

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию С.А. Чепрасова «Разработка модели турбулентности и исследование особенностей моделирования течения и шума струй со скачками уплотнения на основе методов RANS и LES», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа С.А. Чепрасова посвящена численному моделированию струйных течений со скачками уплотнения, в том числе вопросам моделирования шума, генерируемого такими течениями. Струи со скачками уплотнения могут реализовываться в современных и перспективных реактивных двигателях как военных, так и гражданских самолетов. Поэтому задача быстрого и качественного моделирования поля течения таких струй с использованием умеренных вычислительных ресурсов, безусловно, актуальна с точки зрения инженерных приложений в интересах промышленности. Кроме того, возможность приемлемой количественной оценки шума таких струй играет значительную роль в создании малозумных двигателей, что важно как с точки зрения удовлетворения нормам и требованиям по шуму на местности и в салоне для самолетов гражданской авиации, так и с точки зрения вопросов акустической прочности и усталости для военных самолетов. Таким образом, диссертационная работа С.А. Чепрасова весьма актуальна и своевременна.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Во введении приведен обзор работ по исследуемому вопросу, обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава носит вводный характер и в целом посвящена анализу возможности расчета газодинамических и аэроакустических характеристик струйных течений с помощью программы ANSYS Fluent 12 из стандартного пакета прикладных программ ANSYS, широко распространенного на предприятиях промышленности. Описаны методики моделирования течения и шума для струй со скачками уплотнения и без таковых, реализованные в данном пакете программ и используемые в следующих главах автором. Первая методика основана на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), вторая – на применении метода моделирования крупных вихрей (LES), который позволяет получать, при должном сеточном разрешении и правильно выбранной и настроенной подсеточной модели, достаточно качественное нестационарное решение и использовать его для расчета шума струи в дальнем поле.

Методические расчеты по методу RANS проводились автором на основе решения двумерных уравнений в предположении осевой симметрии, что оправдано для круглых сопел и позволяет существенно сократить требуемые вычислительные ресурсы и время получения результата. Основные результаты были получены с помощью численной процедуры, основанной на схеме Роу (Roe). Причем автором было обнаружено, что применение численной схемы второго порядка аппроксимации в случае моделирования струйных течений в соплах и каналах сложной геометрии приводит к значительным численным осцилляциям решения вблизи скачков уплотнения, если таковые имеются. Для устранения численных осцилляций решения автором было решено использовать для таких течений комбинированную схему, являющуюся взвешенной комбинацией схем первого и второго порядков точности. Для контроля сходимости результатов расчета по сетке, моделирование RANS проводилось на нескольких сетках так, что на каждом этапе дробления сетки количество узлов последовательно увеличивалось в 2, 4, и более раз в каждом направлении, до тех пор, пока влияние сетки на результаты расчетов интересующих параметров становилось незначительным (менее 5%).

В случае LES моделирования и расчета шума решались трехмерные нестационарные уравнения для сжимаемого газа, которые требуют гораздо больших вычислительных

ресурсов по сравнению с RANS методами. В результате методических исследований автором в качестве оптимального был выбран так называемый неявный LES, когда перенос энергии турбулентных пульсаций к мелким, не разрешаемым сеткой масштабам, моделируется за счет схемной диффузии. Именно такой метод позволил получить более правдоподобную картину течения, характерную для турбулентных струй с большим числом Рейнольдса (более 10^5), когда слой смешения достаточно быстро турбулизуются.

Также в первой главе описаны особенности выбора формы и положения поверхности интегрирования при расчете шума струй методом Фокса Вильямса-Хоукинса (FWH), и сделаны оценки, возникающих при этом погрешностей. Это позволило автору выработать определенные требования к контрольным поверхностям, выполнение которых должно способствовать получению более надежных результатов моделирования шума струй в дальнем поле.

Вторая глава посвящена разработке модификации модели турбулентной вязкости для увеличения точности метода RANS при моделировании струйных течений со слабыми скачками уплотнения. Сначала протестированы типичные модели турбулентности Nut-92, $k-\omega$ SST и RSM на двух модельных задачах: об истечении струи из одноконтурного сужающегося сопла и двухконтурного сопла с центральным телом. Результаты сравнения данных расчета и эксперимента демонстрируют, что ни одной модели турбулентности не удалось одновременно предсказать и характеристики смешения в струе, и систему скачков уплотнения.

Далее приводятся результаты попыток создания модификации модели $k-\omega$ SST с помощью введения дополнительного слагаемого в уравнение баланса кинетической энергии. Такой поправкой не удалось существенно увеличить точность расчета, однако в результате исследования свойств введенной поправки было установлено, что основные процессы, влияющие на распределение скачков уплотнения в струе, происходят в области отражения скачков от слоя смешения. Кроме этого, сделан вывод о том, что путем введения дополнительного слагаемого в уравнение баланса кинетической энергии не удастся локально влиять на скачки уплотнения, не изменив процессов смешения во всей струе.

С целью более детального изучения свойств турбулентности в окрестности взаимодействия скачка уплотнения со слоем смешения сформулирована соответствующая модельная задача, которая была решена методом LES. Это позволило получить пространственное распределение корреляции различных пульсационных величин, включая корреляцию пульсаций давления и дивергенции скорости, которая в виде одного из слагаемых входит в уравнение переноса энергии турбулентности. Показано, что такие корреляции имеют сложный знакопеременный вид, причем метод RANS и известные поправки на сжимаемость не описывают адекватно особенностей их поведения. В результате предложен упрощенный способ модификации модели для турбулентной вязкости в модели Nut-92, заключающийся в использовании различных значений турбулентной вязкости в уравнении движения и в уравнениях модели турбулентности, которые отличаются, в основном, только в области взаимодействия скачков уплотнения/волн разрежения и слоя смешения. Это позволило влиять на поведение скачков уплотнения в струе, без существенного влияния на описание процессов смешения в основной части струи. В ходе перебора различных вариантов связи двух указанных значений турбулентной вязкости получен модифицированный вариант модели Nut-92, применение которого позволило увеличить точность описания рассмотренных автором струйных течений со скачками уплотнения методом RANS.

В третьей главе проводится анализ возможностей метода LES при проведении расчетов шума струй на достаточно грубых (обычно несколько миллионов ячеек) сетках и разрабатывается приближенный подход к моделированию турбулентности внутри сопла для корректного описания начального участка слоя смешения струи. Проведено моделирование течения и шума в дальнем поле для трех струйных течений (дозвуковая струя и две сверхзвуковые). Результаты расчетов сравниваются как с результатами моделирования

других авторов, так и с доступными данными экспериментов, что позволило автору провести анализ точности применения указанного метода. Автором показано, что используемый метод LES имеет существенные ограничения при расчете течения и шума струй, если не привлекать для расчета какие-либо специальные процедуры. Установлено, что при моделировании струй наибольшую трудность представляет описание течения вблизи кромки сопла и предсказание высокочастотной части спектра, т.к. обычно в расчетах переход к развитой турбулентности в слое смешения происходит с существенной задержкой по сравнению с экспериментом. С целью приближения поведения пульсаций в слое смешения, полученных в расчетах, к наблюдаемому в экспериментальных исследованиях, автором предложено вводить внутрь сопла искусственные турбулизаторы (интерцепторы, завихрители), при этом расчет течения внутри сопла и вне его проводится совместно. Подбором параметров турбулизаторов автору удалось улучшить точность моделирования широкополосного шума рассмотренных струй.

В качестве замечаний по работе следует отметить следующее:

1. Некоторые утверждения автора, высказанные в главах 1 и 3, относительно специфики и точности моделирования течения и шума турбулентных струй с помощью расчетов по методу LES, носят слишком обобщающий и не всегда обоснованный характер в рамках проведенного исследования. Исходя из целей работы автор ограничил себя использованием программного пакета ANSYS Fluent, поэтому эти утверждения нужно относить именно к схемам и методам, реализованным в данном пакете, понимая, что на одних и тех же сетках результаты использования метода LES могут существенно зависеть от свойств конкретной схемы, с помощью которой реализован метод.
2. При исследовании шума струй со скачками уплотнения автор совсем не упоминает о работах, в которых широкополосный ударно-волновой шум (broadband shock associated noise), как одна из главных составляющих шума такого типа струй, моделируется с помощью привлечения акустической аналогии на основе данных, полученных из RANS расчета (см., например, Morris&Miller (2010), Miller&Morris (2012)), и которые представляют интерес с точки зрения инженерных приложений, интересующих автора.
3. Предложенный автором метод введения искусственных турбулизаторов внутрь сопла также требует эмпирической настройки (тип турбулизатора, его положение и размеры, а также режим в расчете подбираются из сравнения расчета и эксперимента) и, по-видимому, не является достаточно универсальным в сравнении с тем же гибридным RANS/LES методом.
4. Диссертация содержит достаточно много орфографических и пунктуационных ошибок.

Сделанные замечания не отражаются на высокой оценке диссертации С.А. Чепрасова в целом. Результаты диссертации хорошо отражены в печати и прошли достаточную апробацию на семинарах и конференциях. Основные результаты опубликованы в 6 научных работах, в том числе в 3 статьях из списка ВАК, доложены на семинарах, отечественных и международных конференциях. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Общие выводы диссертации соответствуют содержанию проделанной работы. Характеризуя диссертацию С.А. Чепрасова в целом следует отметить, что результаты работы, касающиеся разработки модификации модели турбулентности Nut-92 с целью увеличения точности описания струйных течений со скачками уплотнения методом RANS, являются новыми, а разработанная модель может быть использована для проведения обширных инженерных расчетов. Результаты исследований по моделированию шума струй на основе реализованного в пакете ANSYS Fluent метода LES и предложенный способ приближенного моделирования турбулентности внутри сопла позволяют более оптимально использовать возможности данного пакета и также могут быть использованы для проведения

оценочных инженерных расчетов. Таким образом, диссертацию С.А. Чепрасова можно определить как законченное исследование, имеющее научную и практическую ценность.

Считаю, что диссертационная работа «Разработка модели турбулентности и исследование особенностей моделирования течения и шума струй со скачками уплотнения на основе методов RANS и LES» удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Чепрасов Сергей Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент,
Начальник отделения аэроакустики
и экологии ЛА ЦАГИ, профессор, д.ф.-м.н.

В. Ф. Копьев

Подпись В.Ф. Копьева заверяю
Начальник НИМК ЦАГИ



В.П. Соколянский