

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»

Диссертация Д.А.Любимова направлена на разработку и приложение гибридных RANS/LES-методов повышенного разрешения, ориентированных на проведение массовых практических расчетов таких струйных и отрывных турбулентных течений, для которых принципиальным является вопрос достаточно точного предсказания спектра крупно- и среднемасштабных вихревых структур, развивающихся в свободных сдвиговых слоях. Течения данного класса характерны для многих элементов турбореактивных двигателей (ТРД).

В ближайшем будущем дальнейшее совершенствование ТРД все более будет опираться на результаты численного анализа турбулентных течений с применением вихреразрешающих подходов, поскольку расчетные методики, основанные на RANS-моделях турбулентности, не обеспечивают необходимой полноты и/или точности предсказаний, а постановка детальных экспериментальных исследований требует больших ресурсов. Все это определяет несомненную актуальность проведенного Д.А.Любимовым исследования.

В методическом отношении наиболее важные отличительные черты работы Д.А.Любимова заключаются в: (а) последовательном применении схемы Роу (и ее аналога в случае несжимаемых течений) для расчета конвективных потоков; (б) использовании монотонных разностных схем высокого (пятого и девятого) порядка для расчета «предраспадных» значений газодинамических переменных; (в) проведении большинства расчетов на основе RANS/ILES-подхода, согласно которому принимается, что в зоне ответственности LES роль вихревой вязкости, обусловленной действием неразрешаемых (подсеточных) турбулентных пульсаций, может быть с успехом переложена на схемную вязкость.

Обращение к разностным схемам высокого порядка, с одной стороны, предопределило использование автором структурированных сеток, а с другой - позволило для весьма сложных течений получить удовлетворительно согласующиеся с экспериментом результаты на весьма экономичных для вихреразрешающих подходов сетках, с числом ячеек в один-три миллиона.

Известно, что у границ, в том числе у стенок, порядок схемы неизбежно понижается. Однако в задачах, рассмотренных соискателем, вопрос об аккуратном расчете пристеночных слоев, пристеночного трения и характеристик теплообмена не ставится и, вообще говоря, не столь важен. Проводимая автором линия на обеспечение доста-

точно точных количественных результатов лишь для свободных сдвиговых слоев как таковых, или же для течений, контролируемых процессами в свободных сдвиговых слоях, выглядит вполне последовательной. Это снимает, в частности, и вопрос о недостаточной проработанности возможностей RANS/ILES-подхода для сколь угодно удовлетворительного расчета пристеночных зон течения, в том числе в отрывных потоках. По-существу, во всех рассмотренных в диссертации задачах зоны ответственности RANS-модели, принципиальные для обеспечения правильности получаемых результатов, лежат выше по потоку от зоны, где активизируется ILES-модель.

На основе разработанных вычислительных методик, реализованных в собственном программном коде, соискателем получено и детально проанализировано большое число обладающих научной новизной результатов расчетов струйных и отрывных течений в элементах ТРД, а также тестовых расчетов в сопоставлении с данными других авторов, полученными с использованием других численных схем. Результаты проведенных Д.А. Любимовым исследований достаточно широко опубликованы в научной печати.

При прочтении автореферата возникли следующие замечания и вопросы:

1. Что кроется за следующей фразой из п.1 Заключения: «Для расчета несжимаемых течений предложен вариант метода DES»? Чем предложенный вариант отличается от оригинальной формулировки, данной в работе Спэларта и др. 1997 года?
2. Вряд ли формальное обнуление расстояния до стенки (формула (3) на стр.14), приводящее к нулевой турбулентной вязкости в зоне “Implicit LES”, можно расценивать как модификацию модели турбулентности Спэларта-Алмараса (п.2 Заключения).
3. Использование термина «нерегулярные сетки» для обозначения структурированных сеток с неравномерными по пространству шагами и скошенностью ячеек представляется неудачным, поскольку обычно под «нерегулярными» сетками понимаются неструктурированные сетки, для которых нет однозначного правила (регулярности) перехода от ячейки к ячейки.
4. Неоднократно используемое понятие «численного» перехода недостаточно определено. Вообще говоря, при численном моделировании течений с ламинарно-турбулентным переходом расчетчик всегда получает «численный переход», но только с разной степенью адекватности реальным физическим процессам.
5. Характеризуя содержание п.2.3 диссертации, автор пишет (стр.18) «В п.2.3 исследовано влияние нестационарного пограничного слоя на срезе сопла на точность расчета характеристик струи...». Эта фраза поначалу вводит в заблуждение, так как фактически речь идет о попытке учесть влияние турбулентных пульсаций, присущих сходящему со стенок сопла пограничному слою, а не о нестационарности пограничного слоя в целом. Поскольку в расчетах данной направленности развитие пульсаций провоцировалось заданием на входе в сопло обратной ступеньки, а не введением ка-

кого-либо генератора синтетической турбулентности с известными свойствами, то степень соответствия масштабов и частот пульсаций (развившихся в численном решении к выходному сечению сопла) свойствам реального турбулентного пограничного слоя представляется важной информацией. К сожалению, такого рода информация в работе отсутствует.

6. В случае идеальной осесимметричности геометрии кольцевого диффузора и граничных условий, возникающие в течении азимутальные неоднородности, должны, вообще говоря, прецессировать, поскольку нет какого-либо преимущественного углового положения. Из автореферата неясно, наблюдалась ли такого рода явления в численном решении.

Данные замечания не изменяют общего положительного впечатления о диссертации Д.А.Любимова, вносящей крупный вклад в разработку и распространение современных методик численного моделирования сложных турбулентных течений, а также в объем знаний о течениях в элементах турбореактивных двигателей.

Считаю, что представленная Д.А.Любимовым работа соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы.

Смирнов Евгений Михайлович, д.ф.-м.н.,

зав.кафедрой гидроаэродинамики ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

т. (812) 2972419; aero@phmf.spbstu.ru

