

На правах рукописи

Дубень Алексей Петрович

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СЛОЖНЫХ ПРИСТЕНОЧНЫХ
ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ
НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ**

Специальность 05.13.18 — математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2014

Работа выполнена на кафедре прикладной математики
Московского государственного технологического университета «Станкин»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Козубская Татьяна Константиновна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Дерюгин Юрий Николаевич,
РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров,
начальник отдела 0813 (ИТМФ);
кандидат технических наук,
Чучкалов Игорь Борисович,
ОАО «КБ Сухого», Москва,
начальник бригады.

Ведущая организация: ФГУП «Центральный научно-исследовательский
институт машиностроения» (ФГУП ЦНИИМаш)

Защита состоится _____ 2014г. в _____ часов на заседа-
нии диссертационного совета Д 002.24.03 при Институте прикладной мате-
матики им. М.В. Келдыша РАН по адресу 125047, г. Москва, Миусская пл.,
4кА.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной
математики им. М.В. Келдыша РАН

Автореферат разослан _____ 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.24.03

Змитренко Н.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В настоящее время для решения задач авиационной промышленности все чаще применяется метод математического моделирования. Это обусловлено, с одной стороны, развитием вычислительных методов и моделей, позволяющих достаточно точно и правдоподобно предсказывать реальные течения. Также за последнее десятилетие можно было наблюдать скачок в развитии вычислительной техники, что сейчас позволяет получить доступ к суперкомпьютерам довольно большой мощности. Таким образом, новым более дешевым, рациональным и эффективным инструментом для исследования турбулентных течений и решения задач авиационной промышленности становится метод математического моделирования.

Для расчетов турбулентных течений в инженерных приложениях чаще всего используется метод осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS) с замыканием с помощью той или иной полуэмпирической модели турбулентности. Это обусловлено тем, что данный подход позволяет достаточно точно предсказывать осредненные характеристики турбулентного взаимодействия и аэродинамические параметры исследуемой конфигурации при относительно небольших вычислительных затратах. Но, во-первых, при достаточно сложной геометрии и условиях течения, например когда присутствуют большие отрывные зоны, использование подхода RANS не ведет к достоверным результатам моделирования. Во-вторых, в рамках данной методики невозможно воспроизвести нестационарные турбулентные течения, характерные для большинства приложений, и, тем более, предсказать акустические характеристики для изучаемой конфигурации.

Альтернативой к RANS служит использование вихреразрешающих подходов, к которым можно отнести прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation, DNS) и метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES). Подход DNS предполагает разрешение турбулентных структур абсолютно всех масштабов из инерционного интервала, что ведет к необходимости использования сеток очень больших размеров. Большинство экспертных оценок сводится к тому, что при сохранении текущих темпов роста мощности вычислительной техники для решения задач с числами Рейнольдса, характерными для интересных авиационной промышленности конфигураций, прямое численное моделирование возможно будет применять только во второй половине нынешнего столетия. Методика LES заключается в разрешении только тех структур, размеры которых не ниже размеров ячеек

расчетной сетки. Мелкомасштабная (подсеточная) турбулентность описывается с помощью той или иной модели подсеточной вязкости. Подход LES не требует такой подробности сетки в отрывной зоне вдали от стенок, как DNS, что сокращает ее размеры. Однако необходимые минимально разрешимые масштабы турбулентности для достоверного LES моделирования вблизи стенок существенно уменьшаются, поэтому размеры сеток становятся в этой зоне очень близкими к аналогичным DNS сеткам. Большинство проблем, которые стоят перед авиационной промышленностью, предполагают взаимодействие турбулентного потока со стенками, наличие которых чаще всего оказывает существенное влияние на исследуемое течение. Поэтому для таких задач LES сетки по количеству узлов и элементов не многим меньше DNS сеток для аналогичных конфигураций, так как 90% ячеек содержится в пристеночных областях. Таким образом, по сроку готовности для инженерных приложений LES не намного опережает DNS.

Тем не менее до сравнительно недавнего времени не было серьезных альтернатив использованию LES для расчета сложных нестационарных турбулентных течений с необходимостью предсказывать как турбулентные пульсации, так и акустические нагрузки.

В настоящее время активно развиваются гибридные RANS-LES подходы к моделированию турбулентности, которые сочетают в себе эффективность методики LES в отрывных свободных зонах и экономичность RANS в пристенных областях. Многие из них, как показывают многочисленные исследования, позволяют на относительно небольших по сравнению с аналогичными для LES и DNS сетках получать удовлетворительные результаты, в том числе для задач с высокими числами Рейнольдса, характерными для конфигураций, рассматриваемых авиационной промышленностью.

Вместе с развитием авиационной техники все сложнее становятся элементы летательных аппаратов. При этом возрастают требования к точности предсказания характеристик исследуемых моделей и течений. Ввиду сложности геометрии использование структурированных сеток для расчетов по таким конфигурациям зачастую вызывает серьезные затруднения. При этом развитие методов автоматического построения неструктурированных сеток вокруг тел произвольных форм достигло достаточно высокого уровня. Современные не только коммерческие, но и свободнораспространяемые генераторы позволяют заполнить расчетную область качественной сеткой с учетом всех особенностей течения в пограничных, переходных и зонах отрывного течения.

Таким образом, возникает необходимость в изучении особенностей, реализации и валидации гибридных RANS-LES методов моделирования прежде

всего нестационарных пристеночных турбулентных течений с использованием неструктурированных сеток. Это особенно актуально также ввиду того, что подавляющее большинство расчетов с успешным использованием гибридных подходов производилось и производится на структурированных сетках.

Целью диссертационной работы является разработка вычислительных технологий для моделирования сложных нестационарных пристеночных турбулентных течений на неструктурированных сетках на основе гибридных RANS-LES подходов. Для ее достижения решаются следующие **задачи**:

- 1) анализ современных гибридных RANS-LES методов и выбор оптимальных применительно к расчету пристеночных турбулентных течений;
- 2) адаптация выбранного подхода применительно к неструктурированной сетке и используемой численной схеме;
- 3) эффективная параллельная программная реализация гибридной RANS-LES методики на неструктурированных сетках в рамках программного комплекса NOISEtte;
- 4) тестирование и верификация реализованной методики на примере расчета канонических сдвиговых турбулентных течений;
- 5) проведение крупномасштабных расчетов сложных турбулентных течений с наличием отрыва и присоединения и существенным влиянием стенки на суперкомпьютере.

Объект исследования — вычислительные технологии моделирования сложных турбулентных течений на неструктурированных сетках.

Предмет исследования — гибридные RANS-LES подходы семейства DES для моделирования нестационарных пристеночных турбулентных течений на неструктурированных сетках.

Методы исследования: методы векторного и тензорного анализа, аналитической геометрии, теории разностных схем, математического моделирования.

Научная новизна

1. Предложена эффективная методика для моделирования сложных пристеночных турбулентных течений на неструктурированных сетках на основе гибридных RANS-LES подходов.
2. Выполнена программная реализация гибридных RANS-LES подходов семейства DES на неструктурированных сетках в рамках параллельного программного комплекса NOISEtte.

3. В результате решения набора тестовых задач получены численные данные для верификации алгоритмов моделирования турбулентных течений на неструктурированных сетках.
4. Проведенные крупномасштабные расчеты на неструктурированных сетках на основе гибридных RANS-LES подходов позволили выявить сложную картину течения и исследовать механизмы образования шума для пристеночных течений возле конфигураций, характерных для авиационной промышленности.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в адаптации гибридных RANS-LES методов семейства DES применительно к расчетам на неструктурированных сетках, что можно эффективно использовать для решения задач со сложной геометрией.

Достоверность полученных в рамках работы результатов гарантируется, с одной стороны корректностью работы вычислительного кода NOISEtte, разрабатываемого в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, который проверен на большом количестве тестовых задач. Также достоверность результатов, описанных в диссертации, обеспечивается сравнением как с опубликованными результатами, полученными другими авторами, так и с экспериментальными данными.

Апробация работы

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

- 23rd International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics, Barcelona, Spain, May 16-20, 2011;
- Вторая всероссийская открытая конференции по авиационной акустике, г. Звенигород Московской обл., сентябрь 2011 г.;
- XIII международный семинар «Супервычисления и математическое моделирование», г. Саров Нижегородской обл., 3-7 октября 2011 г.;
- семинар сектора вычислительной аэроакустики ИПМ им. М. В. Келдыша РАН (2012);
- 24th International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics, Atlanta, GA, USA, May 21-25, 2012;
- Четвертая всероссийская конференция «Вычислительный эксперимент в аэроакустике», г. Светлогорск Калининградской обл., 17-22 сентября 2012 г.;

- International Workshop «Computational Experiment in AeroAcoustics», Svetlogorsk, Kaliningrad region, Russia, September 19-22, 2012
- XIV международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование», г. Саров Нижегородской обл., 1-5 октября 2012 г.;
- 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (34th AIAA Aeroacoustics Conference), Berlin, Germany, May 27-29, 2013;
- Третья всероссийская открытая конференции по аэроакустике, г. Звенигород Московской обл., 1-5 октября 2013 г.;
- семинар «Математическое моделирование» ИПМ им. М. В. Келдыша РАН (2013).

Личный вклад

Все научные результаты, вынесенные на защиту, получены лично автором.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 15 печатных работах, четыре из которых [1], [2], [3] и [4] изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

Финансовая поддержка

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 12-01-00486 и № 12-01-33022)

На защиту выносятся основные результаты диссертационной работы.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, даётся сравнительная характеристика существующих численных методов и история работ по теме диссертации. Формулируются цель и задачи работы, её научная новизна и практическая значимость.

Первая глава посвящена обзору современных гибридных RANS-LES методов моделирования турбулентных течений. В ней также приводится обоснование выбора используемых в работе подходов к моделированию турбулентных течений.

Среди множества рассмотренных в **Главе 1** методов для адаптации к «неструктурированной» идеологии было выбрано семейство DES (DES97, DDES и IDDES методы) с базовой моделью замыкания Спаларта-Аллмараса, что обусловлено следующими причинами. Во-первых, все модели семейства DES относятся к классу методов сквозного счета, что, в отличие от так называемых «сегрегированных» подходов, при расчетах на неструктурированных сетках, не требует дополнительной разработки методик стыковки RANS и LES границ, а также с точки зрения распараллеливания алгоритма не усложняет решение задачи. Во-вторых, при наличии реализованного солвера RANS с той или иной моделью замыкания подходы семейства DES достаточно легко внедрить в расчетный код. В-третьих, методы DES97, DDES и IDDES верифицированы на широком классе как тестовых задач, так и сложных нестационарных турбулентных, в том числе пристеночных, течений. Выбор в пользу семейства DES подтверждается и тем фактом, что данные подходы в настоящее время активно развиваются и применяются большим количеством исследователей.

Выбор модели замыкания Спаларта-Аллмараса для модифицированной турбулентной вязкости в качестве базовой для гибридных RANS-LES подходов семейства DES был сделан по причине ее простоты по сравнению с другими моделями (одно уравнение, нетрудоемкие формулы) и удобства использования в гибридных RANS-LES подходах. К тому же данная модель позволяет проводить физически корректное моделирование широкого класса течений (пограничные слои, струи, отрывные течения и т.д.). Последнее подтверждается множеством результатов, описанных в научной литературе.

Вторая глава посвящена реализации гибридных RANS-LES методов семейства DES моделирования турбулентных течений в рамках программного комплекса NOISEtte на неструктурированных сетках.

В **разделе 2.1** описана процедура построения аппроксимации высокого порядка точности конвективного члена уравнения Спаларта-Аллмараса для переменной $\rho\tilde{\nu}$ (ρ – плотность, $\tilde{\nu}$ модифицированная турбулентная вязкость) в рамках конечно-разностной EBR (Edge-Based Reconstruction) схемы [И.В.Абалакин, Т.К.Козубская, Мат. мод., т. 25, № 8, 2013, стр. 109-136] на основе реберно-ориентированной квазиодномерной реконструкции переменных. В программном комплексе NOISEtte для вычисления численного потока на грани ячейки контрольного объема используется метод Роу в случае реконструкции физических переменных или противопоточная схема на основе одномерного солвера Хуанг [Huang, J. Comp. Phys., 95, 91, pp. 59-84, 1981] в случае реконструкции потоковых переменных. Было предложено и реализо-

вано два следующих способа для аппроксимации численного потока $F_{ij}^{\rho\tilde{\nu}}$ на грани S_{ij} контрольного объема, разделяющей узлы i и j :

связанный подход, который подразумевает приближенное решение задачи Римана о распаде разрыва (по схеме Роу или Хуанг) для расширенного вектора переменных, включающего $\rho\tilde{\nu}$, характеризующую турбулентную вязкость;

сегрегированный подход, в котором при помощи Римановского солвера (Роу или Хуанг) решается система уравнений для вектора газодинамических переменных, а уравнение Спаларта-Аллмараса для турбулентной вязкости решается отдельно.

В первом случае на вход одномерного солвера Роу или Хуанг подаются реконструированные по EBR схеме высокого порядка точности вектор физических $\mathbf{U} = (\rho, u, v, w, p, \tilde{\nu})^T$ или потоковых $\mathbf{F}(\mathbf{U}) = (F^\rho, F^{\rho u}, F^{\rho v}, F^{\rho w}, F^E, F^{\rho\tilde{\nu}})^T$ переменных (включая $\tilde{\nu}$ или $F^{\rho\tilde{\nu}}$) в точках i и j .

Согласно второму методу, для вычисления потока $F_{ij}^{\rho\tilde{\nu}}$ на грани S_{ij} используется посчитанное по методу Роу (или Хуанг) значение потока плотности F_{ij}^ρ . При этом, в случае реконструкции физических переменных, а именно модифицированной турбулентной вязкости $\tilde{\nu}_i$ и $\tilde{\nu}_j$, численный поток в уравнении Спаларта-Аллмараса определяется следующим образом:

$$F_{ij}^{\rho\tilde{\nu}} = \begin{cases} F_{ij}^\rho \cdot \tilde{\nu}_i, & F_{ij}^\rho \geq 0 \\ F_{ij}^\rho \cdot \tilde{\nu}_j, & F_{ij}^\rho < 0 \end{cases} . \quad (1)$$

Если же реконструкции подвергается потоковая переменная $F^{\rho\tilde{\nu}}$, то численный поток $F_{ij}^{\rho\tilde{\nu}}$ предлагается вычислять как

$$F_{ij}^{\rho\tilde{\nu}} = \begin{cases} F_i^{\rho\tilde{\nu}}, & F_{ij}^\rho \geq 0 \\ F_j^{\rho\tilde{\nu}}, & F_{ij}^\rho < 0 \end{cases} . \quad (2)$$

Второй из предложенных способов является более экономичным с вычислительной точки зрения, что обусловлено отсутствием необходимости решать систему уравнений для большего числа переменных. В то же время первый метод, как будет показано в третьей главе, позволяет добиться более устойчивого и более точного решения по сравнению с первым.

Раздел 2.2 посвящен определению пространственных масштабов турбулентности для подходов RANS, LES и WMLES, используемых в рамках гибридных методов семейства DES.

В гибридных подходах семейства DES с моделью замыкания Спаларта-Аллмараса переход от зон, где работает RANS, к LES зонам осуществляется

за счет замены масштаба турбулентности (что есть расстояние до стенки в узле сетки), присутствующего в диссипативном члене уравнения Спаларта-Аллмараса

$$Y_\nu = C_{w1} \rho f_w \left(\tilde{\nu} / d_w \right)^2 \quad (3)$$

на LES масштаб $C_{DES} \Delta$, определяемый сеточным разрешением Δ в данной точке (C_{DES} — эмпирическая константа). В формуле (3) C_{w1} есть константа, а f_w — некая демпфирующая функция. Такая замена возможна, исходя из соображений локального равновесия, при котором конвекция равна диффузии, то есть $\frac{\partial \rho \tilde{\nu}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \tilde{\nu} u_i}{\partial x_i} = D_\nu$, и, как следствие, согласно уравнению Спаларта-Аллмараса, производство турбулентной энергии равно её диссипации: $G_\nu = Y_\nu$. Из последнего соотношения можно получить выражение для турбулентной вязкости, которая будет совпадать с эффективной вязкостью модели Смагоринского при замене d_w на Δ , и определение C_{DES} через эмпирическую константу данной модели. В оригинальном методе DES соотношение для гибридного масштаба турбулентности выглядит как

$$l_{DES} = \min(d_w, C_{DES} \Delta) \quad (4)$$

В результате данной подстановки смоделированная турбулентная вязкость RANS вблизи стенки перерождается в вязкость модели Смагоринского на отдалении от нее.

Для представления наименьших разрешимых масштабов в области LES необходимо, чтобы ширина фильтра в определении масштаба турбулентности (4) не превосходила величины Δ , зависящей от выбора шага разностной сетки.

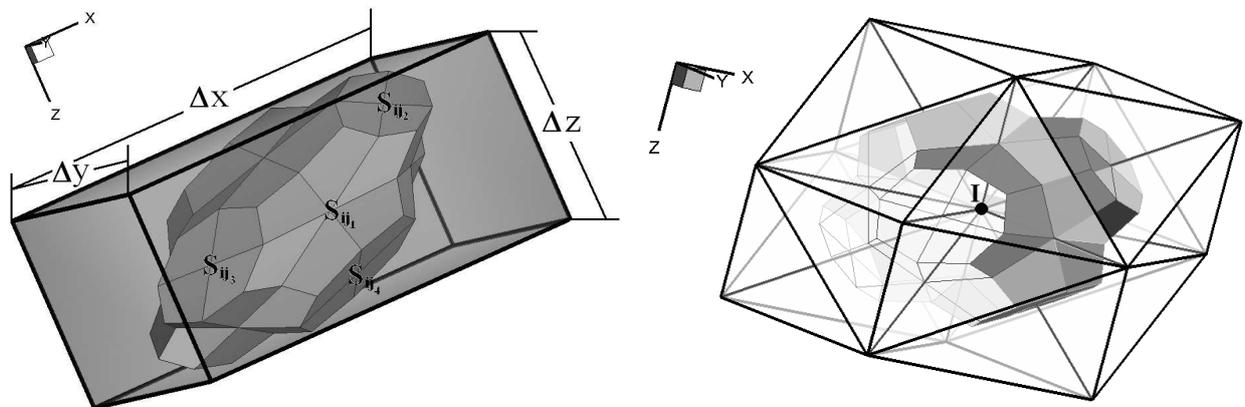


Рис. 1: Расчетная ячейка и окружающий ее параллелепипед (слева) и тетраэдры, имеющие общую вершину I и часть расчетной ячейки (справа)

Как уже было отмечено выше, величина Δ , используемая непосредственно при построении модели, определяется сеточными характеристиками. В этом смысле, техника нахождения Δ , в зависимости от конфигурации и от шага сетки, входит в описание самой модели. В случае неструктурированных сеток, определение Δ не так очевидно, как при использовании структурированных сеток.

В данной работе предлагается ввести определение ширины фильтра для неструктурированной сетки, как максимальной величины из всех высот тетраэдров, имеющих общую вершину (см. Рис. 1 справа)

$$\Delta = \max_{j=1, \dots, N_T^i} \max_{k=1, \dots, 4} h_k^j \quad (5)$$

где N_T^i – число тетраэдров с общей вершиной i , вокруг которой построена расчетная ячейка, h_k^j – k -я высота j -го тетраэдра.

Следует отметить, что в случае, когда сетка становится декартовой, выражение (5) эквивалентно широко распространенному для структурированных сеток определению $\Delta = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$.

Относительно оригинального метода DES, применение его DDES модификации, доработанной, в частности, в целях преодоления проблем, связанных с неправомерным переключением расчета в LES режим внутри пограничного слоя, где должен работать RANS, не требует дополнительных методик для его адаптации к использованию на неструктурированных сетках.

Однако в методе IDDES, расширяющем DDES для LES расчета с пристеночным моделированием (WMLES), при более сложном определении подсеточного масштаба турбулентности как

$$\Delta = \min [\max (C_w d_w, C_w h_{\max}, h_{wn}), h_{\max}] \quad (6)$$

используется еще локальный размер ячейки h_{wn} сетки в направлении, перпендикулярном стенке. Определение этого размера также неочевидно применительно к неструктурированным сеткам. В формуле (6) h_{\max} – ширина фильтра, определяемая соотношением (5), C_w – некая эмпирическая константа.

Значение величины h_{wn} для неструктурированной сетки предлагается определять как проекцию контрольного объема, построенного возле узла сетки, на вектор нормали к стенке. Формально для произвольной неструктурированной сетки это можно записать следующим образом. Пусть \mathbf{n}_i – единичный вектор нормали к стенке. Для каждого j из N_T^i тетраэдров, имеющих общую вершину i , определим M_j^+ , M_j^- , G_j^+ , G_j^- , O_j^+ , O_j^- как максимальные по модулю положительные и отрицательные проекции на \mathbf{n}_i векторов, соединя-

ющих вершину i и центры масс ребер, граней и самого тетраэдра. Тогда h_{wn} будет вычисляться следующим образом:

$$h_{wn} = \max_{j=1,\dots,N_T^i} \left(M_j^+, G_j^+, O_j^+ \right) + \max_{j=1,\dots,N_T^i} \left(M_j^-, G_j^-, O_j^- \right) \quad (7)$$

В программном комплексе NOISEtte вычисление подсеточных масштабов Δ и h_{wn} , определяемых по формулам (5) и (7) соответственно, реализовано в рамках основного расчетного модуля и происходит на этапе инициализации. Для вычисления таких параметров, как расстояние до стенки d_w и компоненты вектора нормали к стенке \mathbf{n}_i в узле неструктурированной сетки, разработана отдельная сервисная программа, адаптированная к работе на параллельной вычислительной системе.

Раздел 2.3 посвящен особенностям адаптации гибридной схемы [Travin et al., Fluid Mech. and its App., 65, pp. 239-254, 2004] для невязких потоков к используемой численной схеме повышенного порядка точности и неструктурированным сеткам.

В рамках RANS-LES подходов для LES областей противопоточные схемы становятся слишком диссипативными, а центрально-разностные схемы оказываются слабоустойчивыми в RANS зоне. Поэтому для корректного, без излишней диссипации в отрывных зонах и при этом устойчивого в пристеночных областях, моделирования методами семейства DES необходимо использовать гибридные численные схемы для невязких потоков. Исходя из этого, численный поток через грань S_{ij} , разделяющую точки i и j , определяется как взвешенная сумма его центрально-разностной и противопоточной аппроксимации:

$$F_{ij} = (1 - \sigma) \cdot F_{ij}^C + \sigma \cdot F_{ij}^{UPW}. \quad (8)$$

В работе этот подход применен в рамках используемой EBR схемы повышенной точности для неструктурированных сеток. В выражении (8) F_{ij}^C и $F_{ij}^{UPW} = F_{ij}^C - \sigma a \frac{f_{ij}^R - f_{ij}^L}{2}$ – соответственно центрально-разностная и противопоточная аппроксимация конвективного потока, вычисляемые по схеме Роу или Хуанг в зависимости от типа переменных на входе. Величины f_{ij}^L и f_{ij}^R представляют собой значения, полученные на основе квазиодномерной реберно-ориентированной реконструкции физических (схема Роу) или потоковых (схема Хуанг) переменных слева и справа от грани S_{ij} вычислительной ячейки. $a = |A_{ij}|$ в случае использования схемы Роу, $a = \text{sgn} A_{ij}$ для схемы Хуанг, где A_{ij} – матрица Якоби на грани ячейки. Легко видеть, что числен-

ный поток F_{ij} в (8) может быть записан так же в форме параметрической противоположной схемы как

$$F_{ij} = F_{ij}^C - \sigma a \frac{f_{ij}^R - f_{ij}^L}{2} \quad (9)$$

Параметр σ в выражениях (8) и (9) обозначает количество численной вязкости и меняется от 0 в LES зонах до 1 в пристеночных областях, где расчет ведется в RANS режиме. Для его определения можно использовать различные критерии. Он может быть представлен в виде функции, зависящей от моделируемого течения. Также его распределение может быть задано статически. В рамках программного комплекса NOISEtte реализованы различные способы задания функции распределения количества численной вязкости.

В **разделе 2.4** описана процедура калибровки основной константы C_{DES} путем решения классической задачи о затухании однородной изотропной турбулентности, которая представляет собой простейшую математическую реализацию турбулентного течения и поэтому является одним из фундаментальных тестов для проверки методик к моделированию турбулентности.

Расчетной областью для задачи является куб размерами $2\pi \times 2\pi \times 2\pi$. В качестве начальных условий задавалось случайное распределение скоростей, соответствующее определенному моменту времени, которое было получено из данных эксперимента [Comte-Bellot&Corrsin, J. Fluid. Mech., 48, pp. 273–337, 1971] с помощью обратного преобразования Фурье. На границах области ставились условия периодичности по всем трем направлениям. Характерное число Рейнольдса задачи $Re = 1600$.

Расчеты проводились на двух равномерных сетках с разрешением в 32 и 64 ячейки на ширину области. Энергетический спектр анализировался в безразмерные моменты времени $T=0.87$ и $T=2$, для которых есть соответствующие экспериментальные данные.

На Рис. 2 представлены результаты моделирования в виде энергетических спектров полей скоростей для сеток 32^3 и 64^3 на моменты времени $T=0.87$ и $T=2$ для значений константы $C_{DES} = 0.5, 0.65$ и 0.8 . Близость результатов расчетов с экспериментальными данными говорит об адекватности работы LES режима в рамках гибридного подхода DES с моделью замыкания Спаларта-Аллмараса. С одной стороны, правильно моделируется каскадный перенос энергии и постепенное затухание общей турбулентной энергии. С другой стороны, на оба момента времени уклон кривой энергетического спектра в инерционном интервале соответствует как теоретическим оценкам (закону «-5/3» Колмогорова), так и экспериментальным данным. Как видно из гра-

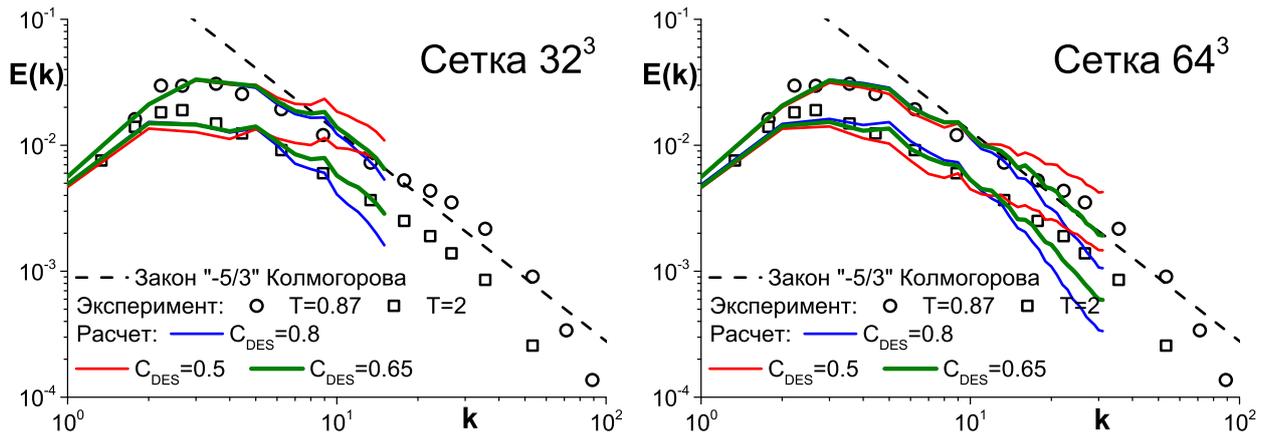


Рис. 2: Энергетический спектр турбулентности на моменты времени $T=0.87$ и $T=2$ на сетках 32^3 (слева) и 64^3 (справа)

фиков, значение $C_{DES} = 0.65$ является наиболее оптимальным для используемой численной схемы. Также можно заметить, что для всех рассмотренных значений эмпирической константы наблюдается незначительное отклонение графиков от экспериментальных значений начиная примерно с $k = 11$, что вполне соответствует лучшим известным результатам, полученным на структурированных сетках.

Третья глава посвящена верификации реализованных методов и моделей на примере расчета канонических турбулентных течений.

В **разделе 3.1** рассмотрена первая задача: стационарное течение возле бесконечной пластины. Расчеты были проведены с целью подтверждения корректности реализованного подхода RANS с моделью замыкания Спаларта-Аллмараса (SA RANS).

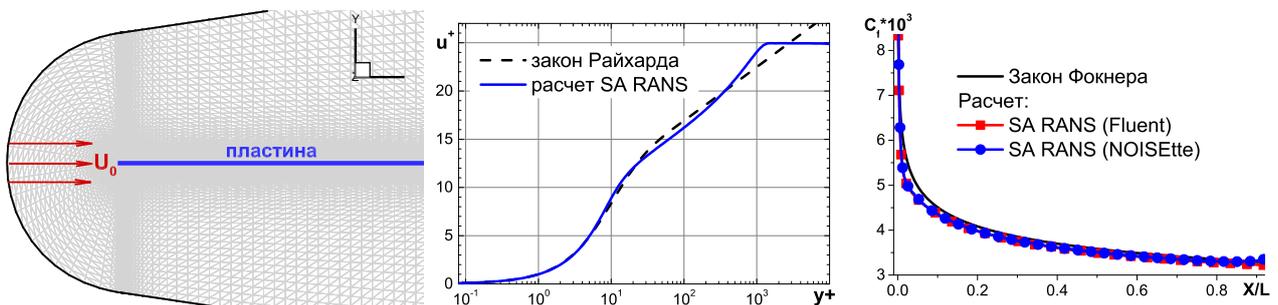


Рис. 3: Течение возле бесконечной пластины: конфигурация (слева), осредненный профиль скорости (в центре) и осредненное значение коэффициента трения (справа)

Рассматриваемая конфигурация представляет собой поток, набегающий на пластину (см. Рис. 3 слева). Характерное число Рейнольдса задачи $Re = 2.3 \cdot 10^6$, посчитанное по скорости $U_0 = 34$ м/с и длине $L = 1$ м. В поперечном направлении (ось Z) ставились условия периодичности.

Из сравнения результатов моделирования (см. Рис. 3 в центре и справа) с аналитическими оценками и результатами, полученными с помощью коммерческого пакета Fluent, можно судить о правильной работе внедренной в комплекс NOISEtte и адаптированной к расчетам на неструктурированных сетках модели турбулентности Спаларта-Аллмараса.

В разделе 3.2 рассмотрена вторая задача для верификации реализованной методики, представляющая собой установившееся течение в плоском канале. Такая постановка является хорошим тестом для проверки возможностей LES-модели для корректного расчета нестационарного пристеночного турбулентного течения.

В задаче воспроизводится течение в бесконечном по продольному и поперечному направлениям канале. Расчетная область представляет собой параллелепипед размерами $4H \times 1H \times 1.5H$ ($L_x \times L_y \times L_z$), где H – безразмерная ширина канала. Для поддержания расхода вдоль координаты X и возможности использовать условие периодичности в данном направлении, в уравнение для продольной компоненты скорости вводился источниковый член, обеспечивающий фиксированный градиент давления. Ввиду того, что возмущение для данной задачи обусловлено только начальными условиями, которые задавались в виде некоего нефизичного распределения скоростей, любое вовлечение дополнительной (численной) вязкости может сказаться на корректном воспроизведении течения и на конечных результатах.

Моделирование проводилось для $Re_\tau = 400$ с использованием подхода IDDES, что соответствовало $Re = 1.4 \cdot 10^4$, рассчитанному по соответствующей среднерасходной скорости. Для сравнения были взяты данные из расчета методом прямого численного моделирования (DNS) [Moser et al., Phys. Fluids, 11(4), 1999].

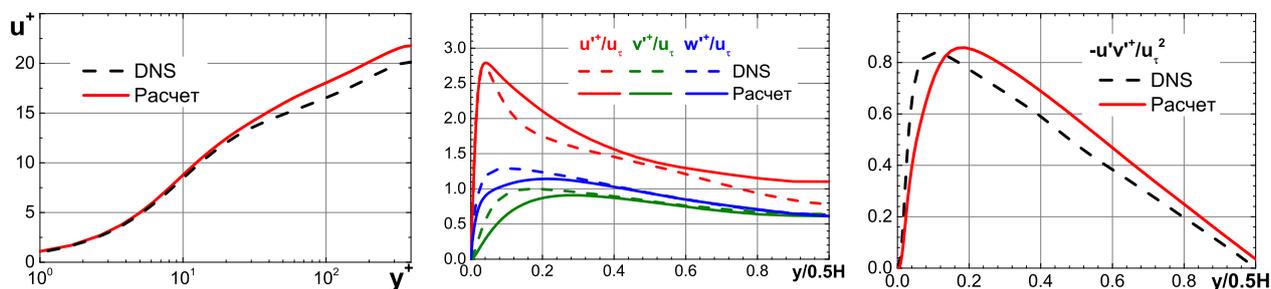


Рис. 4: Профили средней скорости (слева) и разрешенных напряжений Рейнольдса (в центре и справа) в сравнении с экспериментальными данными для течения в плоском канале

Из графиков профилей средней скорости и разрешенных напряжений Рейнольдса, полученных путем осреднения по времени, а также простран-

ственного по продольной и поперечной координате, представленных на Рис. 4, можно видеть, что исследуемое течение воспроизводится достаточно корректно. Это позволяет сделать вывод о возможности эффективного использования реализованной методики для расчетов по конфигурациям, требующим пристеночного LES-моделирования.

Третьей задачей, выбранной для верификации реализованных методов, является моделирование пристеночного турбулентного течения возле бесконечного обратного уступа в канале, для которого характерно наличие отрыва потока и дальнейшее его присоединение. Постановка и результаты расчетов для нее описаны в **разделе 3.3**. Для данной задачи использование вихреразрешающих подходов приводит к существенным улучшениям в предсказании осредненных характеристик течения по сравнению с результатами моделирования методом стационарного RANS. Для анализа и верификации были взяты соответствующие экспериментальные данные [Vogel&Eaton, J. Heat. Trans., 107(4), pp. 922-929, 1985]. Задача хороша тем, что она позволяет проверить работу всех трех режимов, которые предусмотрены в рамках подхода IDDES: нестационарный RANS в области перед уступом, LES и WMLES в областях за уступом вдали от стенки и в ее окрестности соответственно, переключение в которые обусловлено срывом потока и переходом течения в нестационарный режим.

На Рис. 5 изображена схема расчетной области исследуемой конфигурации в двумерном сечении. Пунктирной линией обозначены неотражающие входные и выходные граничные условия. Сплошная линия соответствует твердым стенкам и условиям прилипания. В поперечном направлении (вдоль оси Z) использовались периодические граничные условия, при этом ширина расчетной области составляла $L_Z = 2H$.

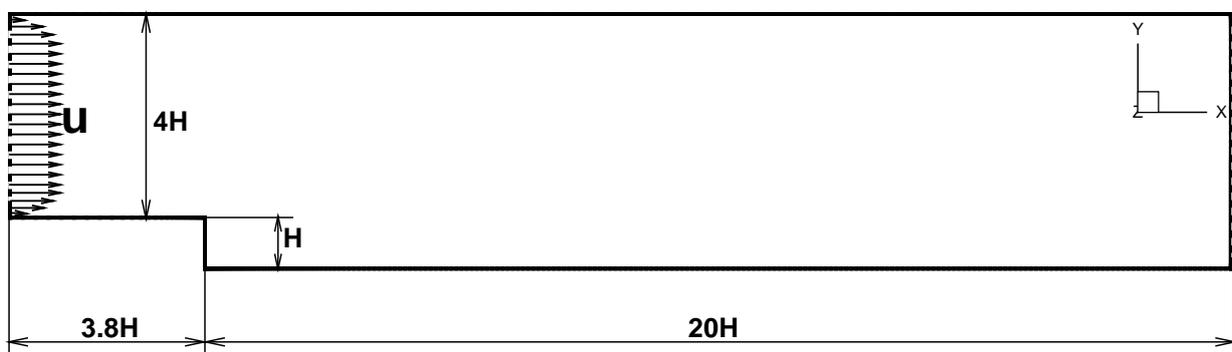


Рис. 5: Схема расчетной области для задачи обтекания бесконечного обратного уступа в канале

Характерное число Рейнольдса задачи, основанное на высоте уступа $H=3.8$ см. и скорости входного потока $U_0 = 1.3$ м/с, что соответствует числу

Маха $M \cong 0.033$, равно $Re = 28000$. На входной границе расчетной области задавались соответствующие условиям эксперимента профили скорости и турбулентной вязкости, полученные в результате дополнительного расчета. Было проведено четыре расчета: методами RANS, DDES и два расчета методом IDDES. Последние два отличались между собой способом дискретизации конвективного члена в уравнении Спаларта-Аллмараса: расчеты IDDES1 (связанный подход) и IDDES2 (сегрегированный подход).

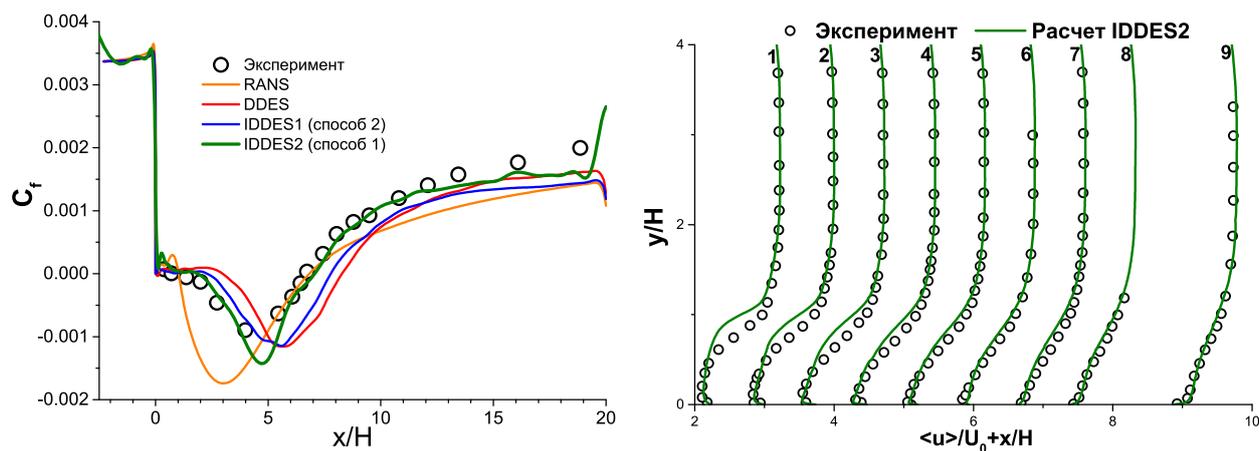


Рис. 6: Графики осредненного по времени коэффициента трения на поверхности из различных расчетов (слева) и профили продольной скорости из расчета IDDES1 (справа) в сечении $z=0$ за обратным уступом

Графики осредненного по времени коэффициента трения в сечении $z=0$ на поверхности за обратным уступом (Рис. 6 слева) показывают, что несмотря на то, что методом RANS более точно предсказана координата точки присоединения, соответствующая нулевому значению коэффициента трения, использование гибридных подходов DDES и особенно IDDES в целом ведет к более корректному моделированию рассматриваемого течения. При этом использование связанного подхода для дискретизации конвективного члена в уравнении Спаларта-Аллмараса (расчет IDDES1) обеспечивает более точное предсказание распределения осредненных характеристик в области за уступом, что особенно хорошо видно из профилей осредненной продольной скорости (Рис. 6 справа). Здесь также можно заметить, что более или менее заметные расхождения относительно экспериментальных данных наблюдаются лишь в области слоя смешения на расстоянии порядка 2 и 3 высот уступа от его кромки. Они могут быть связаны с проблемами в «серой зоне», области переключения от RANS к LES режиму, где численный переход

слоя смешения в трехмерный нестационарный режим может происходить с некоторой задержкой.

Четвертая глава посвящена применению разработанной в диссертационной работе методики к численному моделированию сложных нестационарных пристеночных турбулентных течений с наличием отрыва и присоединения, характерных для задач авиационной промышленности.

Первая задача, постановка и результаты которой описаны в **разделе 4.1**, представляет собой турбулентное взаимодействие набегающего потока с зазором в тонкой пластине. Для данной конфигурации, рассматриваемой в рамках европейского проекта FP7 VALIANT, в ЦАГИ были проведены экспериментальные исследования и получены данные для осредненных по времени характеристик течения, а также данные по акустике в дальнем поле.

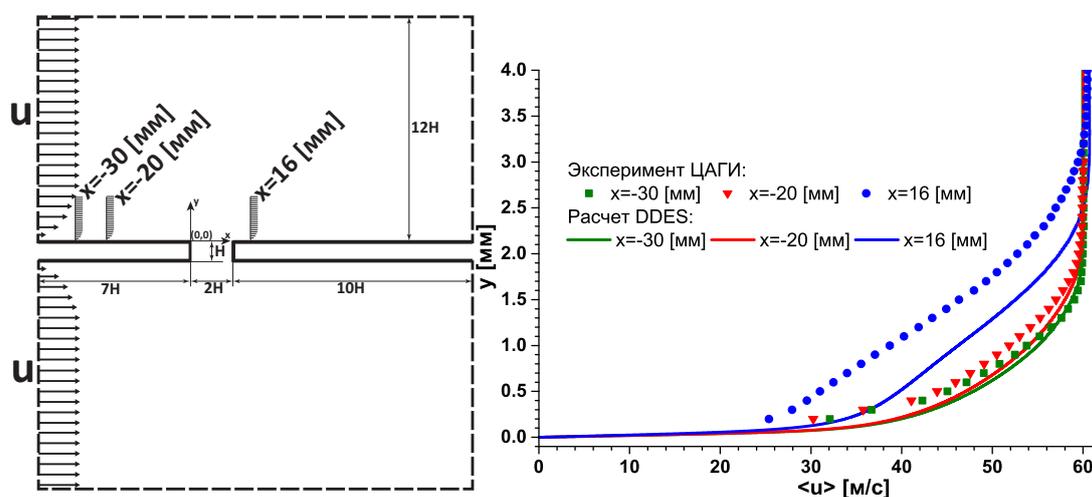


Рис. 7: Схема расчетной области для задачи турбулентного взаимодействия потока с зазором (слева) и профили продольной скорости из расчета DDES в различных сечениях (справа)

На Рис. 7 слева изображена схема расчетной области исследуемой конфигурации в двумерном сечении. Пунктирной линией обозначены границы расчетной области. Сплошная линия соответствует твердым стенкам. Характерным размером задачи является толщина обтекаемой пластины $H = 5$ мм. При проведении численного моделирования длина зазора в поперечном направлении предполагалась бесконечной, что позволило использовать периодические граничные условия, в эксперименте же она была конечной, равной $8H$. Такое упрощение существенно снизило вычислительную нагрузку для данной задачи. В расчетах ширина области в поперечном (ось Z) направлении бралась равной $2H$.

Характерное число Рейнольдса для исследуемой конфигурации, основанное на толщине пластины H и скорости входного потока $U_0 = 60$ м/с, что

соответствует числу Маха $M \cong 0.175$, равно 19680. На первом этапе исследования для расчета использовался подход DDES.

Результаты расчета пограничного слоя методом DDES довольно хорошо согласовались с экспериментальными данными (см. Рис. 7) в точках на пластине вниз по потоку от кромки зазора, что говорит об адекватной работе RANS режима гибридного подхода в пограничном слое стационарного входящего течения. Некоторое отклонение вверх по потоку за задней кромкой может быть связано с тем, что присоединенный пограничный слой при наличии входящих возмущений в рамках DDES подхода считается в URANS режиме, что не совсем корректно.

Графики спектральной плотности мощности пульсаций давления в точке дальнего поля (Рис. 8) показывают достаточно хорошее согласование с экспериментом. Осцилляции на высоких частотах связаны, по всей видимости, с недостаточно удачным выбором контрольной поверхности. Высокие уровни шума на низких частотах, в том числе первый пик, связаны с инсталляционными эффектами.

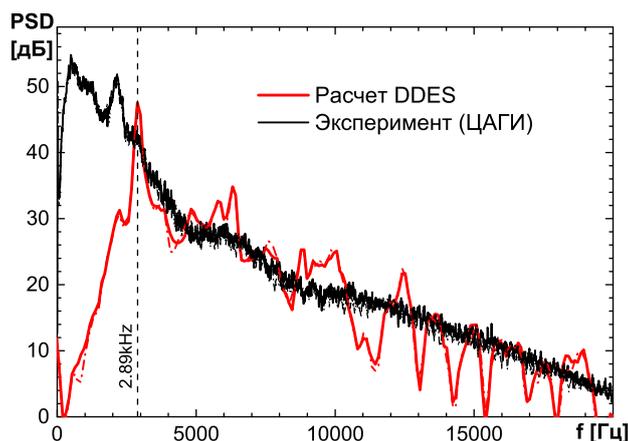


Рис. 8: Спектральная плотность мощности пульсаций давления в точке дальнего поля из расчета методом DDES в сравнении с экспериментальными данными

Из сравнения графиков на Рис. 8 слева можно увидеть различие на величину порядка 800 Гц в значениях основной дискретной частоты (2.1 кГц — экспериментальная, 2.89 кГц — расчетная). Оно может быть обусловлено недостаточно корректным моделированием основного механизма образования шума для данной задачи с помощью метода DDES. Это связано с проблемой серой зоны, когда моделирование из режима RANS переходит в LES режим в окрестности слоя смешения за передней кромкой зазора. Для исследования этой проблемы был проведен расчет в рамках подхода IDDES, в котором пограничный слой, набегающий на переднюю кромку зазора, считался в нестационарном WMLES режиме. Возбуждение входящего течения

достигалось путем установки специальных турбулизаторов на стенке вверх по потоку.

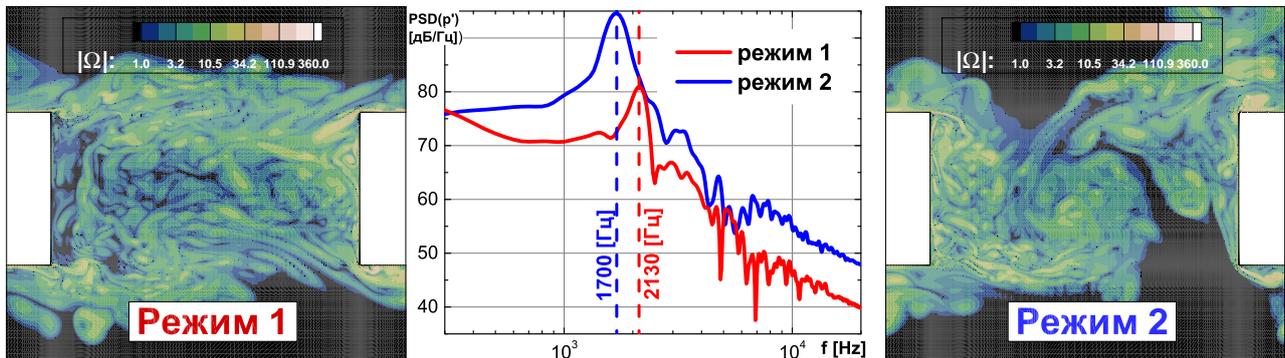


Рис. 9: Мгновенные поля завихренности для двух режимов течения (слева и справа) и спектральная плотность мощности пульсаций давления в точке ближнего поля (в центре) из расчета методом IDDES

В расчете методом IDDES наблюдался неустойчивый характер поведения исследуемого течения с переключением между двумя режимами. Из спектров в точках ближнего поля (Рис. 9 в центре) можно увидеть, что при перестроении течения наблюдается и скачок по значению дискретной частоты, связанной с основным механизмом образования шума для конфигурации «взаимодействие турбулентного потока с зазором». При первом режиме течения (режим 1 Рис. 9 слева) основной акустический источник подобен тому, что наблюдается в каверне с существенным влиянием расположения задней стенки. Второй режим (режим 2 Рис. 9 справа) аналогичен течению в следе за плохообтекаемым телом, в данном случае пластины с острыми кромками. Характерными размерами в этих случаях являются ширина зазора и толщина пластины соответственно. Это приводит к существенной разнице в пиковых частотах ($f_0 = 2130$ Гц и $f_0 = 1700$ Гц соответственно).

Таким образом, анализ представленных в работе результатов моделирования для задачи турбулентного взаимодействия потока с зазором при использовании различных подходов показал, что исследуемое течение имеет неустойчивый характер, и механизм образования шума сильно зависит от входных условий течения и точности их воспроизведения при численном моделировании.

В разделе 4.2 представлены постановка и анализ результатов расчета для задачи обтекания клиновидного тела с обратным уступом, трехмерная модель которого изображена на Рис. 10.

Для исследуемой конфигурации характерно наличие обширной отрывной зоны, которая образуется за обратным уступом, и возникшим в результа-

те этого сложным трехмерным нестационарным турбулентным пристеночным течением, а также вторичной отрывной зоны за задней вертикальной стенкой клиновидного тела.

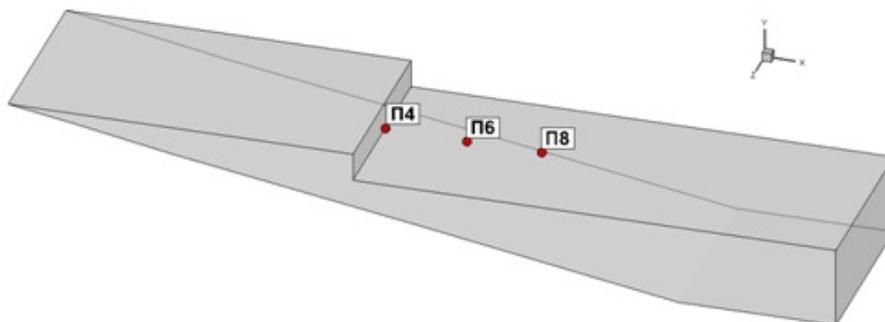


Рис. 10: Клиновидное тело с обратным уступом

Задача характеризуется следующими параметрами: трансзвуковое число Маха $M = 0.913$, число Рейнольдса, рассчитанное по длине L поверхности перед уступом, $Re = 7.24 \cdot 10^6$. Расчетная область для задачи обтекания клиновидного тела с обратным уступом представляет собой параллелепипед, границы которого существенно отдалены от обтекаемого тела. Для описания течения использовались подходы RANS и IDDES. Численное моделирование методом IDDES проводилось на двух сетках, грубой, состоящей из порядка 16 млн. узлов и 96 млн. тетраэдров, и подробной с числом узлов порядка 25 млн. и числом элементов порядка 148 млн. Расчеты проводились на суперкомпьютерах «Ломоносов» и «МВС-10П» при одновременном задействовании до 2024 процессорных ядер.

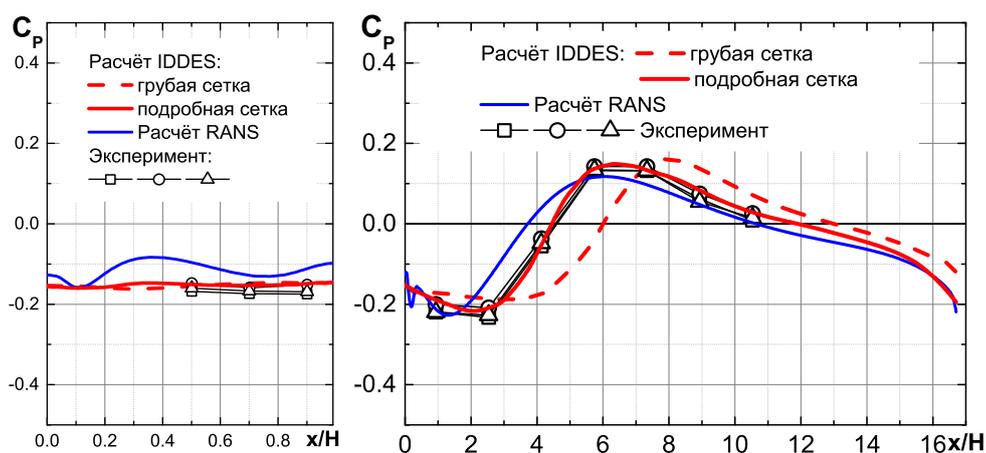


Рис. 11: Распределение коэффициента давления на вертикальной стенке обратного уступа (слева) и на поверхности за уступом (справа) в центральном сечении клиновидного тела

Из графиков осредненного по времени коэффициента давления в центральном сечении на вертикальной стенке уступа и на поверхности за уступом (Рис.11) можно увидеть, что осредненные характеристики течения из нестационарного расчета методом IDDES ближе к экспериментальным данным относительно аналогичных данных из RANS, причем моделирование на подробной сетке позволило существенно улучшить результаты. В диссертации также представлены данные по акустическим нагрузкам в сравнении с экспериментом. Исходя из них можно сделать вывод о том, что разработанные и реализованные в рамках диссертации методики моделирования сложных пристеночных турбулентных течений позволяют эффективно и с достаточной точностью предсказывать как аэродинамические характеристики, так и акустические нагрузки для конфигураций, характерных для авиационной промышленности.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Современные RANS-LES методы семейства DES (DES97, DDES и IDDES) адаптированы применительно к расчетам сложных нестационарных турбулентных течений на неструктурированных сетках.
2. Гибридные подходы для моделирования турбулентных течений реализованы в рамках программного комплекса NOISEtte, предназначенного для расчета задач аэродинамики и аэроакустики на неструктурированных сетках, в том числе с возможностью эффективного использования суперкомпьютеров высокой мощности.
3. Произведена верификация реализованных гибридных RANS-LES методов путем решения задач по моделированию канонических турбулентных течений:
 - моделирование турбулентного пограничного слоя на пластине;
 - моделирование установившегося турбулентного течения в плоском канале;
 - моделирование течения возле бесконечного обратного уступа в канале.
4. Решены две задачи по моделированию сложных нестационарных турбулентных течений с наличием отрыва и присоединения потока, характерных для приложений авиационной промышленности.

- В задаче о взаимодействии турбулентного течения с зазором в механизации крыла, выявлена возможность неустойчивого поведения течения с переключением в различные режимы.
- В результате моделирования трансзвукового обтекания клиновидного тела с обратным уступом показаны особенности сложного, существенно трехмерного турбулентного течения.

В **Приложении А** приведена формулировка подходов DES97, DDES и IDDES на основе модели турбулентности Спаларта-Аллмарса.

Приложение Б посвящено описанию используемых в рамках программного комплекса NOISEtte численных методов.

Благодарности. Автор выражает благодарность:

- научному руководителю д.ф.-м.н. Козубской Т.К. за проявленное терпение и помощь в подготовке диссертации;
- сотрудникам лаборатории «Вычислительная гидроаэроакустика и турбулентность» НИИ ММИСУ, г. Санкт-Петербург во главе с М.Х. Стрельцом за полезные советы и предоставленные материалы;
- руководителям и сотрудникам суперкомпьютерного комплекса МГУ им. М.В. Ломоносова и Межведомственного Суперкомпьютерного Центра РАН за предоставленные ресурсы для проведения расчетов.

Публикации автора по теме диссертации

1. А.П. Дубень, Т.К. Козубская, М.А. Миронов. Численное исследование резонаторов в волноводе // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. — 2012. — № 1. — С. 146–156. — (список ВАК).
2. А.П. Дубень, Т.К. Козубская., С.И. Королев, В.П. Маслов, А.К. Миронов, Д.А. Миронова, В.М. Шахпаронов. Исследования акустического течения в горле резонатора // Акустический журнал. — 2012. — Т. 58, № 1. — С. 80–92. — (список ВАК).
3. Абалакин И. В., Бахвалов П. А., Горобец А. В., Дубень А. П., Козубская Т. К. Параллельный программный комплекс NOISEtte для крупномасштабных расчетов задач аэродинамики и аэроакустики // Вычислительные методы и программирование. — 2012. — Т. 13. — С. 110–125. — (список ВАК).

4. А.П. Дубень. Вычислительные технологии для моделирования сложных пристеночных турбулентных течений на неструктурированных сетках // Математическое моделирование. — 2013. — Т. 25, № 9. — С. 4–16. — (список ВАК).
5. Tatiana Kozubskaya, Alexey Duben, Thilo Knacke, Frank Thiele, Viktor Kopiev, Mikhail Zaitsev. Joint experimental and numerical study of gap-turbulence interaction // AIAA paper 2013-2214. — 2013.
6. I.V. Abalakin, P.A. Bakhvalov, A.V. Gorobets, A.P. Duben, T.K. Kozubskaya. Exploiting modern supercomputers in a research towards quieter aircrafts // Parallel CFD. — Barcelona, Spain, 2011. — May 16-20. — <http://parcfd2011.bsc.es/accepted-paper-list-book-abstracts>.
7. И.А. Абалакин, П.А. Бахвалов, А.В. Горобец, А.П. Дубень, Т.К. Козубская. Программный комплекс NOISEtte для расчетов задач газовой динамики и аэроакустики на неструктурированных сетках // В Тезисах докладов *Второй всероссийской открытой конференции по авиационной акустике*, сентябрь 2011 г. — г. Звенигород, Московская обл., 2011. — С. 135.
8. И.В. Абалакин, А.П. Дубень, Т.К. Козубская, И.В. Беляев, М.Ю. Зайцев, В.Ф. Копьев. Программный комплекс NOISEtte для расчетов задач газовой динамики и аэроакустики на неструктурированных сетках // В Тезисах докладов *Второй всероссийской открытой конференции по авиационной акустике*, сентябрь 2011 г. — г. Звенигород, Московская обл., 2011. — С. 93–94.
9. И.А. Абалакин, П.А. Бахвалов, А.В. Горобец, А.П. Дубень, Т.К. Козубская. Комплекс программ NOISEtte для супервычислений в области аэродинамики и аэроакустики // В Тезисах докладов *XIII международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование»*, 3-7 октября 2011 г. — г. Саров, Нижегородская обл. : ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. — С. 63.
10. I.V. Abalakin, A.P. Duben, P.A. Bakhvalov, A.V. Gorobets, T.K. Kozubskaya. Parallel technologies for simulation of aeroacoustic fields in external turbulent flows // Parallel CFD. — Atlanta, GA, USA, 2012. — May 21-25. — <http://sites.jsums.edu/parcfd2012/book-of-abstracts/>.
11. И.В. Абалакин, П.А. Бахвалов, А.В. Горобец, А.П. Дубень, Т.К. Козубская. Исследование аэродинамического шума на модельных задачах проекта FP7 VALIANT // В Сборнике тезисов *Четвертой всероссийской конференции «Вычислительный эксперимент в аэроакустике»*, 17-22 сентября

2012 г. — г. Светлогорск, Калининградская обл. : МАКС Пресс, 2012. — С. 7–9.

12. И.В.Абалакин, Б.Н.Даньков, А.П.Дубень, Т.К.Козубская. Численное исследование нестационарных режимов отрывных турбулентных течений // В Сборнике тезисов *Четвертой всероссийской конференции «Вычислительный эксперимент в аэроакустике»*, 17-22 сентября 2012 г. — г. Светлогорск, Калининградская обл. : МАКС Пресс, 2012. — С. 10–12.
13. I. Abalakin, A. Gorobets, A. Duben, T. Kozubskaya. Fighting against the airframe noise with square struts and gaps in FP7 VALIANT Project // In Book of Abstracts of *International Workshop «Computational Experiment in AeroAcoustics»*, September 19-22, 2012. — Svetlogorsk, Kaliningrad region, Russia : MAKS Press, 2012. — P. 24–26.
14. И.В.Абалакин, А.В.Горобец, А.П.Дубень, Т.К.Козубская. Моделирование сложных турбулентных течений на неструктурированных сетках с использованием суперкомпьютеров // В Тезисах *XIV Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование»*, 1-5 октября 2012 г. — г. Саров, Нижегородская обл. : ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2012. — С. 11.
15. И.В. Абалакин, А.П. Дубень, Т.К. Козубская, И.В. Беляев, Б.Н.Даньков, А.П.Косенко. Численное моделирование течений вокруг тел с обратным уступом // В Тезисах докладов *Третьей всероссийской открытой конференции по аэроакустике*, 1-3 октября 2013 г. — г. Звенигород, Московская обл., 2013. — С. 213–214.

Для заметок

