

## **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».

В настоящее время математическое моделирование начинает активно и вполне успешно применяться для решения задач авиационной промышленности. Этому способствует бурный рост производительности современной вычислительной техники и, отчасти вызываемое этим ростом, интенсивное развитие математических моделей и численных методов. В последнее десятилетие серьезные усилия в развитии методов математического моделирования направлены на поиск новых подходов численного моделирования турбулентных течений, возможность адекватного воспроизведения которых также открылась благодаря мощности современных вычислительных комплексов. В этой связи основные акценты при выборе метода моделирования турбулентных течений стали все больше смещаться в сторону вихреразрешающих подходов. Для многих задач, где важны нестационарные процессы, такие подходы не только заметно повышают точность предсказания аэродинамических характеристик, но и позволяют исследовать спектральные свойства турбулентного течения и, в частности, создаваемые им акустические поля.

Из вихреразрешающих подходов в настоящее время наиболее распространены гибридные RANS/LES подходы, сочетающие в себе экономичность RANS возле стенок и эффективность LES вдали от них. Тем не менее, чаще всего, эти подходы достаточно требовательны к вычислительным сеткам и процессу проведения моделирования, что является фактором, препятствующим их широкому применению в решении практических задач авиационной промышленности, где нужно рассматривать реальные конфигурации и получать решение за короткое время.

В связи с этим, работа Д.А. Любимова, основной целью которой является разработка технологичного, то есть экономичного с вычислительной точки зрения, и эффективного, позволяющего достигать приемлемой точности, подхода, является крайне актуальной. Разработанные подходы автор диссертации применяет для численного решения большого количества реальных задач в достаточно сложных конфигурациях, характерных для элементов ТРД современного самолета. Тем самым он не только оценивает

возможности разработанной методики, но и непосредственно внедряет их в качестве инструмента в инженерную практику, получая при этом интересные физические результаты.

Диссертация Д.А. Любимова состоит из введения, шести глав и списка литературы. Работа изложена на 289 стр. текста, включая иллюстрации. Список цитируемой литературы содержит 255 источников.

Во введении раскрыта актуальность работы, при этом представлен анализ проблем, связанных с эффективной и бесшумной работой ТРД и методов их решения, применяемых в настоящее время специалистами в области аэродинамики и аэроакустики. Целью работы автор ставит создание эффективного гибридного вихреразрешающего RANS/LES метода для моделирования и исследования турбулентных течений, возникающих в различных элементах турбореактивного двигателя самолета. В числе задач стоит реализация разработанного метода и проведение численных исследований турбулентных течений для множества конфигураций, составляющих ТРД. Среди требований к разрабатываемому в рамках диссертации подходу автор выдвигает требование его вычислительной экономичности, что несомненно актуально и практически важно. Далее во введении кратко раскрывается содержание основных глав работы.

Первая глава диссертации является методологической. В ней описывается процедура построения разработанного гибридного RANS/LES метода. Сначала рассматриваются основные элементы, составляющие методику моделирования турбулентных течений с помощью вихреразрешающего подхода: методы численной дискретизации по пространству и интегрирования по времени уравнений для RANS и LES; модели турбулентности, подсеточные (SGS – sub-grid scale) модели. В кратком виде приведен анализ существующих гибридных RANS/LES подходов. Особое внимание уделяется способу дискретизации конвективных членов уравнений для LES, что, как известно, оказывает критическое влияние на точность расчета с помощью данного подхода. Далее на основе произведенного анализа приводится процесс построения численной методики. При этом логично и аргументированно описан выбор ее составляющих. В качестве вихреразрешающего RANS/LES подхода для моделирования несжимаемых течений выбирается метод DES. На основе него автор разрабатывает гибридный RANS/ILES подход, который впоследствии используется для проведения большого количества расчетов, представленных диссертации. Также в данной главе приводится формулировка предложенного автором метода WMILES, который, как пишет автор, «позволил улучшить точность расчета ... на относительно грубых расчетных сетках по сравнению с

RANS/ILES методом». Отмечу, что данная глава написана логично и содержательно, что может сделать ее полезной в качестве некого руководства для специалистов, занимающихся разработкой газодинамических кодов и моделированием турбулентных течений.

Остальные главы диссертации, со второй по шестую, посвящены применению разработанных и реализованных Д.А. Любимовым вихреразрешающих методов для исследования турбулентных течений, возникающих вокруг элементов ТРД.

Во второй главе рассматриваются возможности гибридных RANS/LES методов для моделирования струйных течений. Расчеты проводятся с использованием как метода DES, так и разработанных автором в рамках настоящей работы RANS/ILES и WMILES методов. Верификация и оценка возможностей проводится на основе сравнения с доступными экспериментальными данными. Также в данной главе уделяется внимание повышению точности указанных методов путем использования схем более высокого порядка аппроксимации (схемы MP9 9-го порядка вместо MP5 5-го порядка). Кроме того, Д.А. Любимову удалось улучшить результаты моделирования за счет ускорения «численного перехода» в слое смешения на кромке сопла при помощи искусственной турбулизации пограничного слоя и использования разработанного автором WMILES подхода. В целом, как показали представленные во второй главе результаты расчетов, RANS/ILES и WMILES подходы позволили автору с приемлемой точностью предсказать аэродинамические характеристики рассмотренных им струйных течений при моделировании на достаточно грубых сетках.

Третья глава диссертации посвящена исследованию влияния средств пассивного воздействия на течение в струях различного типа. Автору удалось провести большое количество расчетов для достаточно сложных конфигураций и провести качественный и количественный сравнительный анализ, безусловно полезный для создателей турбореактивных двигателей. При этом стоит еще раз отметить, что, судя по описанным постановкам и размерам используемых сеток, для получения представленных качественных и количественных результатов были задействованы относительно скромные вычислительные мощности.

В четвертой главе диссертации представлены результаты расчетов для более сложных постановок, приближенных к реальному самолету. В конфигурации двухконтурного ТРД учитывалось и исследовалось наличие и влияние пилона, крыла с закрылком, а также угла атаки внешнего потока.

Сравнительный анализ проводится для аэродинамических характеристик струи двухконтурного ТРД, в том числе со сравнением с доступными экспериментальными данными.

В отличие от постановок, рассмотренных автором в главах 2-4, в пятой и шестой главах приведены результаты задач по моделированию внутренних турбулентных течений, в которых существенно влияние твердой стенки. Проводится численное исследование течений в диффузорах различной формы, оценивается влияние различных параметров установки на аэродинамические характеристики. В шестой главе рассматривается влияние эффективности применения синтетических струй как средства управления отрывным течением в диффузоре.

Относительно представления всех рассмотренных в диссертации расчетов необходимо замечу, что вычислительная постановка задач, а также анализ полученных результатов описаны подробно и ясно.

В конце диссертации приведены основные результаты диссертации с указанием того, что автором было сделано впервые.

В качестве замечаний и вопросов к содержанию диссертации можно отметить следующие, большей частью относящиеся к методике моделирования турбулентных течений.

1. В первой главе подробно рассмотрены численные методы. В то же время, как мне кажется, недостаточно внимания уделено обзору современных гибридных методов и, соответственно, основным принципам их построения.
2. При описании построения гибридной RANS/ILES модели (стр. 57 диссертации) не указано, по каким, прежде всего физическим, принципам, строился данный гибридный подход. В частности, почему переключение с зоны RANS в зону ILES происходит при  $d > C_{DES}\Delta_{max}$ ? Также неясно, насколько корректно будет моделироваться этим методом пристеночное течение возле острых кромок? Известно, что для метода DES такая проблема существовала и была решена путем введением специальной поправки, модифицирующей оригинальный метод.
3. Не ясна физическая обоснованность построения модели WMILES (стр. 58 диссертации). Насколько корректно сопряжение закона стенки в первой пристенной ячейке с ILES в остальной области и не может ли это привести к неправильному моделированию течения в зоне примыкания?

4. Для обоих разработанных гибридных методов (RANS/ILES и WMILES) в диссертации не были приведены результаты верификационных расчетов каких-либо канонических турбулентных течений (моделирование обтекания пластины, течения в канале и др.). Это необходимо, например, для оценки возможности разработанных автором методов корректно моделировать течение в области, где разрешенные турбулентные структуры взаимодействуют с твердой стенкой. Это актуально, как минимум, по той причине, что далее автором (в главах 4, 5, 6 диссертации) рассматриваются задачи (в частности, диффузоры), где ожидается весьма существенное влияние стенки.
5. В расчетах низкоскоростных турбулентных струйных течений (глава 2, раздел 2.1 диссертации) автор использовал известный метод DES. Никаких сравнений с разработанными в диссертации подходами при этом не приводится. Применимы ли они для моделирования таких задач? Будут ли они более точными или быстрыми?
6. На стр. 92-93 диссертации на рисунках 2.30-2.31 приведены результаты моделирования для трех различных сеток, отличающихся друг от друга количеством узлов примерно в 2 раза. При этом ничего не сказано о технике сгущения сетки. Разница в общем количестве узлов сетки, вообще говоря, не является показательной.
7. В диссертации не раз приводится сравнение с экспериментальными данными, которые для одних и тех же конфигураций заметно отличаются друг от друга (например, на рис. 2.37-2.38 на стр. 101-102). Таким образом, не всегда понятно, каких данных автор диссертации придерживался для сравнения и оценивал корректность моделирования исследуемых течений.
8. В разделе 2.4 главы 2 приводится сравнение расчетов с помощью схем MP5 и MP9 на различных сетках. Сетки отличаются при этом не только по количеству узлов, но и по разрешению в различных зонах расчетной области. В таких условиях сравнение точности численных схем различного порядка аппроксимации представляется не вполне убедительным. Интересно было бы также увидеть в диссертации результаты исследования точности используемых схем на неравномерных сгущающихся сетках для гладких решений.
9. В главе 3 для исследования струй из шевронных сопел используется в одних случаях RANS/ILES метод (в расчетах, результаты которых описаны в разделах 3.1, 3.3, 3.3), а в других – WMILES (раздел 3.5).

Возникает вопрос, почему расчеты, описанные в первых разделах главы 3, не проводились с помощью WMILES подхода, который, как указал автор в пункте 1.2.9 на стр. 58, позволяет улучшить точность расчета по сравнению с RANS/ILES методом? Можно ли ожидать улучшений результатов в данных задачах за счет использования WMILES подхода?

10. При описании постановок задач для конфигураций, в которых влияние твердых стенок существенно (главы 4-6), не указаны такие важные для точности моделирования характеристики сеточного разрешения, как, например, безразмерный шаг в пристенной области ( $y^+$ ).
11. В диссертации автор предложил достаточно экономичный и простой вихреразрешающий метод для моделирования сложных турбулентных течений на достаточно грубых сетках. В работе приведены результаты большого количества расчетов для различных конфигураций. В связи с этим хотелось бы увидеть в диссертационной работе раздел об общих принципах построения и минимальных ограничениях для вычислительных сеток, обеспечивающих, при проведении расчетов с помощью разработанных методов, адекватные и достаточно точные результаты моделирования.
12. Текст диссертации содержит некоторое количество опечаток и грамматических ошибок. Например, на стр. 79 в 7й строке в слове «удовлетворительного» пропущено окончание «го»; на стр. 122 в первом абзаце написано «...распределения скорости продольной скорости...».

На мой взгляд, отмеченные выше замечания и недостатки не являются критичными и не умаляют достоинств проделанной работы. Диссертация Д.А. Любимова заслуживает положительной оценки. В ней разработаны технологичные, то есть достаточно экономичные и эффективные, методы, которые, как было наглядно продемонстрировано, позволяют при небольших вычислительных затратах с приемлемой точностью решать сложные задачи, стоящие перед авиационной промышленностью. Автором было проведено большое количество расчетов, получено и проанализировано множество данных для широкого спектра турбулентных течений возле конфигураций, связанных с турбореактивным двигателем современного самолета. Представленный материал является несомненно полезным для разработчиков ТРД. Содержание глав со второй по шестую демонстрируют потенциал численного моделирования, который можно уже сейчас использовать при решении задач, стоящих перед авиационной промышленностью.

Можно утверждать, что результаты диссертации достоверны и научно обоснованы. Они прошли широкую апробацию. Все основные результаты диссертации опубликованы в серьезных научных изданиях и были представлены на профильных российских и международных научных конференциях. Отмеченная автором новизна полученных результатов не вызывает сомнений.

Автореферат диссертации в достаточной мере раскрывает её содержание.

Считаю, что работа Д.А. Любимова «Анализ турбулентных струйных и отрывных течений в элементах ТРД комбинированными RANS/LES методами высокого разрешения» соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. В диссертации изложены новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Автор диссертационной работы Д.А. Любимов, по моему мнению, заслуживает присвоения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент

Д.ф.-м.н., ст.н.с., зав. сектором

Института прикладной математики

им. М.В.Келдыша РАН

Т.К. Козубская

Подпись Т.К. Козубской заверяю:

ученый секретарь ИПМ им. М.В.Келдыша РАН,

к.ф.-м.н.

« 24 » октября 2014 г.

А.И. Маслов



Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН

Москва, 125047, Миусская пл., 4

Тел. +7(499)7912760, Е-мейл: tata@imamod.ru