

ОТЗЫВ
официального оппонента
на диссертационную работу Шорстова Виктора Александровича
«Разработка метода расчета шума элементов авиационных силовых установок
с использованием зонного RANS-IDDES подхода»
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

В диссертации Шорстова В.А. описана численная технология расчета шума воздушно-реактивных двигателей (ВРД), включая шум, созданный возмущениями от твердых поверхностей, и шум, порожденный турбулентностью потока. Технология основана на зональном RANS/LES подходе и содержит целый ряд существенных оригинальных элементов. Также в работе представлена валидация технологии и ее применение к расчету шума ряда элементов силовых установок. В последнее время стало ясно, что гибридные RANS/LES подходы являются наиболее достоверным способом предсказания акустических характеристик ВРД. Однако специфика подхода LES (расчеты в рамках которого всегда требуют огромных вычислительных затрат, находятся на грани разрешающей способности схемы, принципиально зависят от расчетной сетки и используемого численного метода) приводит к тому, что в этой области еще много нерешенных проблем, и всякий успешный опыт является чрезвычайно **актуальным**.

Объем диссертации - 142 страницы. Диссертация содержит 113 рисунков, 8 таблиц и список литературы из 66 наименований. Текст диссертации состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, списка иллюстративного материала, списка таблиц. По теме диссертации опубликованы 3 работы в журналах, рекомендованных ВАК, одна из которых – в журнале, индексируемом в международной системе Scopus.

Все численные исследования выполнены автором с использованием собственной программы. Автор лично реализовал в этой программе все численные методы, которые описаны в его работе.

Введение, кроме формальной части, содержит обзор истории изменения требований к шуму различных элементов ВРД и краткий обзор работ в области вычислительной аэроакустики. Подчеркнуто различие между проблемами, возникающими в современных ТРДД высокой степени двухконтурности (в которых наибольший шум генерируется вентилятором внешнего контура) и в двигателях перспективных сверхзвуковых гражданских самолетов (где шум создается прежде всего турбулентной струей). Обосновывается выбор подхода к моделированию шума ВРД - зонального RANS-IDDES подхода. (Автор использует RANS-IDDES метод, основанный на модели Спаларта-Альмараса, с SLA-коррекцией для формирования турбулентности на начальном участке слоев смещения и с использованием генератора синтетической турбулентности с объемным источником на основе формул, предложенных коллективом Стрельца, Шура и др. Для оценки шума в дальнем поле применялся метод Ффоукс-Уильямса - Хоукинга.)

В **Главе 1** описан используемый численный метод, основанный на низкодиссипативной противопоточной схеме MP5 с расщеплением потоков по методу Роу для аппроксимации конвективных потоков и центрально-разностной аппроксимации диффузионных членов. Метод содержит ряд оригинальных модификаций, предложенных автором. Базовая схема MP5 с явной трехшаговой процедурой Рунге-Кутты заменена на вычислительно эффективную адаптивно- неявную схему, которая является явной схемой высокого порядка точности по времени в LES-области, а в RANS-зонах плавно переключается на неявную схему 1-го порядка точности по времени с возможностью включения неявности только вдоль одного или двух сеточных направлений. Чаще всего используется неявность только вдоль направления, перпендикулярного стенкам с

прилипанием потока, и в этом случае система алгебраических уравнений неявной схемы распадается на независимые трехдиагональные системы для каждого из двух других сеточных направлений, обрабатываемые методом прогонки. Автором предложена вычислительно эффективная процедура уточнения схемы MP5 для неравномерных сеток. Для понижения диссипации схемы автор понижает вес диссипативной части в формуле Роу для потоков, причем на основе опыта, описанного в диссертации, им найдены универсальные формулы для весового коэффициента, которые обеспечивают низкодиссипативный характер схемы, сохраняя качество расчета. Поскольку все формулы схемы расписаны вдоль сеточных линий, схема имеет лишь 2-й порядок аппроксимации по пространству; но для методов LES, которые всегда работают вдали от предела сходимости по сетке, важен не порядок аппроксимации, а сам факт аппроксимации и малодиссипативный характер схемы, который в работе автора, несомненно, достигнут.

Глава 2 описывает тесты, которые использовались для настройки IDDES-метода: распад изотропной турбулентности и развитое турбулентное течение в плоском канале. В первом тесте автор подбирает вес диссипации в методе Роу для получения спектра изотропной турбулентности с областью закона $-5/3$, во втором тесте демонстрируется работоспособность метода в режиме WMLES (с разрешением крупной турбулентности в части пограничного слоя) на сетках, сильно сгущенных к стенке (где ставится условие прилипания), при числах Рейнольдса 400 и 2400 (с разной высотой перехода к WMLES).

В **Главе 3** описываются оригинальные решения, предложенные автором для снижения вычислительных затрат в WMLES-расчетах. Это, во-первых, использование пристеночной функции, основанной на профиле скорости в пограничном слое на пластине и использующей эмпирическую формулу Брэдшоу $\overline{u'v'} \approx -\sqrt{C_\mu} \cdot \bar{k}$ для того, чтобы выразить кинетическую энергию турбулентности через параметр $\tilde{\nu}$ модели Спаларта. Показано, что пристеночная функция дает приемлемые результаты для сеток, удовлетворяющих условию $y^+ < 60$. Правда, не приведены тесты, которые характеризовали бы качество численного решения при расчете отрывных течений (встречающихся в описанных автором задачах). Вторая находка автора – переход на сетки с равным шагом вдоль обоих направлений, касательных к стенке, за счет удаления от стенки области WMLES. Применение обоих решений в совокупности ускоряет расчеты примерно на порядок.

В **Главе 4** разработанная автором численная технология применена к решению двух модельных задач. Первая – задача о шуме задней кромки профиля NACA0012 при обтекании дозвуковым (практически несжимаемым) потоком под нулевым углом атаки. Автором рассмотрены случаи с числом Рейнольдса (основанном на хорде профиля) $Re_c=10^6$, когда пограничный слой является практически всюду турбулентным, и более сложный случай с $Re_c=10^5$, когда пограничный слой является ламинарным на большей части хорды профиля и турбулизируется в области отрыва на верхней поверхности поблизости от задней кромки. Последний случай особенно интересен, т.к. турбулизация в отрыве ламинарного пограничного слоя характерна для лопаток компрессора ТРД. Получено удовлетворительное качество решения, не уступающее расчетам по другим программам на базе методов IDDES и DNS-расчетам. Вторая задача – шум круглой дозвуковой струи при докритическом режиме истечения. Выполнены расчеты на тех же сетках, что и в работах коллектива Стрельца, Шура и др. Получены близкие по качеству (незначительно худшие) результаты. Третья задача – задача о структуре течения и о шуме недорасширенной сверхзвуковой струи, истекающей из сопла прямоугольного сечения с большим отношением сторон (7.35), с возможностью установления пластины, присоединенной к длинной стороне среза сопла. Эта задача интересна тем, что при отсутствии пластины наблюдаются колебания струи с генерацией узкополосного шума (т.н. screech), а пластина позволяет устранить это явление. При отсутствии пластины на начальном участке струи наблюдалось слишком быстрое развитие трехмерных

возмущений, что приводило к разрушению двумерных вихревых структур, ориентированных вдоль длинной стороны среза сопла. Поэтому колебания струи были ослаблены по сравнению с экспериментом. Для устранения этого эффекта автор увеличил в 5 раз коэффициент F_{KH}^{\min} в SLA-поправке, что привело к росту подсеточных напряжений в 25 раз. В результате участок нарастания возмущений в слое смешения струи удлинился по сравнению с экспериментом, но далее возмущения стали развиваться подобно эксперименту (с точностью до сдвига по продольной координате). Это наглядно показывает, что современное состояние гибридных методов LES еще далеко от идеала, и при описании реальных геометрий необходима настройка на основе экспериментальных данных для достижения согласования расчета и эксперимента. В данной задаче турбулизация потока происходила естественным образом. Автор делает предположение, что зонный RANS-LES подход с явной генерацией “турбулентного контента” может оказаться предпочтительней для решения таких задач. К сожалению, такие расчеты в диссертации не представлены, хотя у автора имеются все средства для их проведения. В расчете с пластиной получено существенное снижение амплитуды дискретных составляющих спектра. В обоих расчетах демонстрируется неплохое согласование с экспериментом по характеристикам турбулентности в струе. Представлены и описаны диаграммы направленности шума струи (экспериментальных данных по шуму для сопоставления нет). Показано, что есть направления, где шум определяется тоновой составляющей, исчезающей при установке пластины.

В **Главе 5** представлены результаты применения разработанной технологии к моделированию шума от элементов авиационных силовых установок. Эта глава занимает почти половину всей диссертации. Рассмотрено три задачи.

В первой задаче моделируются структура течения и акустические характеристики выходного устройства демонстратора гражданского сверхзвукового самолета, представляющего собой прямоугольное сопло, к срезу которого присоединен открытый сверху канал прямоугольного сечения (без верхней стенки) с установленными над каналом по его бокам пластинами для экранирования шума. Сначала описано моделирование докритического режима истечения струи. Попытки зонного расчета с генерацией турбулентного контента в конце полуоткрытого канала привели к интенсивным колебаниям струи. Смещение генератора турбулентности ближе к срезу сопла не устранило колебаний и не изменило их характеристики. Колебания сохранились даже в постановке URANS. Сделан вывод, что наблюдаемые колебания имеют физическую, а не численную природу. Даны предположения о механизме колебаний. Указано на то, что в экспериментах ЦИАМ с выходным устройством, имеющем некоторое сходство с данным устройством, была зарегистрирована (но не объяснена) дискретная составляющая шума, которая вполне может быть объяснена эффектом, полученным автором в данной серии расчетов. Предложенный автором механизм должен исчезнуть при сверхзвуковом режиме истечения струи, и в экспериментах ЦИАМ с аналогичным выходным устройством так и происходило. Расчеты сверхкритического режима подтвердили сделанное автором предположение: колебания струи исчезли, дискретные составляющие шума были устранены. Недостатком этих расчетов было то, что рассматривалось истечение холодной струи, хотя в акустических экспериментах ЦИАМ для данного сопла рассматривалась горячая струя. Тем не менее, получено неплохое согласование акустических характеристик шума в дальнем поле с экспериментом и на докритическом, и на сверхкритическом режимах.

В следующем разделе представлены расчеты предложенного автором выходного устройства с поворотной пластиной, которое на режиме шумоглушения (взлет/посадка) превращается в шевронное сопло с пластиной, а на крейсерском режиме превращается в обычное сопло Лавала. Предположение автора о том, что акустические характеристики

такого сопла должны быть, по крайней мере, не хуже характеристик секторных шумоглушающих сопел, разработанных в ЦАГИ и в ЦИАМ, подтвердилось – при том, что устройство, предложенное автором, гораздо проще по конструкции. К сожалению, экспериментальных данных по характеристикам этой конструкции в диссертации нет.

Наконец, третья рассмотренная задача – расчеты шума модельной вентиляторной ступени NASA, включающей вращающийся ротор с 22 лопатками и неподвижный статор с 54 лопатками на посадочном режиме, когда существенна широкополосная составляющая шума. Расчет включал моделирование течения в окрестности ротора во вращающейся системе отсчета с интерфейсами, передающими данные в блоки сетки, отвечающие за входную часть устройства и за течение в окрестности статора. В этих блоках расчет проводился в лабораторной системе отсчета. Генератор турбулентности располагался сразу после ротора. Автор предлагает модификацию формул генератора синтетической турбулентности, которая снижает рассогласованность пульсаций в существенно неоднородном поле скорости за лопатками ротора и таким образом предотвращает распад сгенерированной искусственной турбулентности. Также показано, что недостаточное сеточное разрешение RANS-области может привести к нефизичным эффектам при сходе потока с задних кромок лопаток ротора, что отражается в спектрах шума в виде появления нефизичных дискретных составляющих. Улучшение сеточного разрешения устраняет этот эффект. Получено неплохое согласование расчетных спектров шума с экспериментом как по уровню широкополосной составляющей, так и по частотам дискретных составляющих – несмотря на то, что в данной задаче расстояние от генератора турбулентности до статора невелико и нет места для полной перестройки синтетической турбулентности в “естественную”, соответствующую выбранной математической модели течения.

Автореферат вполне отражает содержание диссертационной работы.

По результатам рассмотрения диссертации Шорстова В.А. можно сделать следующие замечания.

1. Использованный автором в пристенных функциях способ оценки кинетической энергии турбулентности на основе эмпирической формулы Брэдшоу должен приводить к неточному описанию характеристик пограничного слоя, поскольку соотношение Брэдшоу неприменимо к неравновесной турбулентности в вязком подслое и в буферной зоне пограничного слоя. В этом смысле более предпочтительны гибридные RANS/LES методы, основанные на двухпараметрических моделях турбулентности, где кинетическая энергия и характерный масштаб турбулентности определяются напрямую. В рамках модели Спаларта-Альмараса возможным путем улучшения пристенной функции является применение соотношения Брэдшоу не в пристенных ячейках, а в ячейках с $y^+ \sim 100$.
2. Предполагаемый автором “механизм” колебаний струи при докритическом режиме истечения (раздел 5.1.4) вызывает большие сомнения. Главный недостаток рассуждений автора в том, что он применяет к существенно нестационарному процессу связь между давлением и площадью, основанную на законах сохранения стационарных течений. Скорее всего, наблюдаемое явление связано с тем, что крупные вихри, возникающие в слое смешения струи, периодически вызывают локальное заклинивание течения с формированием волн, идущих вверх по дозвуковому потоку и отклоняющих слой смешения в районе среза сопла. К счастью, в диссертации механизм назван предположительным, а в выводы вынесено утверждение о существовании “положительной обратной связи между изменением статического давления на нижней стенке и центральном теле сопла и смещением слоя смешения, сходящего с верхней стенки сопла”. Против такой формулировки возражений нет.

3. Утверждение автора об эффективности предложенного им выходного устройства на основе сравнения расчетных характеристик с экспериментальными данными по эталонному соплу и секторным соплам другой геометрии выглядело бы более убедительно, если бы к этому сравнению были добавлены хотя бы характеристики эталонного сопла, полученные на основе расчетов автора.

Указанные недостатки не снижают научную ценность диссертации Шорстова В.А. Предложенные автором оригинальные элементы численной технологии зональных URANS/IDDES расчетов очень привлекательны, а результаты расчетов доказывают эффективность их использования. Диссертация демонстрирует компетентность и высокий профессионализм автора в исключительно сложной и развивающейся области вычислительной аэроакустики. Глава 5 убедительно доказывает возможность использования разработанной автором технологии и программы для оценки характеристик турбулентного поля течения и дальнего звукового поля силовых установок современных ВРД. Результаты диссертационной работы могут использоваться в научно-исследовательских работах в таких институтах как ЦАГИ, ЦИАМ, в авиационных конструкторских бюро и др.

Диссертация Шорстова В.А. является законченным научным исследованием, в котором предложены новые научно обоснованные технологические решения и получены важные физические результаты, имеющие существенное значение для развития аэроакустики. Диссертация соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Шорстов Виктор Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 - Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв составил заместитель начальника
Лаборатории физического и численного
моделирования течений с горением
Отделения аэродинамики силовых установок
ФГУП «ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского»
доктор физико-математических наук, доцент
140180, Московская область, г.Жуковский, ул.
Жуковского, д.1, (916) 660-71-27,
vlaskenko.vv@yandex.ru


Власенко В.В.

27.10.2021

Подпись Власенко В.В. удостоверяю

Ученый секретарь Диссертационного совета
31.1.006.01 (Д 403.004.01) ЦАГИ
доктор физико-математических наук, доцент
140180 Московская область, г.Жуковский, ул.
Жуковского, д.1, (495) 556-43-38, dissovnet@tsagi.ru




Брутян М.А.

Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие
«Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»
140180, Московская область, г.Жуковский, ул. Жуковского, д.1,
8 (495) 556-43-03, info@tsagi.ru