

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Любимова Дмитрия Александровича «Анализ турбулентных струйных и отрывных течений в элементах ТРД комбинированными RANS/LES - методами высокого разрешения», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа Любимова Д.А. посвящена актуальной теме – созданию современных методов расчета турбулентных течений и получению с помощью созданных им программ новых знаний о таких течениях. Известно, что большинство современных расчетов турбулентных течений производится с помощью стационарных и нестационарных RANS методов. Неудовлетворенность в универсальности этих методов применительно к различным турбулентным течениям и возросшее быстродействие ЭВМ способствует появлению и развитию новых методов: LES и DNS. На этом пути встречаются определенные трудности, связанные с размерами расчетных ячеек и с моделированием течения около твердых границ. Несмотря на то, что многие исследовательские группы в настоящее время создают программы на основе этих методов, доля исследованных с их помощью течений еще сравнительно невелика. Автор диссертации разработал свои методы решения уравнений для турбулентных течений, которые находятся в русле прогрессивных современных методов. Им проведен большой комплекс исследований практически важных течений. Это струйные течения и течения в диффузорах. Полученные автором данные обладают научной новизной, связанной с определением характеристик течения и с описанием физики происходящих процессов в струйных течениях; с описанием механизма влияния шевронов на шум струи из двигателя; с исследованием устойчивости струи из двухконтурного сопла ТРД; с объяснением усиления шума при взаимодействии струи с элементами

крыла самолета; с определением характеристик отрывных течений в диффузорах, с потерей симметрии при внешних симметричных условиях в таких течениях и с описанием механизма управления течения в диффузорах с помощью синтетических струй. Таким образом, тема диссертации является актуальной, а полученные в ней результаты обладают научной новизной и практической значимостью.

Первая глава диссертации посвящена построению численных схем интегрирования системы уравнений в двух случаях: сжимаемого и несжимаемого течения. Система включает уравнение неразрывности, движения и, только в случае сжимаемого течения – энергии. Для обоснования выбора соответствующих схем расчета автор диссертации провел анализ существующих схем и остановил свой выбор при решении сжимаемых уравнений на RANS/ILES методе, а при решении несжимаемых уравнений на методе DES.

В случае сжимаемого течения около твердых поверхностей решаются нестационарные уравнения Рейнольдса RANS, а вне турбулентного пограничного слоя – уравнения Навье – Стокса ILES. При этом роль подсеточной турбулентной вязкости играет схемная вязкость. Некоторые расчеты сжимаемых течений в диссертации проводятся с помощью упрощенного метода WMILES, при котором используются пристенные функции для профиля скорости.

В случае несжимаемого течения также используется RANS/LES метод с низкой схемной вязкостью. При этом формально во внешней области решаются уравнения, совпадающие с нестационарными RANS уравнениями. Роль подсеточной турбулентной вязкости играет используемая модель турбулентности. Для решения уравнений используется метод искусственной сжимаемости.

Как для случая сжимаемой жидкости, так и для случая несжимаемой жидкости в уравнения кроме производных по реальному времени вводится

еще одна производная по искусственному времени, по которому происходит процедура итерирования решаемых уравнений.

Во второй главе исследуется применимость методов, предложенных автором диссертации, к расчету струйных течений, а также точность данных расчетов. Рассматриваются случаи и низко и высокоскоростных струй. Так в случае низкоскоростной струи, применяется метод расчета DES для струи, стекающей из прямоугольного сопла и из круглого пристеночного сопла при сравнительно небольших числах $Re = 2000$. В этом случае результаты расчета должны быть близки к результатам прямого численного моделирования. Автору удалось смоделировать «переворот осей» струи. Проведено сравнение спектра пульсаций давления с колмогоровским спектром, показано неплохое соответствие в некотором диапазоне волновых чисел.

Для сжимаемых струй построены схемы пятого и девятого порядков, результаты сравниваются с экспериментальными данными, исследуется точность схемы, сходимость результатов в зависимости от мелкости сетки.

Третья глава посвящена средствам пассивного воздействия на струи, истекающие из сопел различных типов: шевронных, неосесимметричных, с аэродинамическими шевронами. Расчеты проводятся с помощью RANS/ILES и WMILES методов.

Произведены расчеты течений из конического шевронного сопла и из двухконтурного шевронного сопла. В случае шевронных сопел, вследствие отрывов с их поверхности, появляются вихревые структуры, что приводит к нестационарному неупорядоченному течению в струе, течение практически сразу за срезом сопла становится турбулентным. Отметим хорошее совпадение расчетных данных с известными экспериментальными данными. Исследованы шевронные сопла различной геометрии, и для каждой геометрии получены поля производной давления по времени. От данной величины зависит интенсивность и частота излучаемого струей звука. Такие исследования чрезвычайно важны, так как уменьшение шума струи

двигателя самолета сейчас чрезвычайно актуально из-за ужесточения международных норм по шуму от самолета.

Для неосесимметричных струй в зависимости от эксцентриситета исследованы отклонение струи от оси течения, температурные и скоростные поля. Показано, что пиковое значение энергии турбулентности увеличивается на 25 – 30 % по сравнению с осесимметричными струями, а сам максимум смещается на меньшие расстояния по оси течения. Этот факт важен, так как увеличение энергии турбулентности струи приводит к увеличению уровня шума струи.

Чрезвычайно важным является исследование взаимодействия струи от двигателя с крылом, рассмотренное в четвертой главе. Такое взаимодействие, как правило, приводит к увеличению шума по сравнению с изолированной струей. Интересны с точки зрения механики жидкости и газа исследования автора взаимодействия струи от двигателя с концевыми вихрями от закрылков. Исследованы конфигурации, соответствующие режимам взлета и посадки.

Пятая глава посвящена определению характеристик и особенностей течения в S-образном диффузоре. В зависимости от геометрии диффузора и граничных условий на входной границе определены условия возникновения несимметрии течения при симметричных граничных условиях.

При расчете осесимметричного S-образного диффузора автор получил интересные результаты по азимутальной неоднородности течения.

И в случае прямоугольного и в случае осесимметричного диффузоров исследовалось влияние неоднородности полного давления во входном сечении и его влияние на симметрию течения. Выявлено аномальное влияние, когда слабая неоднородность на входе в прямоугольный диффузор приводит к симметризации течения, а сильная, наоборот, увеличивает несимметрию.

В заключительной, шестой главе, проводится исследование влияния синтетических струй на течение в диффузорах. Использование

синтетических струй полезно, если течение в диффузоре отрывное. Особенно это важно в коротких диффузорах, актуальных с практической точки зрения. Благодаря появлению отрывных вихрей в выходном сечении синтетических струй уменьшается размер отрывной области. Течение в самих синтетических струях не моделировалось, а влияние на характеристики течения в диффузоре определялось через периодически меняющиеся граничные условия на выходной границе синтетических струй. Автору удалось показать, что синтетические струи уменьшают потери в диффузоре.

В работе есть отдельные недостатки:

1. Данное замечание касается идеологии решения задачи во внешней области, где в случае сжимаемой жидкости решаются нестационарные уравнения Навье – Стокса. Такие схемы применяются в прямом численном моделировании, но там размер ячейки, на котором производится численное интегрирование, должны быть достаточно малыми – меньше колмогоровского размера. Если размер ячейки больше, то кроме молекулярной вязкости необходимо ввести турбулентную вязкость, которая будет зависеть от размера ячейки. При этом обычная процедура заключается в том, чтобы предложить уравнение для расчета турбулентной вязкости, а далее уже говорить о численной схеме решения получившейся системы уравнений. Автор использует нестандартную идеологию. Он решает уравнения Навье – Стокса с турбулентной вязкостью соответствующей схемной вязкости. Решению каких уравнений это соответствует? Не ясно. Особо следует отметить, что при использовании схем высокого разрешения MP5 и MP9 схемная вязкость разная, а следовательно и решаемые уравнения разные.
2. Имеются претензии к иллюстративному материалу. На многих рисунках имеются англоязычные слова, метрические обозначения. На

рис. 6.2 размерность по оси абсцисс дана на русском языке, а по оси ординат - на английском. На рис. 2.13 приведен спектр пульсаций. Неясны единицы измерений величин, представленных и по оси абсцисс и по оси ординат. То же касается рис. 2.50. Вместо того, чтобы на рис. 4.14, 4.15, 4.16 написать обозначения такие же как на рис. 4.13, написано: «Легенда как на рис. 4.13».

3. Недостаточно исследований, проведенных автором по сходимости результатов в зависимости от числа ячеек расчетной сетки и шага по времени. Так, например, для расчетов сжимаемых струй по схеме девятого порядка на рис. 2.30 приводятся данные по сходимости результатов в зависимости от числа ячеек расчетной сетки. Вместе с тем, приведенные результаты показывают низкий порядок сходимости результатов и не гарантируют, что при дальнейшем увеличении числа ячеек решение выйдет на свое предельное состояние.
4. В тексте диссертации ничего не говорится о сходимости результатов по фиктивному времени τ . Как организован итерационный процесс, при каких условиях он считается сошедшимся? Это очень важно для процедуры получения нестационарных характеристик.
5. Как можно понять из текста диссертации в окрестности твердых стенок используется схема первого порядка точности. Возникает вопрос, если автор стремится к построению схем высокого порядка точности, то почему на поверхности он ограничивается схемой первого порядка?

Следует отметить, что первое замечание можно было бы адресовать не только автору, но и другим исследователям турбулентных течений с помощью метода ILES, а также, некоторым уже изданным монографиям по турбулентным течениям. Поэтому считаю, что отмеченные недостатки не снижают высокого уровня диссертационной работы.

Переходя к общей оценке рецензируемой работы, следует отметить, что она является цельным и законченным научным исследованием. Работа

имеет четкую цель, ее результаты обладают несомненной новизной, актуальностью и практической значимостью. Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов базируются на сопоставлении полученных расчетных данных с данными эксперимента. Большинство решенных в диссертации задач представляют совокупность новых научных результатов, которые можно квалифицировать как крупное научное достижение в исследовании турбулентных течений. Работа прошла апробацию на многочисленных международных и российских конференциях и семинарах, автор диссертации лауреат престижной научной премии им. проф. Н.Е. Жуковского. Основные результаты диссертации опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК. Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание.

Считаю, что диссертационная работа «Анализ турбулентных струйных и отрывных течений в элементах ТРД комбинированными RANS/LES - методами высокого разрешения» соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор Любимов Дмитрий Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,
главный научный сотрудник ЦАГИ,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН



А.М. Гайфуллин

Подпись Гайфуллина А.М. заверяю.

Ученый секретарь диссертационного совета Д403.005.01

д.т.н., профессор



В.М. Чижов