

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Д.А. Любимова  
«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».

Диссертация Д.А. Любимова посвящена численному исследованию и анализу особенностей турбулентных струйных и внутренних отрывных течений в элементах турбо-реактивных двигателей (ТРД). Аэродинамические, теплообменные, акустические и другие характеристики таких устройств существенно зависят от характеристик турбулентности. Понимание природы турбулентных эффектов, возможность надежного предсказания основных закономерностей необходимы для разработки и совершенствования способов управления такими течениями при создании современных ТРД с высокоэффективными характеристиками. Большинство рассматриваемых в диссертации течений относятся к классу задач, для которых возможности использования приближенных полуэмпирических методов ограничены. Для их решения автор разрабатывает линейку вычислительных подходов, основанных на сочетании методов прямого решения уравнений движения в областях, удаленных от твердых поверхностей и модельного описания поля течения вблизи стенок. Пользуясь таким приемом, ему удастся построить весьма экономичный и эффективный вычислительный аппарат, позволивший провести подробные исследования целого ряда конкретных турбулентных течений. Несомненная **актуальность** выполненного Д.А. Любимовым исследования обусловлена как большим фундаментальным значением в механике сплошных сред задач исследования структуры и физической природы сложных турбулентных

течений, так и большим прикладным значением расчетов таких потоков, измерения которых затруднены, а возможности использования приближенных методов ограничены.

Особо следует отметить методическую ценность работы Д.А. Любимова. В диссертации дан глубокий критический анализ существующих подходов к численному моделированию сложных турбулентных течений с явным разрешением вихревых структур. Обосновывается выбор способа модельного описания течения в пристеночной области, объясняется мотивация использования ILES (Implicit Large Eddy Simulation) для описания течения вдали от твердых поверхностей, в слоях смешения, в отрывных зонах, т.е. где турбулентные вихри не универсальны. Автор большое внимание уделяет мотивированному выбору способа аппроксимации различных членов уравнений Навье-Стокса, поскольку это во многом определяет точность и эффективность методов LES.

В диссертации подчеркивается важность адекватного задания входных граничных условий при расчете струй из сложных сопел, для чего необходим расчет течения внутри сопла одновременно с расчетом вытекающей из него струи. В работе отмечается, что упрощенный подход, когда задается стационарное поле течения на срезе сопла, полученное из вспомогательного расчета всего поля течения с помощью уравнений Рейнольдса с модельным описанием турбулентных напряжений (RANS), может вызвать затруднения при расчете сложных сопловых конфигураций, типичных для современной авиации.

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения.

Во *введении* описана специфика задач, которые рассмотрены в диссертации, приведен обзор литературы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, дано краткое содержание глав диссертации.

В *первой* главе выполнен критический анализ известных методов расчета течений в элементах ТРД. Сформулированы основные требования,

предъявляемые к эффективному комбинированному RANS/LES методу для инженерных приложений. Рассмотрены основные составляющие, определяющие точность и эффективность метода: разностная аппроксимация уравнений, модель подсеточной турбулентности (SGS-модель), способы численного интегрирования по времени. Показано, что для расчета низкоскоростных течений можно использовать комбинированный RANS/LES-метод с явной SGS-моделью (в качестве такого метода выбирается метод DES). А для расчета сжимаемых дозвуковых и сверхзвуковых течений эффективнее использовать комбинированные RANS/LES-методы с неявной SGS-моделью. Далее описаны детали численной реализации комбинированных RANS/LES методов расчета несжимаемых и сжимаемых течений. Приведены системы уравнений, описан метод решения, использованная модель турбулентности.

Эффективность построенной методики в применении к струям из сопел различных типов демонстрируется во *второй* главе диссертации. Методом DES выполнен расчет несжимаемых турбулентных струй с сильной деформацией поперечного сечения: свободной прямоугольной и пристеночной, вытекающей из круглого сопла. Анализируются характеристики турбулентности, обсуждаются полученные качественные эффекты: «переворот осей» в прямоугольной струе, поперечное растекание пристеночной струи. Далее представлены результаты совместных расчетов RANS/LES методом течения в соплах и в их струях при дозвуковом и сверхзвуковом режимах истечения. Исследуется зависимость параметров течения в струе от числа Маха и температуры на срезе сопла. Предложен простой способ создания нестационарного пограничного слоя на срезе сопла.

В *третьей* главе исследуется влияние шевронов на течение в струе из одиночного сопла. Оценивается влияние шевронов на сопле газогенератора и эксцентриситета сопла газогенератора в сопле двухконтурного ТРД на уровень энергии турбулентности в струе. На основании результатов расчетов детально исследовано и объяснено

воздействие «аэродинамических шевронов» на течение в струе из сопла двухконтурного ТРД.

Результаты исследования течения в струе из сопла двухконтурного ТРД с учетом влияния пилона и крыла с закрылками при различных значениях угла атаки внешнего потока представлены в *четвертой* главе.

*Пятая* глава посвящена обсуждению результатов изучения особенностей турбулентных течений в S-образных диффузорах при наличии отрыва потока. Рассмотрены прямоугольные и кольцевые диффузоры с различной степенью диффузорности.

В *шестой* главе диссертации исследована эффективность применения синтетических струй для управления отрывными течениями в диффузорах различной геометрии с целью улучшения их характеристик. Показана применимость упрощенного моделирования генератора синтетических струй. Для прямоугольных S-образных диффузоров с разной степенью диффузорности получены зависимости снижения потерь полного давления и неравномерности параметров течения и турбулентности на выходе от параметров синтетических струй.

В заключении представлены основные выводы, сделанные по результатам диссертационной работы.

**Научная и практическая ценность** диссертации Д.А. Любимова обусловлена полученными в ней результатами и состоит в следующем:

разработан эффективный вычислительный подход численного анализа турбулентных струйных течений, включая сверхзвуковые течения со скачками уплотнения и внутренние отрывные течения, сочетающий методы RANS и LES. На ряде конкретных примеров показана применимость разработанного подхода, в том числе и в тех случаях, когда более простые подходы, основанные на использовании полуэмпирических моделей турбулентности, оказываются непригодными;

показана необходимость и возможность совместного расчета течений в соплах разных типов и в их выхлопных струях. Рассмотрены сопла

следующих типов: коническое, коническое шевронное, биконическое сверхзвуковое, сопла двухконтурного ТРД, в том числе с шевронами на сопле газогенератора;

получен целый ряд новых физических результатов, касающихся зависимости характеристик турбулентности в истекающей струе от условий на срезе сопла, особенностей развития струи двухконтурного ТРД, влияния центрального тела и шевронов, в том числе и «аэродинамических шевронов». Изучены эффекты, связанные с несоосностью расположения сопел газогенератора и вентилятора. Рассмотрены компоновки, состоящие из сопла с пилоном и крыла с отклоненными закрылками;

показано, что для описания физических особенностей отрывных турбулентных течений в диффузорах необходим расчет течения во всем диффузоре даже для случая двумерной геометрии;

найжены упрощенные граничные условия, пригодные для моделирования синтетических струй и механизма их воздействия на отрывные течения в диффузорах. Показано, что применение синтетических струй позволяет значительно улучшить характеристики сложных диффузоров в элементах ТРД, уменьшить или устранить отрывные зоны в них, уменьшить длину таких устройств без ухудшения их характеристик.

В целом работу Д.А. Любимова можно охарактеризовать как крупный вклад в теорию и практику расчета сложных турбулентных течений. Ее результаты несомненно найдут свое применение в будущем при проектировании элементов авиационной и космической техники.

Степень достоверности полученных в диссертации результатов представляется достаточно высокой ввиду следующих обстоятельств. В работе использованы современные вычислительные подходы и модели, которые достаточно апробированы. Применимость этих методов в условиях рассматриваемых задач детально проанализирована в диссертации, а правильность выбора основных параметров специально обоснована. В диссертации повсеместно, где это возможно проводится сопоставление с

данными эксперимента и расчетами других авторов. Полученные в диссертации результаты физически непротиворечивы и соответствуют, в основном, существующим представлениям о структуре струйных и отрывных течений. Дополнительным свидетельством достоверности полученных в диссертации результатов является их широкая апробация на национальных и международных семинарах и конференциях.

Диссертация Д.А. Любимова имеет общий объем 289 страниц, включающий 213 рисунков, 5 таблиц, а также список литературы, состоящий из 255 наименований. Несмотря на достаточно большой объем, работа отличается кратким и в основном четким и понятным стилем изложения материала. Содержание диссертации отражает не только серьезный объем, но и большую глубину проведенного исследования. Все разделы диссертации тесно логически связаны между собой и представляют в совокупности цельное завершенное научное исследование.

**Замечания** по оформлению диссертации:

использование некоторых аббревиатур (ILES, WMILES) в тексте предшествует их расшифровке;

в разделе 2.1.2 утверждается, что течение в свободной струе рассчитывается методом DES, применение которого, однако, предполагает наличие твердой стенки;

в разделе 2.2.3 при расчете сверхзвукового течения монотонной схемой получено, что схемы высокого порядка более точны, чем схемы низкого порядка. Без должного обоснования делается вывод, что это результат «лучшего разрешения вихрей». На мой взгляд, это лишь результат уменьшения схемной вязкости;

проблеме выбора размера расчетной сетки в работе уделяется непозволительно мало внимания – всего лишь один раздел 2.2.3. Показана сходимости результатов при уменьшении шага сетки в одном конкретном примере. При этом не делается никаких выводов, на основании которых

потенциальный пользователь разработанных методов мог бы оценивать потребности в размерах сетки;

в нескольких случаях делаются утверждения, не подкрепленные в должной мере фактическими данными. Например, в разделе 2.2.4 (стр. 96) немонотонное распределение пульсаций скорости около среза сопла объясняется недостаточностью сеточного разрешения. Однако, ни результатов, полученных на других сетках, ни упоминания об их наличии в тексте не приводится. Аналогично, в разделе 2.3.2 отличие полученных результатов от результатов DNS без должного обоснования относится на счет недостаточного сеточного разрешения;

на мой взгляд едва ли можно согласиться с утверждением о близости представленного на рис. 2.40 профиля скорости к логарифмическому, то же относится к утверждению о наличии степенных участков с законом  $-5/3$  в спектрах пульсаций на рис. 2.13 и 2.50;

в разделе 2.4 двухконтурное сопло с центральным телом рассчитывается методом RANS/ILES. Почему в этом случае не используется WMILES?

в работе рассмотрено большое число отдельных задач, выводы по которым собраны лишь в заключении к диссертации. На мой взгляд, материал воспринимался бы лучше, если бы выводы сопровождали каждую главу;

мотивы выбора различных методов в тех или иных конкретных задачах не всегда очевидны. Не всегда ясны также мотивы выбора используемых значений газодинамических, геометрических и алгоритмических параметров.

Сделанные выше замечания не снижают, однако, общую высокую оценку диссертации Д.А. Любимова, которая является законченной научно-исследовательской работой, обобщающей многолетний труд соискателя в указанной области. Тема диссертации и характер выполненных исследований **соответствует** специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Все основные результаты диссертации опубликованы, в том числе в журналах, рекомендованных ВАК, а также в трудах отечественных и международных конференций. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Суммируя сказанное выше можно заключить, что по объему выполненной работы, новизне полученных результатов, их научной и практической ценности диссертация Д.А. Любимова **удовлетворяет** всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор без сомнения **заслуживает** присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,  
заведующий лабораторией общей аэродинамики  
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова  
(119192, Москва, Мичуринский проспект д.1,  
тел. (495)939-3121 , факс (495)939-0165,  
email: [common@imec.msu.ru](mailto:common@imec.msu.ru), сайт [www.imec.msu.ru](http://www.imec.msu.ru))  
доктор физико-математических наук  
(тел. (495)939-32-49, email: [nvnikitin@mail.ru](mailto:nvnikitin@mail.ru))

Никитин Николай Васильевич

Подпись Н.В. Никитина удостоверяю.  
Директор НИИ механики МГУ  
имени М.В. Ломоносова

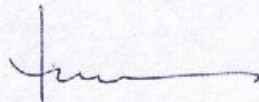
Окунев Юрий Михайлович



Все основные результаты диссертации опубликованы, в том числе в журналах, рекомендованных ВАК, а также в трудах отечественных и международных конференций. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Суммируя сказанное выше можно заключить, что по объему выполненной работы, новизне полученных результатов, их научной и практической ценности диссертация Д.А. Любимова **удовлетворяет** всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор без сомнения **заслуживает** присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,  
заведующий лабораторией общей аэродинамики  
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова  
(119192, Москва, Мичуринский проспект д.1,  
тел. (495)939-3121 , факс (495)939-0165,  
email: [common@imec.msu.ru](mailto:common@imec.msu.ru), сайт [www.imec.msu.ru](http://www.imec.msu.ru))  
доктор физико-математических наук  
(тел. (495)939-32-49, email: [nvnikitin@mail.ru](mailto:nvnikitin@mail.ru))



Никитин Николай Васильевич  
23.10.2014

Подпись Н.В. Никитина удостоверяю.  
Директор НИИ механики МГУ  
имени М.В. Ломоносова



Окунев Юрий Михайлович