

«Утверждаю» 
академик В.М. Фомин,
директор ИТПМ СО РАН



Отзыв

ведущей организации на диссертационную работу 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 «Механика жидкости, газа и плазмы» (01.02.05)

Диссертационная работа Д.А. Любимова выполнена на актуальную тему и посвящена численному моделированию сложных высокоскоростных турбулентных течений. В работе развивается и применяется подход, основанный на совместном использовании осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (в английской терминологии – RANS, Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) и метода крупных вихрей (LES, Large Eddy Simulation). Следует отметить, что к настоящему времени стало очевидным, что достаточно точное предсказание характеристик турбулентных течений на основе одних осредненных уравнений невозможно. Значительные усилия, потраченные исследователями на развитие метода крупных вихрей, выявили как его перспективность, так и определенные трудности, в частности связанные с моделированием областей вблизи твердых стенок. Комбинированный RANS/LES подход представляется сейчас наиболее мощным и работоспособным инструментом моделирования сложных турбулентных течений, встречающихся в современной технике. Поэтому важность и актуальность работы Д.А. Любимова несомненна. Численное моделирование турбулентных течений является одной из ключевых технологий, без овладения которой становится

невозможным развитие новой техники, в частности авиационной. Хотя в отечественной науке есть исследователи, работающие в данном направлении на очень высоком уровне (в первую очередь нужно назвать группу М.Х. Стрельца из СПбГПУ), в целом здесь наблюдается определенное отставание российской науки от мирового уровня. Настоящая диссертация – это важный шаг в преодолении данного отставания, она является крупным вкладом в разработку методологии использования современных методов численного моделирования турбулентных течений при решении практических задач и в создание соответствующих вычислительных инструментов. Одновременно в ней получено большое количество важных конкретных результатов по аэродинамике струйных и внутренних отрывных течений в различных элементах современных авиационных турбореактивных двигателей (ТРД).

Диссертация состоит из шести глав.

Глава 1 посвящена анализу современных RANS/LES методов и описанию численных схем, применяемых в основанных на этих методах вычислительных программах. Автор в основном использует сочетание осредненных по Рейнольдсу уравнений с моделью турбулентности Спэларта-Альмараса и т. н. неявного метода крупных вихрей (ILES, Implicit LES), в котором не вводится никакой явной подсеточной модели, ее роль играет численная вязкость, вносимая используемыми для аппроксимации конвективных членов схемами сквозного счета. Отличительной особенностью работы Д.А. Любимова является использование схем высокого порядка точности (до девятого). Нам такой подход представляется правильным, поскольку он позволил автору при моделировании сверхзвуковых течений значительно уменьшить диссипацию в областях, где решение гладкое, одновременно сохранив надежность счета вблизи газодинамических разрывов.

Эффективность выбранных Д.А. Любимовым подходов продемонстрирована в следующих главах диссертации на примере расчетов различных турбулентных течений в сложных узлах современных ТРД. В главе 2 рассматривается ряд струйных течений: несжимаемых, сжимаемых дозвуковых и сверхзвуковых струй истекающих из сопел различных типов. Показано, что использование комбинированных RANS/LES методов позволяет предсказать эффекты, которые даже качественно нельзя описать с помощью осредненных уравнений, в частности

так называемый «переворот осей» в свободной струе и поперечное растекание пристенной струи из круглого сопла.

Глава 3 посвящена анализу влияния средств пассивного воздействия на струйные течения. Исследовано влияние шевронов на характеристики течения и шум дозвуковых струй, истекающих из конических сопел и двухконтурных сопел ТРД, изучены эффекты, связанные с эксцентриситетом сопла газогенератора по отношению к соплу внешнего контура ТРД.

В главе 4 описываются результаты исследования влияния пилона и крыла с закрылками на течение в струе из сопла двухконтурного ТРД. Численное моделирование позволило оценить степень влияния целого ряда параметров на характеристики основного течения и турбулентных пульсаций в выхлопной струе.

Глава 5 посвящена моделированию внутренних отрывных течений. Значимость этих расчетов определяется тем, что этот класс течений также не удается описать с достаточной для практических приложений точностью с помощью осредненных уравнений. Исследованы особенности течения в диффузорах разной геометрии: прямоугольных и кольцевых S-образных с разным отношением площадей выходного и входного сечений. В ходе расчетов был обнаружен ряд интересных физических эффектов.

В главе 6 рассматривается актуальная для практики задача управления отрывными течениями в диффузорах различной геометрии и улучшения их характеристик. Выполнено развернутое исследование газодинамического управления отрывными течениями с помощью синтетических струй. На основе анализа возможных механизмов воздействия на течение синтетических струй выбран наиболее эффективный из них. Успешно апробирован упрощенный способ моделирования генератора синтетических струй. Для прямоугольных и кольцевых S-образных диффузоров различной геометрии исследовано влияние параметров течения в синтетических струях на потери полного давления в диффузоре и неравномерность в распределении основных параметров течения на выходе из диффузоров. Показано, что управление с помощью синтетических струй позволяет значительно улучшить характеристики исследованных диффузоров.

Оценивая диссертацию в целом, можно сказать, что автору удалось на большом количестве решенных практических задач убедительно показать

эффективность RANS/LES подхода при численном моделировании сложных струйных и отрывных турбулентных течений. Им получено большое количество новых научных результатов по аэродинамике и аэроакустике течений вблизи элементов ТРД. Достоверность данных численного моделирования обоснована сопоставлением с экспериментальными данными и расчетами других авторов. Несомненна высокая научная значимость работы и широкие возможности практического использования полученных в ней результатов в организациях, занимающихся проектированием и созданием новых образцов авиационной техники.

Разумеется, диссертационная работа не свободна от определенных недостатков. Именно,

1. Формулировка основных задач диссертации во введении не совсем удачна: их слишком много (целых одиннадцать), ряд пунктов, несомненно, могли бы быть объединены (например, 2 и 4, 9 и 10). То же можно сказать и о выводах, сделанных в заключении, часть из них (в частности пункт 12) сформулирована излишне подробно.
2. В используемых автором численных алгоритмах присутствует известная доля эмпирики (например, введение коэффициента α для снижения схемной вязкости в схеме Poy). А priori неясно, к чему могут приводить подобные модификации, и, возможно, полезно было бы провести сравнение различных использованных в диссертации схем высоких порядков на примере простых тестовых задач перед их применением к расчету сложных турбулентных течений. Если такое сравнение и делалось, то в диссертации оно не описано.
3. Учитывая, что одним из важных результатов диссертации, на наш взгляд, стало создание компьютерных кодов для моделирования сложных турбулентных течений на основе RANS/LES подхода, было бы уместно уделить определенное внимание особенностям программной реализации описанных автором численных алгоритмов. В работе отсутствуют данные о том на каких компьютерах проводились расчеты, как велики были затраты вычислительного времени и т. п. Из диссертации неясно, распараллелены ли вычислительные программы для проведения расчетов на многопроцессорных ЭВМ. Если нет, то это должно стать важнейшим направлением дальнейшей работы: решаемые

автором задачи, несомненно, требуют привлечения больших вычислительных мощностей, и ряд приводимых в работе расчетов, как нам кажется, было бы полезно повторить на более подробных сетках.

4. При анализе результатов численного моделирования недостаточное внимание уделено анализу их погрешности путем более детального сравнения с данными экспериментов и результатами других авторов. В частности, не сделаны оценки числового значения расхождений с калибровочными данными экспериментов.

Высказанные замечания не снижают нашей высокой оценки представленной диссертация, часть их может рассматриваться как пожелания для дальнейшей работы. Диссертация написана четко и ясно. Степень апробации полученных результатов представляется вполне достаточной, они опубликованы в большом количестве статей, рассказывались на престижных отечественных и зарубежных научных форумах. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Считаем, что диссертация Любимова Д.А. полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», и ее автор, Любимов Дмитрий Александрович, безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Содержание отзыва обсуждено на заседаниях семинаров лаборатории экспериментальной аэрогазодинамики и лаборатории вычислительной аэродинамики ИТПМ СО РАН.

Д.т.н., профессор, зав. лаб. ИТПМ СО РАН
К.ф.-м.н., с.н.с.

В. Запругаев 10.10.2014
В.И. Запругаев
А.Н. Кудрявцев
А.Н. Кудрявцев

