

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию **Гарбарука Андрея Викторовича “Численное моделирование и анализ устойчивости пристеночных турбулентных течений”**, представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Гарбарука А.В. посвящена развитию и применению полуэмпирических дифференциальных и вихреразрешающих моделей турбулентности. Работа охватывает широкий круг фундаментальных задач механики жидкости и газа, связанных с отрывом сжимаемых и несжимаемых течений. Применен разработанный в СПбПУ Петра Великого пакет прикладных программ NTS. Работа согласуется с Перечнем основных направлений технологической модернизации РФ (3. Космические технологии, прежде всего связанные с телекоммуникациями, включая ГЛОНАСС и программу развития наземной инфраструктуры). Проблематика диссертации находится в русле приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ (7. Транспортные и космические системы) и связана с разработкой критических технологий РФ (24. Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения). Следует отметить, что исследования были поддержаны грантами РФФИ, выполнялись в рамках международных научных проектов, связаны с заказами ведущих компаний мирового уровня, таких как Боинг и ЦНИИМаш. Диссертация выполнена в имеющей мировой авторитет научной школе СПбПУ Петра Великого при консультационной поддержке одного из видных гидромехаников мирового уровня профессора Стрельца М.Х.

Несомненно, данная диссертационная работа является **актуальной**.

Научная новизна работы представляется вполне обоснованной. Оппоненту представляются важными заявленные в диссертации пункты.

1. Разработаны оригинальные модификации модели переноса турбулентной вязкости Спаларта-Аллмараса (SA модель) и переноса сдвиговых напряжений $k-\omega$ SST модели Ментера (SST модель). Предложены:

- две нелинейные модели турбулентности (BSL EARSM и SST NL), учитывающие влияние анизотропии рейнольдсовых напряжений;

- поправка для учета влияния кривизны линий тока и вращения потока для модели SST (модель SST RC1);

- модификация модели SST для расчета обтекания аэродинамических профилей при условиях близких к срыву потока (модель SST HL);

- две модификации модели SA применительно к расчету осесимметричных течений (модель SA TC) и пограничных слоев при низких значениях числа Рейнольдса (модель SA Low-Re).

2. Усовершенствованы гибридные вихреразрешающие RANS-LES подходы к моделированию турбулентности, а именно:

- предложены две модификации известных методов DDES и IDDES на основе базовой SST модели, одна из которых нацелена на предотвращение нежелательной активации LES-моды в присоединенных пограничных слоях, а другая позволяет существенно упростить формулировку метода;

- адаптированы два эффективных методов ускорения перехода от полностью моделируемой к разрешенной турбулентности в оторвавшихся слоях смешения, разработанных для базовой SA модели, к гибридным RANS-LES подходам на базе SST модели;

- разработана эффективная технология реализации одностадийного RANS/LES подхода с использованием объемных источников в уравнениях переноса импульса и кинетической энергии турбулентности для генерации турбулентного контента на интерфейсе между RANS и LES зонами, применимая на произвольных (как структурированных, так и неструктурированных) сетках.

3. На основе использования развитых вихререзающих методов получены данные о пульсационных аэродинамических и аэроакустических характеристиках ряда отрывных течений для задач:

- поперечное обтекание тандема цилиндров;
- обтекание трехэлементного аэродинамического профиля DLR-F15;
- обтекание модельной конфигурации крыло – закрылок;
- транс- и сверхзвуковое обтекание возвращаемого аппарата и отделяемого головного блока пилотируемого космического корабля в режимах взлета и аварийного отделения от ракеты-носителя.

4. Развита RANS-DNS-IDDES подход на примере расчета трансзвукового обтекания выпуклости на цилиндрической поверхности с формированием скачка уплотнения, отрывом и присоединением пограничного слоя при использовании расчетной сетки, содержащей 8.3 миллиарда узлов.

Практическая значимость работы во многом определяется многолетним успешным выполнением заказов компаний Боинг, ЦНИИМаш и др. Следует отметить

полученные детальные расчетные данные по нестационарным аэроакустическим нагрузкам на элементы пилотируемого космического корабля при полете в плотных слоях атмосферы, а также создание экономичной методологии определения условий начала трансзвукового бафтинга крыла и в получение соответствующих расчетных данных для различных аэродинамических профилей крыла. Интересным представляется развитие программных кодов NTS.

Апробация работы более, чем достаточная. Интересно отметить, что работа над диссертацией заняла почти двадцать лет. 39 публикаций, входящих в базы данных Web of Science/Scopus. Многие из них выполнены в соавторстве с признанными корифеями мировой гидромеханики в области моделирования турбулентности, такими как Crouch J.D., Spalart P.R., Menter F. Однако в списке литературы нет ни одной личной статьи. Все статьи опубликованы в соавторстве. Лишь в 1999г вышло авторское учебное пособие.

О структуре работы. Структура диссертации состоит из оглавления, введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 435 наименований (всего 284 стр. текста). **Во введении** обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи, обозначены практическая значимость и научная новизна. Указаны методология и методы исследования, степень достоверности работы, приведены положения, выносимые на защиту. **Глава 1** посвящена детальному аналитическому обзору, начиная с 2000года, подходов к моделированию пристеночных турбулентных течений, базирующихся на полуэмпирических моделях для уравнений Рейнольдса (RANS, раздел 1.1) и сочетающих RANS с моделированием крупных LES в гибридных подходах HRLM (раздел 1.2). В **главе 2** представлены усовершенствованные RANS модели турбулентности (раздел 2.1), численный метод, используемый для их реализации (раздел 2.2) и результаты их верификации и тестирования на примере большого числа течений, для расчета которых они предназначены (раздел 2.3). В **главе 3** приводятся усовершенствованные автором гибридные RANS-LES модели, численный метод, используемый для реализации этих моделей, и результаты их тестирования. В **главе 4** представлены примеры применения HRLM для решения задач аэродинамики и аэроакустики, связанные с определением осредненных и пульсационных характеристик в отрывных турбулентных течениях. **Глава 5** посвящена анализу устойчивости стационарных решений уравнений Рейнольдса с представлением результатов верификации развитых методов на примерах решения ряда канонических задач об устойчивости ламинарных и турбулентных течений, а также результатов их применения для предсказания условий начала трансзвукового бафтинга на прямых и стреловидных крыльях бесконечного размаха. Заключение на двух страницах суммирует выводы по работе.

Представленная диссертационная работа имеет характерную для работ по численному моделированию структуру. Обзор, методическая часть, тестирование, численные приложения

– все в ней присутствует. Представленные результаты достоверны. Работа однородная и органично сложенная, лишь пятая глава несколько выпадает из общего содержания. Она написана довольно ясно, четко, неплохо иллюстрирована. Работа квалификационная, высокого качества, однако, “пища” для ее обсуждения имеется.

Несколько слов о концепции работы. Вихререзающие методы, основанные на DNS и гибридных подходах (HRLM), сочетающих RANS и LES, привлекают внимание гидромехаников на протяжении нескольких десятилетий. Автор диссертации трудится в одной из авторитетных научных групп, ориентированных на развитие этих методов. Поэтому вполне ожидаемо было увидеть в работе предпочтение методическому материалу по сравнению с параметрическими результатами численных исследований актуальных проблем с интересными физическими эффектами, например, снижением сопротивления, увеличения подъемной силы и аэродинамического качества. Таких ориентированных на эффекты задач в диссертации нет. Также в ней отсутствуют прорывы в понимании фундаментальных черт турбулентности. Акцент в работе делается на анализе отрывных течений с повышенным вниманием к пульсациям давления и аэроакустике. Однако каких-то существенных выводов по этой части не сделано, хотя рассматриваемые в приложении развиваемые методы задачи, в частности, обтекание танделом круговых цилиндров, это позволяли получить. Таким образом, собранные в работе задачи иллюстрируют разработанные вихререзающие методы, отчасти способствуя их верификации. Важно отметить, что рассмотренные задачи относятся к низкоинтенсивным отрывным течениям и их перенос на высокоинтенсивные аналоги может вызвать трудности.

В диссертации значительное внимание также уделено разработке для замыкания RANS новых модификаций SST и SA моделей, в том числе учитывающих влияние анизотропии, вращения и кривизны линий тока. Это важные достижения, хотя работа содержит примеры преимущества HRLM над этими моделями, но все же отмечается, что расчеты вихререзающими методами весьма трудоемки, и проводить оптимизацию конструкций и технологических процессов на их основе преждевременно. Все-таки, полезность HRLM в большей степени проявляется в настройке на тонкие пульсационные процессы в рассматриваемых задачах и анализе влияния пульсаций давления и температуры (которой, кстати, в данной диссертации нет), т.е. за пределами применимости (U)RANS.

Развиваемый группой Стрельца М.Х. пакет NTS применяется в диссертации вместе с пакетом Fluent, для которого написаны дополнительные процедуры. Эта часть работы представлена довольно кратко. Вообще автор не стремится обсуждать вопросы вычислительной эффективности, хотя стремление показать преимущества развиваемых моделей в расчетах отрывных течений есть. Автор мог бы дать оценку ряда пакетов, в которых реализованы вихререзающие методы, например, пакетов StarCCM+ и Logos.

Перед замечаниями Оппонент хотел бы подчеркнуть достижение Гарбарука А.В., представленное в диссертации. Оно касается моделирования акустических процессов в зазоре между головной частью и обтекателем двигательного отсека ракеты-носителя. Появлению автоколебаний давления большой интенсивности дано объяснение в расчетах с использованием DDES. Это сильный результат.

Замечания к работе Гарбарука А.В. возникли по ходу перелистывания страниц автореферата и диссертации.

1. Авторский обзор, несмотря на 435 ссылок, не полон. Отсутствуют ссылки на работы оппонентов и на многие другие публикации, в частности на монографию Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 368 с.

2. О стандартных моделях SST. Оказалось (стр.28), что SST-модель 1993 г подменена моделью 2003 г, т.е. формулы, включающей модуль завихренности из [56] не приведено, а сразу же выписывается формула из [57]. На стр.154 диссертации отмечается, что модель Ментера 1993 года (ссылка [56]) корректируется с учетом влияния кривизны линий тока. Это

выглядит несколько странным. Ведь присутствие в ней модуля завихренности позволяет не вводить поправку на кривизну линий тока, т.к. она в ней не нуждается. А вот вторая модель Менгера 2003 года [57] требует обязательной коррекции на кривизну линий тока.

3. О пристеночных течениях. Автор не пояснил, что под пристеночными он понимает ограниченные стенками течения, в том числе внешнее обтекание тел и профилей.

4. В гл. 1 проигнорировано научное направление, связанное с применением многоблочных разномасштабных сеток, в том числе пересекающихся, в так называемых многоблочных вычислительных технологиях. Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е. Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. Саарбрюкен: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. 316с

5. Автор в разделе 4.1 утверждает что, существующие RANS-модели не способны обеспечить приемлемой точности расчета даже средних параметров данного течения. Однако, есть доказательства получения приемлемых результатов расчетов обтекания тандемов прямоугольных стоек в рамках URANS. Гувернюк С.В., Егорычев О.О., Исаев С.А., Корнев Н.В., Поддаева О.И. Численное и физическое моделирование ветрового воздействия на группу высотных зданий // Научно-технический журнал. Вестник МГСУ. 2011. Т.1. №3. С.185-191. Кроме того, в рамках научного направления по управлению обтеканием тел с помощью крупномасштабных вихрей, которое развивается на протяжении 45 лет, рассматривается обтекание тандемов тел, причем выполнены успешные расчеты с использованием RANS. Отсутствие ссылок на работы оппонента, свидетельствует, что автор с ними не знаком. Однако, безусловно, разработанный им вихреразрешающий подход полезен для важной оценки пульсаций давления.

6. Можно согласиться с тем, что базовая (2003 года) модель SST не улавливает особенностей закрученного потока. Но кроме модификации Смирнова – Менгера есть другие модификации SST: Дурбина в пакете StarCCM+ и Роди-Лешцинера - Исаева в пакете VP2/3. См., например,

Исаев С.А., Баранов П.А., Жукова Ю.В., Усачов А.Е., Харченко В.Б. Коррекция модели переноса сдвиговых напряжений с учетом кривизны линий тока при расчете отрывных течений несжимаемой вязкой жидкости // Инженерно-физический журнал. 2014. Т.87. №4. С.966- 979.

Isaev S.A. Experience of application of SST-model-2003 with correction on streamline curvature according to Rodi-Leshziner-Isaev approach for (U)RANS calculations of separated and vortex sub- and supersonic flows // AIP Conference Proceedings. 2018. 2027, P. 020015.1-7.

7. Сравнение распределений коэффициента трения вдоль стенки квадратного канала, рассчитанных с помощью предложенных моделей, модели SST и DNS убедительно!! Однако интегральные характеристики могут и не сильно отличаться!!

8. Предложены два эффективных методов ускорения перехода к развитой трехмерной турбулентности в отрывных течениях: σ -DDES и SST DDES в сочетании с линейным подсеточным масштабом ΔSLA , адаптированным к слоям смешения. Хотелось бы видеть количественные оценки эффективности и универсальности методов. volumetric source - интересный прием. Насколько широко он тестирован? Идея любопытная! Хотелось бы видеть ее подтверждение на примерах более сложных отрывных течений.

9. Из сравнения распределения коэффициента давления по поверхности трехэлементного профиля DLR-F15 следует преимущество над SST моделью сделанных по IDDES прогнозов в передней части профиля, и, напротив, его отсутствие в задней части. Сравнение данных свидетельствует о приемлемом (в рассматриваемом масштабе) их согласии по осредненным силовым характеристикам.

10. Хотелось бы иметь расшифровку аббревиатур NL, RC1 и HL. Кстати это обычное требование редакторов в журналах.

Автореферат соответствует диссертации и достаточно полно отражает ее содержание.

Диссертация Гарбарука Андрея Викторовича является законченной научно-квалификационной работой, представляющей крупный вклад в разработку и верификацию модифицированных моделей замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса и вихреразрешающих методов DDES и IDDES, а также содержащей теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Содержание полностью соответствует паспорту специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы. Выполненная работа удовлетворяет требованиям п.п. 2.1 -2.8 Положения о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО СПбПУ (утвержденное приказом ФГАОУ ВО СПбПУ от 28.05.2020 №795), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Гарбарук Андрей Викторович достоин присвоения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы.

Заведующий лабораторией
фундаментальных исследований
Санкт-Петербургского государственного
университета гражданской авиации,

доктор физико-математических наук по специальности 01.02.05 механика жидкости, газа и плазмы, профессор
09 ноября 2020 года

isaev3612@yandex.ru 196210, СПб, Пилотов, 38, info@spbguga.ru, 7041818

Подпись профессора Исаева С.А. удостоверяю

Проректор по персоналу-
Начальник УК



 Исаев Сергей Александрович

М.И.Лобов