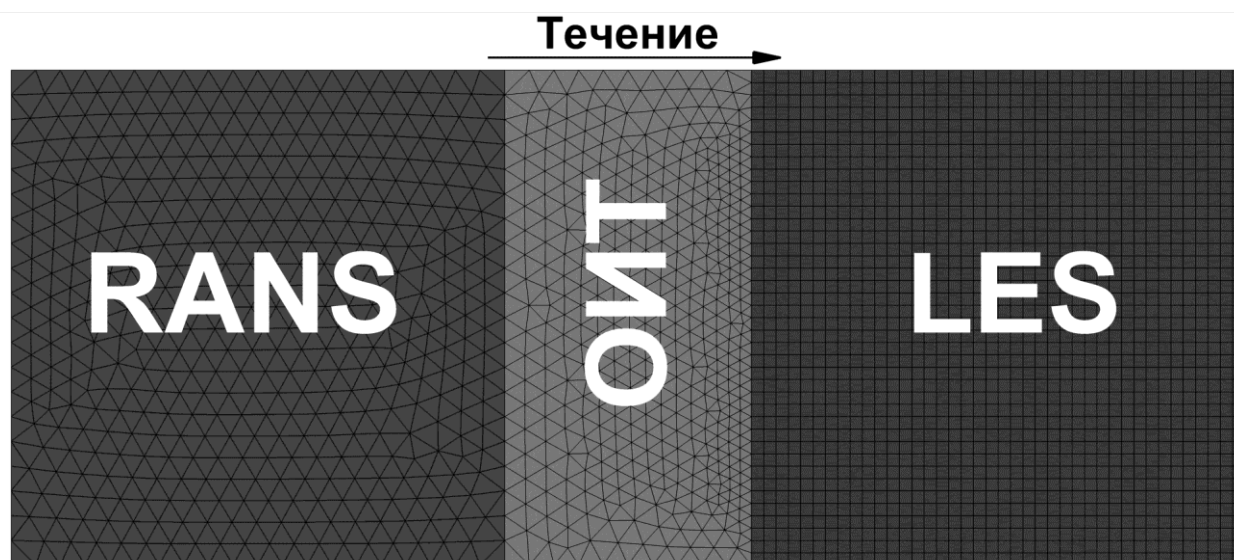
---

<sup>4</sup>Menter F. R. Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model / F. R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry // 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer - 2003 - с. 625-632.

<sup>5</sup>Menter F. R. The Scale-Adaptive Simulation Method for Unsteady Turbulent Flow Predictions. Part 1: Theory and Model Description / F. R. Menter, Y. Egorov // Flow Turbulence and Combustion – 2010 – 85 №1 - с. 113–138.

предназначенные для расчета присоединенных турбулентных течений (LES с приближенной постановкой граничных условий на стенке, LES с пристеночным RANS моделированием (Wall Modeling LES или WMLES)). На основе анализа таких моделей сделан вывод о том, что для LES области зонных RANS-LES подходов лучше всего подходит упомянутая выше модель IDDES, представляющая собой дальнейшее развитие модели Delayed DES<sup>6</sup>

**Вторая глава** является центральной методической главой диссертации. В ней приведено детальное описание зонного RANS-LES метода расчета турбулентных течений, построенного с учетом выводов из анализа литературы, проведенного в **Главе 1**. В рамках этого метода, базирующегося на совместном использовании идей методов ОИТ и ГСТ и называемого в дальнейшем ОИТ-ГСТ методом, в расчетной области выделяется три подобласти (Рис. 1): RANS, ОИТ и LES.



*Рис. 1. Схема разделения расчетной области на подобласти в рамках ОИТ-ГСТ метода*

Уравнения движения и переноса турбулентных характеристик решаются «насквозь» во всей расчетной области, однако в каждой из подобластей они имеют свои особенности.

<sup>6</sup>Spalart P. R. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities / P. R. Spalart, S. Deck, M. L. Shur, K. D. Squires, M. K. Strelets, A. Travin // Theor. Comput. Fluid Dyn. – 2006 – 20 № 3 - с. 181–195.

Так, в RANS подобласти решаются нестационарные уравнения Рейнольдса, замкнутые с помощью  $k$ - $\omega$  SST модели.

Формулировка уравнений, решаемых в ОИТ подобласти, представлена в **разделе 2.1**. Эти уравнения представляют собой уравнения RANS, замкнутые с помощью SST модели, в которые добавлен нестационарный объемный источник импульса и кинетической энергии турбулентности. Выражение для объемного источника импульса  $S_{OIT,i}$  определяется в виде:

$$S_{OIT,i} = \frac{\partial u'_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot (u'_j u'_i + u_j u'_i - u'_j u'_i) \quad (1)$$

Здесь компоненты вектора скорости  $u_i$  берутся из текущего решения в ОИТ подобласти, а пульсации скорости  $u'_i$  вычисляются при помощи (ГСТ).

Для исключения положительной обратной связи между полем синтетической турбулентности  $u'$ , создаваемым ГСТ, и решением уравнений Рейнольдса, которое используется для задания входных параметров ГСТ, последние определяются не из текущего решения, а из предварительного RANS расчета во всей области. В результате, создаваемые при помощи ГСТ турбулентные пульсации оказываются независимыми от текущего решения. Хотя применение такого подхода возможно только в том случае, когда течение в ОИТ подобласти близко к статистически стационарному, это не накладывает существенных ограничений на предлагаемый метод, поскольку данное требование выполняется для широкого класса течений и, в частности, для всех течений, рассматриваемых в диссертации<sup>7</sup>.

Для описания турбулентных характеристик в рамках предлагаемого подхода во всей расчетной области решаются уравнения переноса кинетической энергии турбулентности  $k$  и удельной скорости диссипации  $\omega$ , но при этом их физический смысл различен в RANS и LES подобластях. Так, в RANS подобласти  $k$  определяет кинетическую энергию турбулентности во всем

---

<sup>7</sup> Разработка метода подавления обратной связи, применимого для статистически нестационарных течений, является отдельной сложной задачей, выходящей за рамки настоящей работы.

диапазоне волновых чисел, соответствующую значению  $k_{RANS}$  (Рис. 2). В LES подобласти  $k$  определяет подсеточную величину кинетической энергии турбулентности  $k_{SGS}$  при волновых числах выше значения  $2\pi/\Delta$  (Рис. 2), где  $\Delta$  – связанная с расчетной сеткой ширина фильтра, при этом во всем остальном интервале волновых чисел кинетическая энергия турбулентности  $k_{RES}$  является разрешенной (Рис. 2). При использовании объемного источника турбулентности в ОИТ подобласти создаются турбулентные пульсации соответствующие разрешенной кинетической энергии турбулентности  $k_{RES}$ . В случае отсутствия специальных мер в начале LES подобласти происходит завышение суммарной (модельной и разрешенной) величины кинетической энергии турбулентности, что приводит к завышению турбулентного переноса импульса и снижению точности расчета.

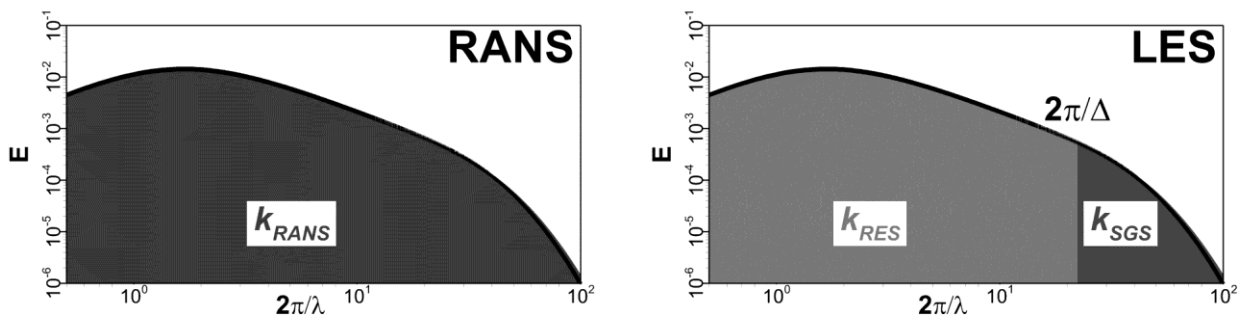


Рис. 2. Спектр кинетической энергии турбулентности для RANS и LES подходов

Поэтому для сохранения суммарного значения кинетической энергии в LES подобласти на границе ОИТ и LES подобластей необходимо обеспечить уменьшение модельной кинетической энергии  $k_{RANS}$  до значений, соответствующих подсеточной кинетической энергии  $k_{SGS}$ , что достигается при помощи следующего объемного стока в уравнении переноса кинетической энергии турбулентности:

$$S_{TKE} = -\frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \max(0, k_{RANS} - k_{SGS})) \quad (2)$$

Величина  $k_{SGS}$ , входящая в (2), вычисляется при помощи алгебраической подсеточной модели Смагоринского:

$$k_{SGS} = \omega_{RANS} \cdot (C_{Smag} \Delta_{IDDES})^2 \cdot S, \quad C_{Smag} = 0.2 \quad (3)$$

В качестве линейного подсеточного масштаба турбулентности используется подсеточный масштаб модели IDDES записанный в виде:

$$\Delta_{IDDES} = \min(C_w \cdot \max(d_w, h_{\max}), h_{\max}), \quad C_w = 0.15 \quad (4)$$

Наконец, в **разделе 2.2** формулируются определяющие уравнения предложенной в диссертации модификации гибридной модели SST-IDDES. Эта модификация отличается от первоначальной версии SST-IDDES значением одной из входящих в нее эмпирических констант  $C_{dtl}$  (ее новое значение 20 было определено в результате тщательной калибровки на примере решения задачи о турбулентном пограничном слое на плоской пластине и задачи о периодическом течении в плоском канале), а также более простой формулировкой самой модели. В частности, из оригинальной формулировки была исключена достаточно сложная эмпирическая функция  $f_e$ , введенная авторами этой модели для обеспечения правильного решения на логарифмическом участке профиля скорости. Однако в настоящей работе было показано (см. **главу 4**), что в отличие от IDDES на основе модели турбулентности Спаларта-Аллмараса, влияние функции  $f_e$  на результаты расчетов с помощью SST-IDDES оказывается незначительным.

В **Главе 3** представлено описание численного метода, используемого для решения определяющих уравнений (**раздел 3.1**) и результаты тестирования пригодности различных схем для проведения расчетов, на основе которого был выбран наиболее подходящий набор схем (**раздел 3.2**), а также приведены дискретные аналоги объемных источников в ОИТ подобласти (**раздел 3.3**).

Решение определяющих уравнений проводилось с помощью кода ANSYS-FLUENT, который является одним из наиболее популярных коммерческих CFD кодов общего назначения и широко используется большим количеством пользователей во всем мире для расчета самых разнообразных течений. Кроме того, важным достоинством данного кода является возможность внедрения

новых математических моделей через пользовательский интерфейс (User Defined Functions или UDF), которая была использована в настоящей работе.

Дискретизация определяющих уравнений в ANSYS-FLUENT производится методом конечных объемов на неструктурированных сетках с хранением данных в центрах ячеек. Решение дискретных уравнений производится с помощью неявного точечного метода Гаусса-Зейделя с использованием алгебраического многосеточного метода.

Как уже упоминалось выше, наиболее подходящий набор схем для дискретизации различных частей определяющих уравнений был выбран на основе предварительного тестирования различных схем, доступных в коде на примере задачи о вырождении однородной изотропной турбулентности. В результате было выяснено следующее.

Для аппроксимации конвективных слагаемых в исходных уравнениях в LES подобласти лучше всего подходит центрально-разностная схема второго порядка, а в RANS подобласти – противопоточная схема второго порядка. Остальные параметры используемого вычислительного алгоритма являются общими для всей расчетной области. Так, для аппроксимации массовых потоков на гранях ячеек используется схема Рай-Чоу, позволяющая подавлять ложные четно-нечетные осцилляции давления. Для аппроксимации производных по времени используется трехслойная схема Эйлера второго порядка, для интерполяции давления на грани ячеек – взвешенная сумма противопоточных схем первого и второго порядка, и, наконец, для расчета градиентов переменных в центрах ячеек – формула Гаусса-Грина, записанная относительно центра ячейки. Для совместного решения уравнений неразрывности и переноса импульса используется метод дробных шагов с безытерационным продвижением по времени, позволяющий экстраполировать нелинейные слагаемые со вторым порядком точности.

Что касается дополнительных объемных источников импульса (1), введенных в определяющие уравнения предлагаемого метода в ОИТ подобласти, то их дискретный аналог записывается следующим образом:



$$(S_{OIT,i})_c^N = \left( \frac{u_i'^N - u_i'^{N-1}}{\Delta t} \right)_c + \frac{1}{V_c} \sum_f (A_j u_j'^{N-1} u_i'^{N-1} + A_j u_j^{N-1} u_i'^{N-1} - A_j u_j'^{N-1} u_i'^{N-1})_f \quad (5)$$

Здесь значения с нижним индексом «*c*» соответствуют значениям в центрах ячеек, значения с нижним индексом «*f*» соответствуют значениям на гранях, верхним индексом «*N*» обозначаются значения переменных на текущем временном слое, а индексом «*N-1*» - на предыдущем,  $V_c$  – объем ячейки с индексом «*c*»,  $A_j$  – вектор площади грани с индексом «*f*».

Следует отметить, что дискретный аналог  $S_{OIT,i}$  (5) содержит значения переменных только в непосредственно рассматриваемой ячейке и в ее ближайших соседях, и поэтому может использоваться как на структурированных, так и на неструктурированных сетках.

Наконец, дискретизация стока (2) в уравнении баланса кинетической энергии турбулентности осуществляется следующим образом:

$$(S_{TKE})_c^N = -\frac{1}{V_c} \sum_f (A_j u_j'^{N-1} \max(0, k_{RANS,f}^{N-1} - k_{SGS,f}^{N-1}))_f \quad (6)$$

**Глава 4** посвящена тестированию предложенного зонного RANS-LES подхода к расчету турбулентных течений. Она состоит из двух разделов.

В **разделе 4.1** представлены результаты автономного тестирования модифицированной SST-IDDES модели (см. **раздел 2.3**). Для этого с ее помощью было выполнено решение четырех задач: задачи о стационарном течении в пограничном слое, задачи о развитом течении в плоском канале, задачи о течении в канале с обратным уступом и задачи о периодическом течении в канале с холмообразным сужением. Полученные при этом результаты убедительно свидетельствуют о том, что увеличение значения константы  $C_{dtl}$  с 8 до 20 значительно повышает надежность модели (снижает риск перехода от RANS к LES в присоединенных пограничных слоях на «неопределенных» сетках), с одной стороны, и не оказывает отрицательного влияния на вихреразрешающие свойства модели, с другой. Что касается функции  $f_e$ , то ее исключение из формулировки модели не приводит к сколь-нибудь заметному снижению точности расчета.

В разделе 4.2 обсуждаются результаты комплексного тестирования всех элементов разработанного зонного RANS-LES подхода. Для этой цели с его помощью проведены расчеты трех канонических течений: вырождения однородной изотропной турбулентности за решеткой, развитого течения в плоском канале и течения в пограничном слое на плоской пластине.

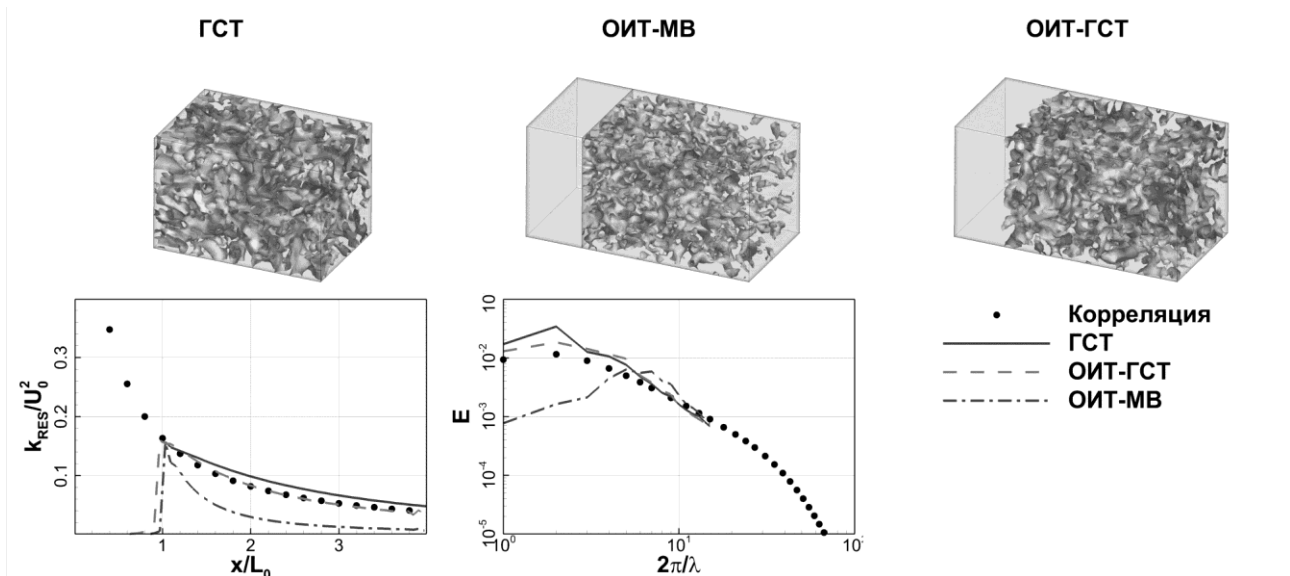


Рис. 3. Результаты расчетов задачи о вырождении турбулентности за решеткой

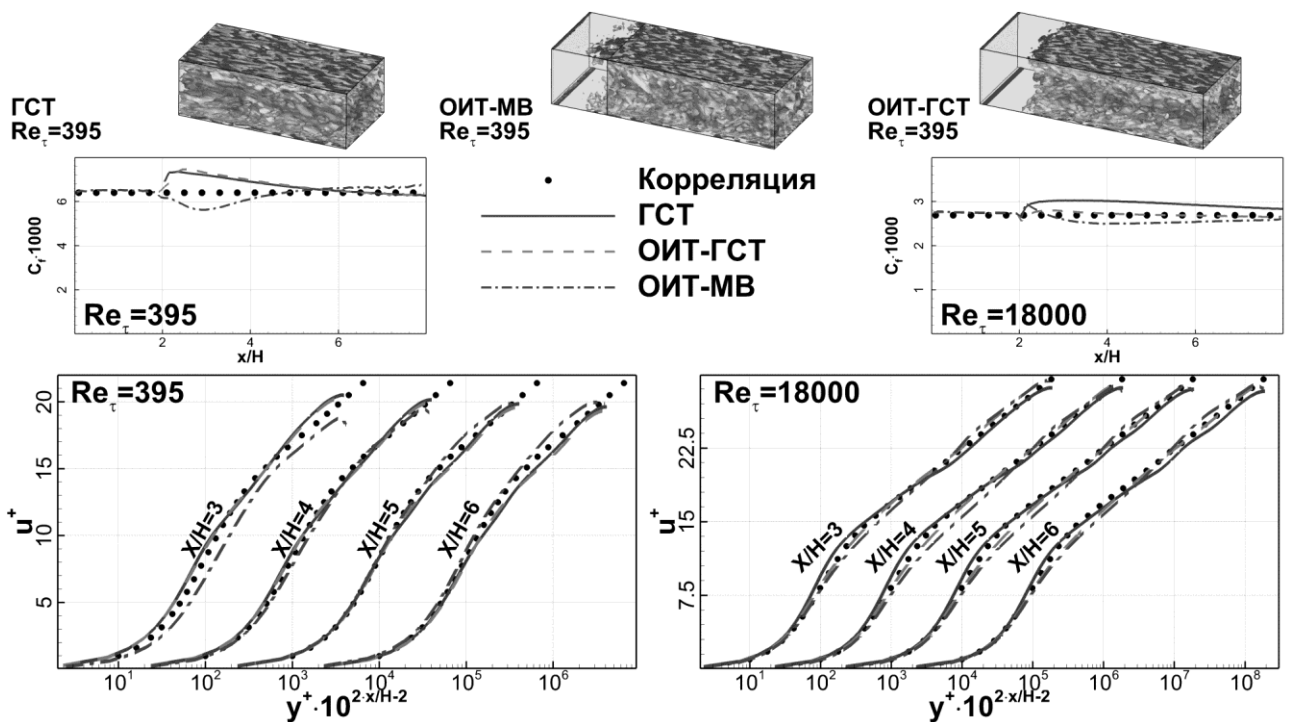


Рис. 4. Результаты расчетов задачи о развитом течении в плоском канале при двух числах Рейнольдса (\$Re\_\tau = 395\$ и \$Re\_\tau = 18000\$)

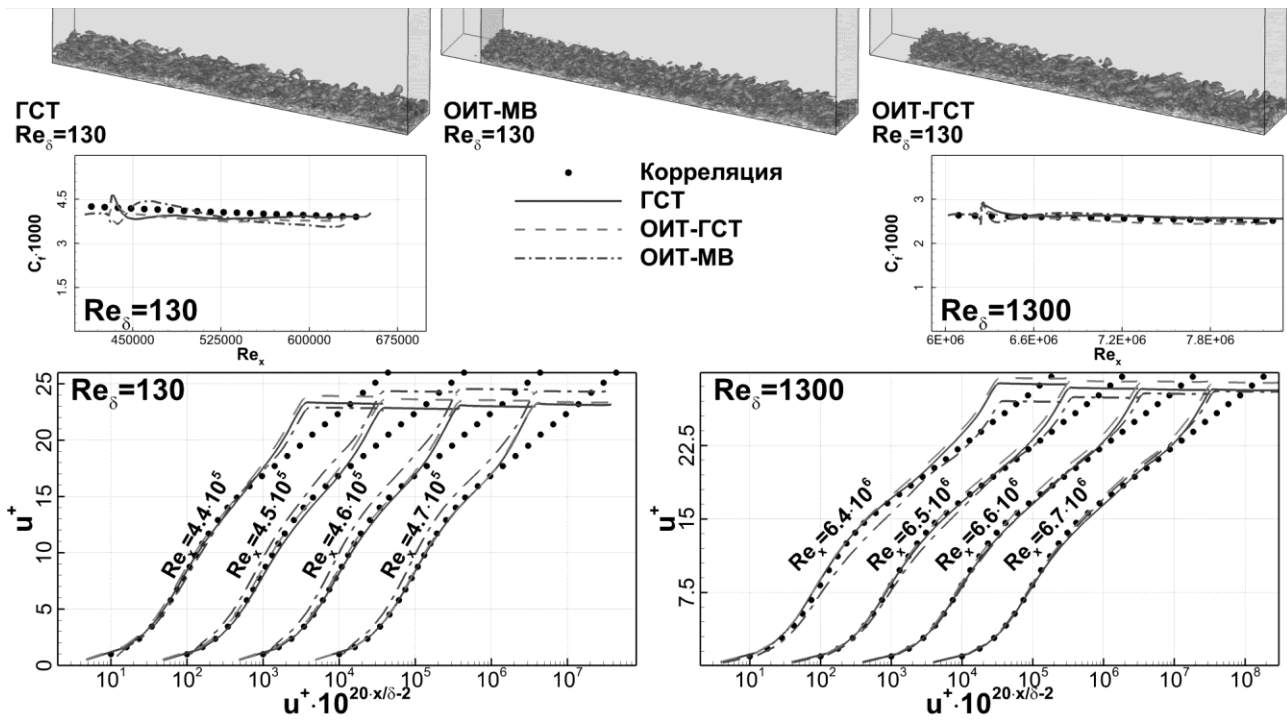


Рис. 5. Результаты расчетов задачи о пограничном слое на плоской пластине при двух числах Рейнольдса ( $Re_\delta=130$  и  $Re_\delta=1300$ )

Для оценки точности предложенного подхода проводится сравнение полученных с его помощью результатов с аналогичными результатами двух известных зонных RANS-LES подходов (ГСТ и ОИТ-МВ). При этом показано, что предложенный метод создания турбулентных пульсаций ОИТ-ГСТ превосходит по точности метод ОИТ-МВ, не уступает методу ГСТ и для всех трех рассмотренных течений обеспечивает хорошее согласие с эмпирическими корреляциями (Рис. 3 - Рис. 5).

В заключительной **пятой** главе диссертации представлены результаты применения метода ОИТ-ГСТ для расчета трех сложных пристенных течений: обтекания выпуклости в прямоугольном канале (**раздел 5.1**), обтекания гидрокрыла с отрывом вблизи задней кромки (**раздел 5.2**) и течения в Т-образном соединении двух труб (**раздел 5.3**). Показано, что даже при использовании относительно небольших сеток, разработанный метод обеспечивает вполне удовлетворительное согласование результатов расчета с экспериментом и заметно превосходит как RANS, так и глобальные гибридные методы, лежащие в его основе.

Так для задачи об обтекании выпуклости в прямоугольном канале (Рис. 6) SST-RANS значительно завышает координату точки присоединения оторвавшегося от вершины выпуклости слоя смешения и, как следствие, размер отрывной области. Результаты расчета с использованием SST-IDDES во всей расчетной области оказываются еще хуже, чем результаты SST-RANS. В частности, из-за отсутствия турбулентного контента на входе в LES подобласть, данная модель приводит к сильному затягиванию перехода к турбулентности в оторвавшемся слое смешения, что приводит к неправильному описанию течения в отрывной области, и значительно (еще больше, чем SST-RANS) завышает координату точки присоединения. В противоположность этому, ОИТ-ГСТ метод обеспечивает вполне реалистичное разрешение турбулентных структур в слое смешения и в отрывной области и благодаря этому позволяет с высокой точностью предсказать все основные характеристики осредненного течения.

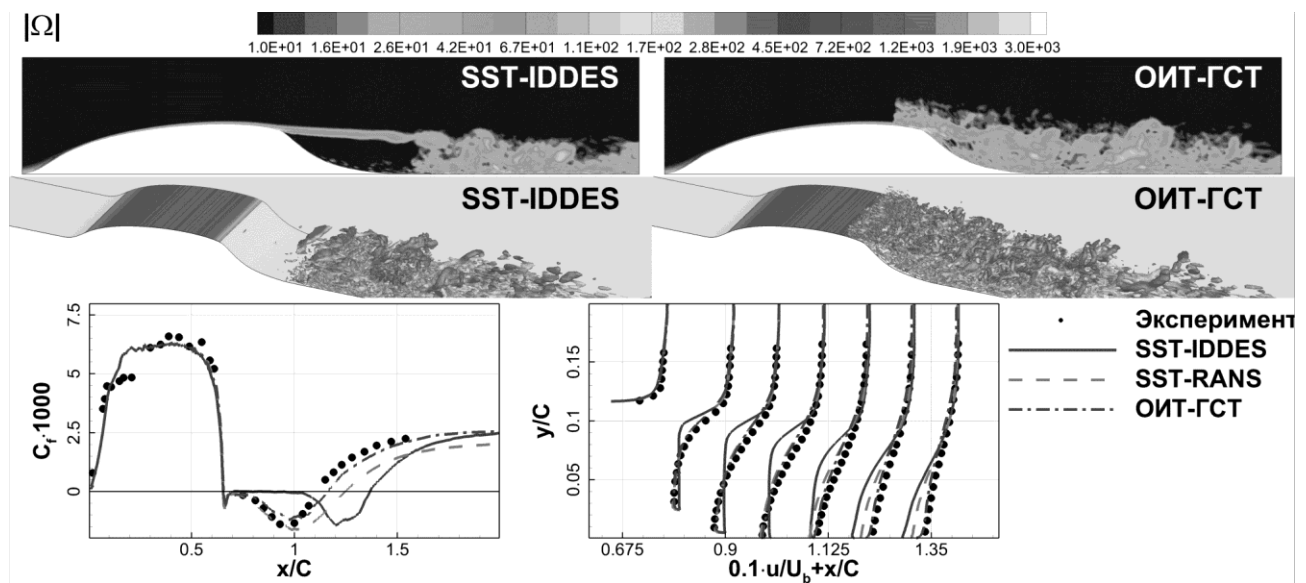


Рис. 6. Результаты расчетов задачи об обтекании выпуклости в плоском канале

При расчете обтекания гидрокрыла с отрывом вблизи задней кромки (Рис. 7) SST-RANS и SST-IDDES модели предсказывают слишком ранний отрыв пограничного слоя и неправильно описывают развитие профилей осредненной продольной скорости. При этом предлагаемый метод позволяет определить все

эти характеристики с точностью, практически не уступающей точности полного LES расчета<sup>8</sup>.

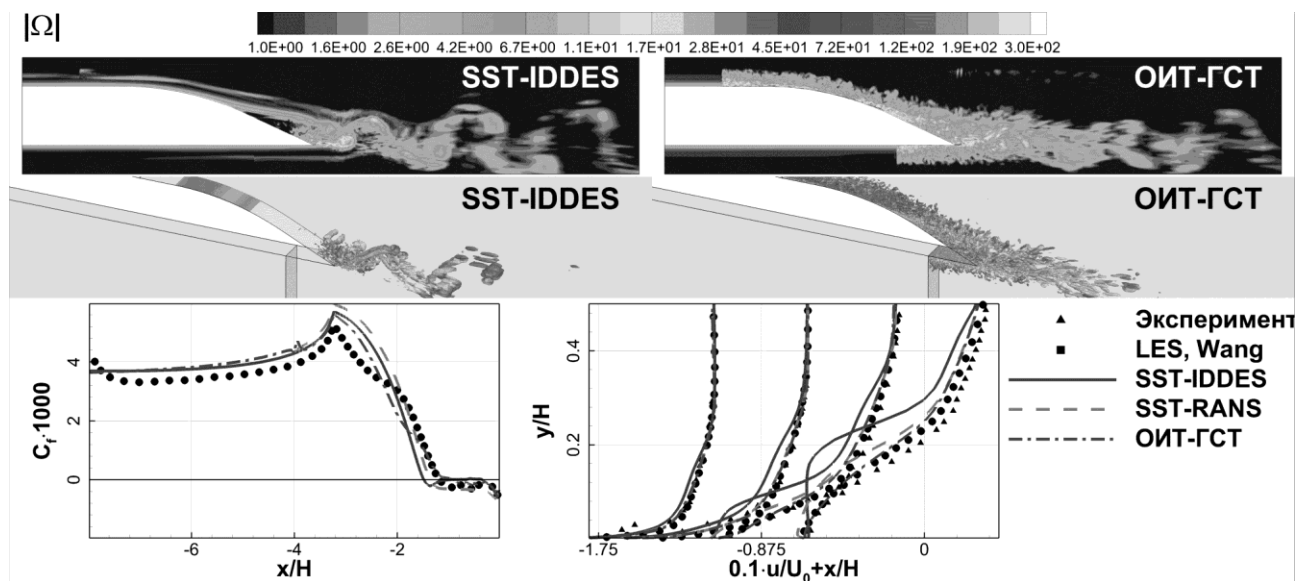


Рис. 7. Результаты расчетов задачи об обтекании гидрокрыла с отрывом вблизи задней кромки

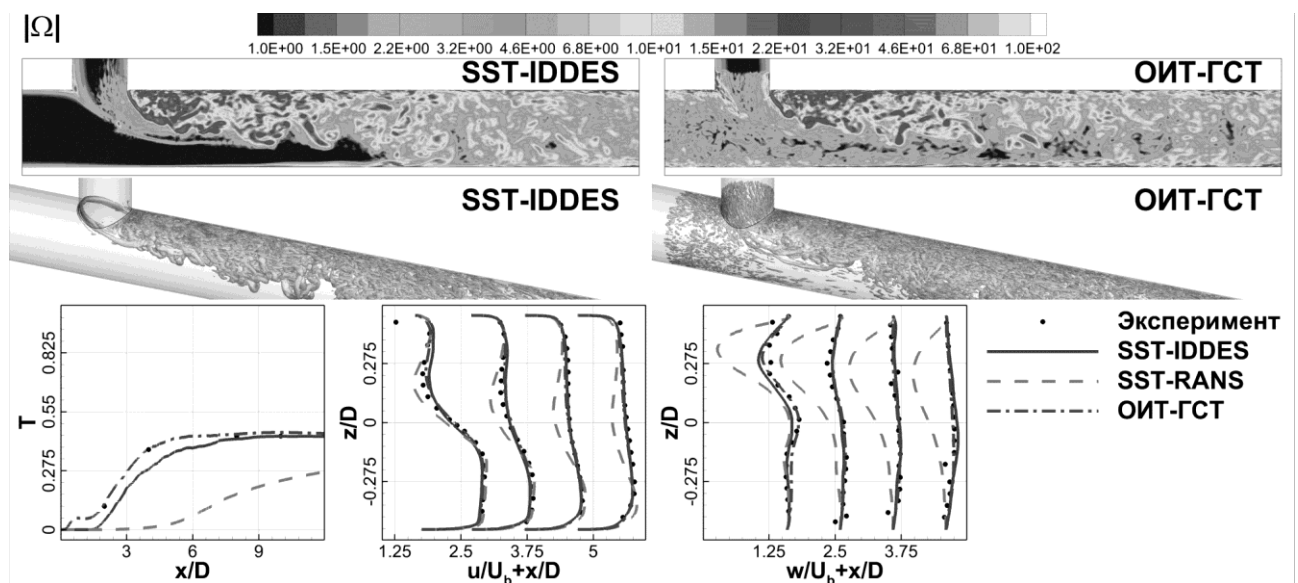


Рис. 8. Результаты расчетов течения в Т-образном соединении двух труб

Наконец, при расчете течения в Т-образном соединении двух труб (Рис. 8) SST-RANS оказывается неспособным даже качественно правильно предсказать картину течения. При этом распределения вертикальной составляющей вектора скорости и температуры на боковых стенках предсказывается неверно, а SST-

<sup>8</sup> Wang M. Dynamic wall modeling for large-eddy simulation of complex turbulent flows / M. Wang, P. Moin // Physics of Fluids – 2002 – 14 №12 - с. 2043-2051.

IDDES, как и в двух предыдущих случаях, характеризуется отсутствием разрешенных турбулентных структур на начальном участке оторвавшегося слоя смешения в области соединения двух труб.

В **заключении** кратко сформулированы основные результаты настоящей работы, которые состоят в следующем.

1. Разработан зонный RANS-LES подход для расчета пристенных турбулентных течений, основными новыми элементами которого являются:

- Новый гибкий и эффективный метод создания турбулентных пульсаций в произвольной области потока, базирующийся на идее добавления в уравнения переноса импульса и кинетической энергии турбулентности нестационарных объемных источников.
- Новая версия SST-IDDES подхода для описания течения в LES подобласти зонных RANS-LES методов, превосходящая по надежности первоначальную версию и не уступающая ей по точности.

2. Разработанный метод успешно внедрен в код общего назначения ANSYS-FLUENT, что подтверждает возможность его применения в различных, в том числе, коммерческих CFD кодах.

3. С помощью разработанного метода выполнены расчеты ряда канонических и сложных (с отрывом потока от гладкой поверхности и последующим присоединением) турбулентных течений, направленные на оценку эффективности и точности его новых элементов и на комплексное тестирование метода. Полученные при этом результаты позволяют сделать следующие выводы:

- Разработанный метод создания турбулентного контента обеспечивает существенно более высокую точность расчета, чем единственный известный аналог – метод вихрей, реализованный в настоящее время в коде ANSYS-FLUENT.

- Разработанный зонный подход существенно превосходит по технологичности зонные методы, базирующиеся на создании турбулентного контента на входе в LES подобласть путем задания синтетической турбулентности на ее входной границе, и не уступает по точности лучшим из методов такого типа.

Наконец, в **Приложении А** приведена формулировка метода ГСТ, а в **Приложении Б** – формулировка метода ОИТ-МВ.

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

1. Грицкевич М. С. Применение двустадийного RANS/LES подхода для расчета аэродинамики течений с отрывной зоной умеренного размера / М. С. Грицкевич, А. В. Гарбарук // Тепловые Процессы в Технике – 2011 - 11 - с. 484-489 (**список ВАК**).
2. Gritskevich M. S. Development of DDES and IDDES Formulations for the  $k-\omega$  Shear Stress Transport Model / M. S. Gritskevich, A. V. Garbaruk, J. Schütze, F. R. Menter // Flow Turbulence and Combustion – 2012 - 88 №3 - с. 431-449 (**список ВАК**).
3. Грицкевич М. С. Встроенный метод крупных вихрей с использованием объемного источника турбулентных пульсаций / М. С. Грицкевич, А. В. Гарбарук // Научно-технические ведомости СПбГПУ, серия Физико-математические науки - 2012 - 1(141) - с. 27-36 (**список ВАК**).
4. Грицкевич М. С. Применение двустадийного RANS/LES подхода для расчета аэродинамики течений с отрывной зоной умеренного размера / М. С. Грицкевич, А. В. Гарбарук // Сборник трудов XVIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева – 2011 – с. 337-338.
5. Gritskevich M. S. Investigation of the Thermal Mixing in a T-Junction Flow with Different SRS Approaches / M. S. Gritskevich, A. V. Garbaruk, T. Frank, F. R. Menter // CFD4NRS-4 The Experimental

Validation and Application of CFD and CMFD Codes in Nuclear Reactor Technology – 2012 - c. 1-11.

6. Gritskevich M. S. Fine-tuning of DDES and IDDES formulations to the  $k-\omega$  Shear Stress Transport model / M. S. Gritskevich, A. V. Garbaruk, F. R. Menter // 4th European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS-4) – 2011 - c. 1-10.
7. Menter F. R. Scale-Resolving Simulation Techniques in Industrial CFD / F. R. Menter, J. Schutze, K. A. Kurbatskii, M. S. Gritskevich, A. V. Garbaruk // AIAA Paper - 2011 – 2011-3474 - c. 1-12.
8. Menter F. R. Global vs Zonal Approaches in Hybrid RANS-LES Turbulence Modelling / F. R. Menter, J. Schutze, M. S. Gritskevich // Fourth Symposium on Hybrid RANS-LES Methods – 2011 - c. 1-15.