

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Гарбарука Андрея Викторовича «Численное моделирование и анализ устойчивости пристеночных турбулентных течений», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация Гарбарука А.В. посвящена совершенствованию методов численного моделирования пристеночных турбулентных течений в приложении к прикладным расчетам в задачах гидродинамики и теплообмена. Эта проблема является **актуальной** как с практической точки зрения (течения данного класса широко распространены в природе и технике), так и в теоретическом плане, поскольку создание универсальной модели турбулентности вне DNS невозможно, и решение проблемы адекватности упрощенных уравнений и точности расчетов неоднородных анизотропных течений связано именно с созданием новых и модернизацией известных частных моделей.

В диссертации (главы 2, 3) предложены

1. Модификации двух популярных RANS моделей турбулентности: переноса вихревой вязкости SA (Спаларт и Аллмарас) и $k-\omega$ модель переноса сдвиговых напряжений SST (Ментер). Во всех случаях усилия были направлены на учет анизотропии тензора турбулентных напряжений и повышение точности расчета пограничных слоев при сравнительно низких числах Рейнольдса. Различные модификации моделей SA и SST позволили более успешно моделировать течения в двугранных углах (сочленение крыла с фюзеляжем); в искривленных каналах и вихревых следах; отрывное обтекание крыла при предельных углах атаки; осесимметричные затопленные струи. Предложенные модели были имплементированы в авторский CFD код NTS и коммерческий пакет FLUENT. Расчеты в обоих случаях для ряда задач практически совпали. *Важно отметить*: автор продемонстрировал, что модификации моделей SA и SST не привели к снижению точности расчета канонических течений, для которых они калиброваны; с другой стороны, на примере 20+ турбулентных течений различного уровня сложности получено повышение точности а сравнении с базовыми моделями. В качестве эталонов при сравнении использовались имеющиеся экспериментальные данные и результаты DNS (рис. 1 – 6 автореферата).

2. Гибридные RANS-LES (HRLM) подходы к моделированию турбулентности на базе методов отсоединенных вихрей DES (Detached Eddy Simulation). Автор продвигает

«затянутые» - Delayed - версии DDES и IDDES, в которых локальный подсеточный масштаб турбулентности определяется не только размером ячейки сетки, но и кинематическими параметрами потока. В сочетании с моделью SA модификация DDES сводится к рекалибровке единственной константы C_{d1} , но дает значительное уточнение расчета пограничного слоя на пластинке (рис. 7). Версии HRLM, использующие зональную модель SST, значительно более сложны и многообразны. В диссертации разработаны и реализованы в рамках кодов NTS и ANSYS FLUENT три DDES модификации. Результаты успешного применения этих моделей к расчету обтекания выпуклости на стенке канала; течение в канале за обратным уступом; сверхзвуковое обтекание цилиндра с плоским донным срезом демонстрируют рис. 8, 9, 10. Показано преимущество в сравнении с оригинальной версией DDES-SST.

Одной из алгоритмических проблем использования зонного DDES-SST подхода является сшивка решений на границе раздела подобластей RANS и LES. В главе 3 описана технология такого сопряжения для структурированных и неструктурированных сеток на основе добавления специальных объемных источников кинетической энергии турбулентности. К сожалению, из автореферата трудно понять механические основания данного алгоритма.

В разделе 3.2 представлена схема аппроксимации конвективных членов в уравнениях переноса. Она отличается от традиционных сеточных схем тем, что использует взвешивание низкодиссипативной симметричной аппроксимации и устойчивой, но диссипативной противопотоковой аппроксимации 1-го порядка не только в зоне LES, но и в зоне RANS. На примере обтекания препятствия на стенке показано (рис. 8), что при таком подходе автоматически обеспечивается взвешенная формула во внешних «невязких» областях и плавный переход к низкодиссипативной аппроксимации в вихревом следе.

3. В главе 4 диссертации автор применяет гибридные RANS-LES подходы для расчета сложных пристеночных течений. Это поперечное обтекание тандема цилиндров (рис. 11, 12); обтекание трехэлементного крылового профиля DLR-F15 (рис. 13); решение задачи аэроакустики при обтекании конфигурации «крыло - закрылок» (крыло в виде пластины конечной толщины и закрылок в виде аэропрофиля NACA0012 (рис. 14 - 16); трансзвуковое ($M=0.85$) обтекание головной части космического аппарата при разных углах атаки (рис. 17, 18).

Полученные результаты наглядно демонстрируют возможности HRLM и их преимущества перед традиционными методами RANS.

Все перечисленные методы моделирования турбулентности, сеточные аппроксимации и

алгоритмы расчета, а также сложнейшие программные коды и решенные задачи турбулентной механики жидкости и газа содержат элементы научной **новизны**.

Разработанные модели, алгоритмы и программы были верифицированы сравнением с частными экспериментальными данными и расчетами других авторов. Приведенные в автореферате графики свидетельствуют о хорошем согласовании результатов тестирования, что подтверждает **достоверность** новых содержательных результатов моделирования пристеночных турбулентных течений.

4. Глава 5 диссертации развивает линейную теорию устойчивости на основе линеаризованных стационарных уравнений Рейнольдса. Задача на собственные значения решается численно на той же сетке, на которой получено базовое стационарное решение RANS. Результаты верификации и валидации метода получены для модели Спаларта-Аллмараса путем сравнения с нестационарными решениями уравнений Рейнольдса и LES для течений Куэтта, слоя Экмана, обтекания крылового профиля бесконечного размаха. Для экономии вычислительных ресурсов А.В. Гарбарук предложил «квазитрехмерный подход», в котором считается, что в одном направлении базовое решение является однородным, а возмущения - гармонические. Разработанный программный код автор применил для определения параметров возникновения трансзвукового бафтинга (нежелательных автоколебаний потока) на крыльях NACA0012, OAT15A, RA16SC1. Определены 2 типа неустойчивостей в зависимости углов атаки и стреловидности. Расчеты показали удовлетворительное совпадение результатов, полученных по затратной трехмерной и экономной квазитрехмерной схеме.

Замечания.

1. Упоминание в автореферате имен выдающихся предшественников и современных исследователей турбулентности позволило бы читателю понять и оценить самопозиционирование автора в науке моделирования вихревых потоков.
2. Разнообразные модификации моделей турбулентности, предложенные в диссертации, не снабжены в автореферате достаточными комментариями с позиций механики жидкости и газа. Это затрудняет понимание побудительных мотивов введения новаций и понимание области приложения каждой усовершенствованной модели.
3. При представлении полученных результатов в автореферате отсутствуют сведения о числах Рейнольдса и параметрах сетки (шаги, сгущения, число узлов, за единственным рекордным исключением).

4. Диссертация вполне могла бы быть защищена и по специальности 05.13.18.
5. Диссертация имела бы законченный вид и без последней главы. Научные и методические результаты этой главы, на мой взгляд, не вполне соответствуют вложенным гигантским затратам алгоритмических и вычислительных ресурсов.

Высказанные замечания и субъективные суждения рецензента не снижают высокой оценки научного уровня диссертационной работы, который, по моему мнению, не только соответствует современному мировому уровню исследований в области численного моделирования турбулентности, но и во многом определяет его.

Диссертационная работа прошла **апробацию** на 23 российских и международных конференциях и симпозиумах; основные результаты по теме диссертации **опубликованы** в 62 печатных работах, в том числе 18 из перечня ВАК и 39 – в изданиях, включенных в базы данных и системы цитирования «Web of Science» и «Scopus».

Считаю, что диссертация «Численное моделирование и анализ устойчивости пристеночных турбулентных течений» удовлетворяет всем требованиям к докторским диссертациям, а ее автор, Гарбарук Андрей Викторович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы.

Профессор кафедры аэрогидромеханики
Казанского (Приволжского) федерального университета,
доктор физико-математических наук, профессор

Мазо Александр Бенцианович

31.10.2020

420008, Казань, Кремлевская, 18. КФУ, каф. аэрогидромеханики. abmazo1956@gmail.com

