

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию

**Коромыслова Евгения Васильевича**

«Численное моделирование течений газа в узлах авиационного двигателя»,  
представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности: 01.02.05 – «Механика жидкости, газа  
и плазмы»

Диссертационная работа Коромыслова Е.В. посвящена определению  
характеристик трехмерных нестационарных турбулентных течений в  
различных узлах авиационного двигателя (ТРДД) с помощью  
вихреразрешающего подхода. С этой целью в работе разрабатываются схемы  
высокого порядка точности и создаётся программный пакет, реализующий  
разработанные методы применительно к высокопроизводительным  
вычислительным системам, использующим графические процессоры. При  
помощи созданного программного обеспечения автором решаются такие  
сложные промышленно-ориентированные задачи как моделирование  
обтекания профиля турбинной лопатки, течения в смесителе камеры  
сгорания, истечения турбулентной струи из сопла, определения шума  
вентилятора и др.

**Актуальность работы** напрямую связана с совершенствованием  
авиационных двигателей и повышением требований к ним по эффективности  
и экологичности, для удовлетворения которых часто требуется создание  
принципиально новых конструкций различных узлов двигателя. В настоящее  
время при аэродинамическом проектировании двигателя в целом и его  
отдельных узлов широко используется математическое моделирование. При  
этом применяются как аналитические и полуэмпирические методики, так и  
численное моделирование на основе полных уравнений газовой динамики.  
При проектировании становится необходимым все более точное  
моделирование течения в двигателе и учет тех физических явлений, влияние  
которых ранее не учитывалось или учитывалось не в полной мере. Данная  
особенность делает актуальной разработку и анализ новых численных  
подходов для моделирования течений в узлах авиационного двигателя,  
обеспечивающих более точный учёт происходящих в нем физических  
явлений и особенностей конструкции.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в разработке  
подхода для моделирования трёхмерных нестационарных турбулентных  
течений газа в областях сложной формы, основанного на методе крупных

вихрей с релаксационной фильтрацией. Метод крупных вихрей реализуется посредством DRP схемы, обладающей улучшенными дисперсионными свойствами, со специально разработанными фильтрами. При конструировании фильтра автором диссертации предложен переменный коэффициент мощности узкополосного фильтра, а также альтернативный подход к нахождению мощности фильтра для расчёта задач со скачками. В работе также предложена формула для определения максимального коэффициента поглощения для постановки неотражающих граничных условий в виде поглощающего слоя. Автором создан параллельный программный пакет для моделирования трехмерных нестационарных турбулентных течений газа на многопроцессорных вычислительных системах, использующих графические ускорители. Для ряда задач (в частности, задачи моделирования струйного течения в сопле JEAN и задачи об обтекании турбинной лопатки) на сетках с относительно небольшим числом узлов получены численные результаты, близкие к экспериментальным данным. И наконец, впервые без использования полуэмпирических методик получен широкополосный шум вентилятора ТРДД в полной постановке задачи.

**Достоверность** результатов работы обеспечивается хорошей согласованностью с результатами других авторов и экспериментальными данными. Методы и схемы, применяемые в работе, верифицированы на простых задачах с известными аналитическими или численными решениями, полученными с помощью высокоточных методов на подробных расчетных сетках.

**Практическое значение** связано с возможностью использования разработанного подхода для моделирования трехмерных нестационарных турбулентных течений газа и реализующего его параллельного программного пакета для оценки параметров узлов авиационного двигателя с целью их дальнейшего совершенствования.

**Содержание работы.** Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения.

В первой главе приведено подробное описание системы уравнений Навье-Стокса для сжимаемой теплопроводной среды в криволинейной подвижной системе координат, записанной относительно вектора неконсервативных физических переменных. Эта система является основной математической моделью для последующих численных расчётов. В этой же главе сформулирован широкий класс граничных условий, необходимых для

проведения расчётов конкретных течений, связанных с работой авиадвигателя. В частности, рассмотрен подход постановки искусственных граничных условий с использованием поглощающего слоя, в котором предложена новая методика выбора максимального коэффициента поглощения.

Вторая глава посвящена численной реализации системы уравнений Навье-Стокса. Численная методика решения системы уравнений Навье-Стокса основана на применении высокоточных конечно-разностных схем DRP с использованием узкополосных фильтров для подавления нефизичных высокочастотных осцилляций. Интегрирование по времени нестационарной системы уравнений осуществляется на основе оптимизированных многоэтапных схем Рунге-Кутты. В главе дано детальное описание данного подхода и рассмотрены различные варианты DRP схем и узкополосных фильтров. Здесь же автор обращает внимание на то, что используемую численную реализацию системы уравнений Навье-Стокса можно интерпретировать как метод крупных вихрей с релаксационной фильтрацией (LES-RF) в рамках подхода именуемого неявным методом крупных вихрей (ILES). На примере решения задачи о распаде вихря Тейлора-Грина показана зависимость решения с использованием LES-RF от дискретного шага по времени. В качестве нового результата диссертационной работы приводится формула для выбора коэффициента демпфирования в определении узкополосного фильтра (или мощность фильтрации) при котором зависимость решения по LES-RF от шага по времени минимизируется. Далее рассматривается фильтрация с детектором скачков для моделирования трансзвуковых течений. Предложен новый подход к построению фильтра, в котором искусственно вводимая диссипация в наибольшей степени затрагивает только окрестности скачков и практически исключается в областях вне разрывов, что позволяет, в отличие от других подходов, избежать ненужного сглаживания в областях с генерацией мелкомасштабной турбулентности. В этой же главе даётся описание метода перекрывающихся сеток, необходимых для расчёта вращающихся и неподвижных элементов конструкций, и алгоритм сборки данных сеток. В заключительном разделе главы описан параллельный программный пакет GHOST CFD для моделирования трёхмерных нестационарных течений в узлах авиационного двигателя, работающий на графических процессорах.

В третьей главе представлены результаты расчётов и анализа течений в различных узлах ТРДД.

## **Оценка работы.**

По содержанию диссертационной работы можно сделать следующие достаточно существенные замечания.

1. В тексте диссертации ничего не сказано о способе численного определения метрических коэффициентов (стр.31, второй абзац), точность которого существенным образом влияет на точность результата в целом.
2. Использование конечно-разностной DRP схемы для аппроксимации уравнений Навье-Стокса в недивергентной форме записи может приводить к неконсервативности численного алгоритма. В диссертации нет разъяснений, почему и в каких случаях консервативностью можно пренебречь. Особенно опасно применять неконсервативные схемы при расчёте трансзвуковых течений с присутствием скачков уплотнения, где неконсервативность аппроксимации обычно приводит к неправильному определению положения фронта скачка. С этой точки зрения, фраза «корректно определяют положения фронта волны» (на стр.82, последний абзац) вызывает определенные сомнения, которые бы могли быть устранены, например, сравнением с расчётом по консервативной схеме.
3. При расчёте задачи об обтекании лопаточного профиля, как указано на стр. 108, минимальный шаг вблизи твёрдой поверхности (лопатки) выбирался равным  $y^+ \approx 10$ . При таком определении шага постановка граничных условий на стенке предполагает использование пристеночных функций. В диссертации же речь идёт только о постановке условий прилипания, что представляется неверным.
4. Не вполне убедительными выглядят результаты расчёта струи из сопла JEAN и/или их представление в работе. В частности, при описании такого типа задач следует указывать не только общее количество узлов сетки в расчётной области, а давать более подробное сеточное описание, включающее число точек в радиальном и азимутальном направлениях, коэффициенты разбега, минимальные шаги. Без этих данных дальнейший анализ результатов весьма затруднителен. В частности, не совсем понятно, почему образуется достаточно протяжённый участок (размером около половины диаметра сопла) стационарного слоя смешения до точки возникновения неустойчивости. Это можно видеть на рис. 3.18 (на фрагменте установившегося течения). По всей вероятности, здесь численный переход в слоях смешения всё-таки заметно затянут. Также вызывает сомнения объяснение быстрой, по словам автора, турбулизации слоя

смещения, исходя из анализа профиля средней скорости на оси (рис. 3.20 слева).

5. Еще одним замечанием к результатам по соплу JEAN является сильное расхождение данных по пульсационной скорости на оси струи (рис. 3.20 справа). Однако приведенные на этом рисунке экспериментальные данные на калибре  $x/D = 1$  не согласуются с данными того же эксперимента, которые приведены на рис. 3.21(в) при  $r/D = 0$  (в точке на оси) и которые, напротив, вполне неплохо согласованы с численными результатами. Остаётся неясным, вызвано ли это рассогласование неаккуратным представлением результатов либо более серьёзными причинами.
6. Не объяснена причина заметного завышения звукового давления на низких частотах (рис. 3.25) в задаче об определении уровня шума конического дозвукового сопла. Такое завышение, в частности, бывает из-за некорректной работы граничных условий на внешней границе расчётной области.

В целом, диссертационная работа написана достаточно аккуратно. Тем не менее по ее оформлению и написанию также можно сделать ряд замечаний. Перечислим некоторые из них.

1. На стр.33 не дано определение величин «со звёздочкой», а именно  $T^*, \rho^*$ .
2. На стр. 33 во второй выносной формуле в первой строке допущена опечатка в показатели степени. Вместо  $\gamma/(\gamma-1)$  надо  $(\gamma-1)/\gamma$ .
3. На стр. 32 в разделе 1.2 выражение «массовых долей компонентов газовой смеси» не имеет отношения к дальнейшему изложению.
4. На стр. 131 дана неверная ссылка на рисунок. Вместо 3.12 надо 3.21. И далее, на стр. 132 в верхнем абзаце, вероятно, речь идет также о рис. 3.21.
5. В тексте диссертации перепутана нумерация страниц – ..., 106, 108, 109, 107, 110, ...

Сделанные замечания не снижают научной и практической значимости полученных результатов и не влияют на общее хорошее впечатление от диссертации. Работа выполнена на высоком научном уровне, отличается полнотой изложения и является завершенным научным исследованием. Представленные результаты вносят существенный вклад в исследование сложных нестационарных турбулентных течений, характерных для реального

авиационного двигателя. Диссертация в целом отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», а её автор, **Коромыслов Евгений Васильевич**, вне всякого сомнения, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по данной специальности.

Официальный оппонент  
Зав. сектором ИПМ им. М.В.Келдыша РАН  
доктор физ.-мат. наук,

*T.Kr*

Козубская Татьяна Константиновна

Отзыв составлен « 04 » октября 2016 г.

Я, Козубская Т.К., даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

*T.Kr*

Подпись Козубской Т.К. заверяю:

учёный секретарь ИПМ им. М.В.Келдыша РАН,  
к.ф.-м.н.



А.И. Маслов

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Москва, 125047, Миусская пл., 4

Тел. +7(499)7912760, е-мейл: kozubskaya@imamod.ru