

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Д.А. Любимова «Анализ турбулентных струйных и отрывных течений в элементах ТРД комбинированными RANS/LES-методами высокого разрешения», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Уважаемый председатель и уважаемые члены диссертационного совета!
Дамы и господа!

Разрешите дать оценку диссертационной работы Д.А. Любимова и высказать свое мнение о ней, на основе автореферата, а также доклада соискателя на видеосеминаре ЦАГИ–ИТПМ СО РАН–ИМехМГУ–СПбГПУ.

Диссертация Д.А. Любимова посвящена разработке численных моделей для расчета внутренних течений в турбореактивных авиадвигателях (ТРД) и в выхлопных струях. Проблема адекватного численного моделирования очень сложных турбулентных течений в элементах ТРД является чрезвычайно актуальной. Такое моделирование используется в настоящее время ведущими мировыми компаниями-разработчиками авиадвигателей, такими как Pratt&Whitney, Rolls-Royce и другими, причем численное моделирование и последующий анализ применяются как при проектировании, так и при расследовании причин аварийной и нештатной работы двигателей. Основным интерес представляют весьма «тонкие» характеристики потоков: несимметричность течений в осесимметричных каналах, отрыв и развитие вихревых структур, взаимодействие выхлопных струй с пилонами и элементами механизации крыла, зависимость аэроакустических характеристик от геометрических и газодинамических параметров потока, спектр турбулентности и т.п. Расчеты основаны, как правило, на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS-подход) с использованием того или иного способа замыкания уравнений Рейнольдса – той или иной модели турбулентности. Однако в последнее время наблюдается переход от использования чистого RANS-подхода к моделированию течений комбинированными RANS/LES-методами. Иногда делаются попытки расчета на основе только метода моделирования так называемых крупных вихрей (LES-метод) и даже прямого численного решения уравнений Навье–Стокса (DNS-метод). В целом же проблема разработки адекватных численных моделей является одной из важных и пока еще не решенных в теории ТРД и в других задачах авиационной техники. Автор, как следует из автореферата, развивает и использует в той или иной степени все названные подходы и методы применительно к течениям в авиадвигателях и выхлопных струях. В этой связи тема диссертации является, безусловно, актуальной и полностью соответствует современным тенденциям в мире.

В диссертации рассмотрен широкий круг задач и получено множество новых интересных результатов. Наиболее важными и фундаментальными являются, на мой взгляд, следующие:

1. Впервые удалось получить в численном расчете «поворот осей» (несжимаемой) струи, истекающей из сопла с сильно вытянутой прямоугольной формой среза. Такое пове-

дение струи является одной из ее устойчивых мод в экспериментах, но его не удавалось воспроизвести при численном моделировании.

2. Впервые исследована турбулизация пристеночной ламинарной струи и получена картина ее растекания по поверхности в поперечном направлении. При этом не только геометрия струи, но и характер зависимости пульсаций различных компонент скорости находятся в согласии с экспериментальными данными.

3. Несомненный научный и практический интерес представляют результаты, относящиеся к совместному расчету течений в сопле двухконтурного двигателя и в выхлопной струе; к изучению влияния пилона, угла отклонения закрылка и угла атаки невозмущенного потока на распространение выхлопной струи; влияния геометрических и аэродинамических шевронов на характеристики струи; к исследованию отрывных течений в «агрессивных» S-образных диффузорах различной формы в проточной части двигателя; к исследованию перехода осесимметричного течения в кольцевом межтурбинном диффузоре в несимметричное трехмерное; ряд других результатов.

Для расчета и анализа течений автор рассматривал уравнения Навье–Стокса и Рейнольдса, использовал различные подходы к исследованию рассмотренных задач (DNS, RANS, DES, RANS/LES и его модификации). Во всех случаях автор тщательно исследовал влияние параметров сетки и порядка аппроксимации. Для численного решения он использовал схему расщепления. Для аппроксимации невязких членов исходных уравнений применен очень хорошо зарекомендовавший себя метод Роу и его модификации, а также аппроксимации высоких (5-го и 9-го) порядков для газодинамических параметров при их реконструкции в ячейках сетки. Здесь надо сказать, что, хотя увеличение порядка аппроксимации является общей тенденцией в мире при решении прикладных задач, столь высокий (9-й) порядок в настоящее время использовался лишь в единичных публикациях. Подавляющее большинство исследователей для численного моделирования газодинамических параметров традиционно используют 2-й и иногда 3-й порядок, более же высокий, 5-й и выше, порядок применяется только в задачах аэроакустики. Надо сказать, что продемонстрированное в работе преимущество схемы 9-го порядка при моделировании структуры сложных течений связано с конкретными рассмотренными сетками. Автор везде, где можно, оценивает относительный уровень физической, схемной и турбулентной вязкости, что позволяет аргументированно судить о роли различных физических и схемных факторов в численном моделировании.

Несмотря на очень хорошее впечатление от работы, выскажу все же некоторые моменты, которые могут рассматриваться как дискуссионные, но могут рассматриваться и как направления дальнейших исследований, которые вытекают из диссертации.

1. Автор использует при замыкании уравнений Рейнольдса (в RANS-подходе) модель турбулентности Спаларта–Алмараса, правильно отмечая, что эта модель хорошо описывает пристеночные пограничные слои и проста в реализации. Однако во многих внутренних течениях, особенно когда происходит отрыв потока и образование слоев смешения, значительно чаще используются другие модели и, прежде всего, k - ω SST-модель Ментера [частное сообщение представителей компании Pratt&Whitney]. То же относится и к течению в выхлопных струях. В этой связи интересно было бы сравнить полученные в работе результаты с расчетами по другим моделям. Кстати, подобное пожелание относится и к сравнению ис-

пользуемой автором SGS-модели для подсеточной вязкости в LES-подходе с другими моделями.

2. Основным же вопросом, который, на мой взгляд, все же остается в определенной мере открытым – это вопрос о том, что же с точки зрения газодинамики течений принципиально не позволяет (кроме, конечно, спектров турбулентности и акустического излучения) моделировать RANS-подход в рассмотренных задачах и почему. И в каких случаях требуется обязательное обращение к LES и DNS-подходам?

Подводя итог, можно сказать, что в диссертации разработаны методы и алгоритмы высокого разрешения для решения уравнений Навье–Стокса (DNS-подход) и RANS/LES подхода, весьма обстоятельно исследован широкий круг очень актуальных задач, относящихся к численному моделированию сложных внутренних и струйных течений в авиационной технике. Автор хорошо известен как высококвалифицированный специалист в данной области. Его решающий личный вклад в большинство результатов бесспорен.

В целом, как следует из автореферата, диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу. В ней развиты новые численные модели течений и на их основе получен ряд новых важных результатов, имеющих как фундаментальное, так и большое практическое значение в аэродинамике внутренних и струйных течений. Все это в совокупности является крупным научным достижением в области вычислительной гидромеханики. Ввиду изложенного считаю, что диссертация Д.А. Любимова отвечает требованиям ВАК, а ее автор заслуживает присуждения ему искомой ученой степени.

Профессор Балтийского государственного
технического университета «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова,

Ю.М. Циркунов



Циркунов Юрий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, лауреат премии Н.Е. Жуковского первой степени за 2011 год, член Российского национального комитета по теоретической и прикладной механике.

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова

1-я Красноармейская ул., дом 1, 190005 г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: tsrknv@bstu.spb.su ; Yury-Tsirkunov@rambler.ru