

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу 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»

## АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Развитие турбореактивных двухконтурных двигателей (ТРДД) диктует необходимость совершенствования методов и программного обеспечения для численного моделирования трехмерного турбулентного течения в таких ответственных агрегатах как компрессор, камера сгорания, турбина, сопло. Требования к экономичности, снижению вредных выбросов, а также снижению уровня непрерывно ужесточаются. Для обеспечения данных требований на этапе проектирования возникает необходимость во все более точном моделировании течений в узлах двигателя, а также учет тех физических явлений, влияние которых ранее не учитывалось, или учитывалось недостаточно полно. Большое значение при этом имеет получение результатов моделирования в сравнительно короткое время и с использованием меньших вычислительных ресурсов без снижения точности.

Целью диссертационной работы Коромыслова Е.В. является исследование трехмерных нестационарных турбулентных течений в различных узлах авиационного двигателя с помощью вихреразрешающего метода, а также разработка и анализ методов и схем высокого порядка аппроксимации, и создание программного пакета для моделирования данных течений. Это обеспечивает актуальность представленной к защите диссертационной работы.

## НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

Научная новизна исследований и полученных результатов включают в себя нижеперечисленные положения:

- 1) разработке подхода для моделирования трехмерных нестационарных турбулентных течений газа в областях сложной формы, основанного на методе крупных вихрей с релаксационной фильтрацией. Особенностью данного подхода является применение переменного коэффициента силы узкополосного фильтра с предложенным для нее выражением, а также использование фильтра с детектором скачков для моделирования трансзвуковых течений;
- 2) в работе представлено выражение для определения максимального коэффициента поглощения в случае использования неотражающих граничных условий в виде поглощающего слоя;
- 3) разработан параллельный программный пакет, реализующий данные методы и схемы;
- 4) при моделировании струи, истекающей из модельного сопла, получены близкие к экспериментальным распределения средней и пульсационной скоростей, ранее полученные другими авторами только при использовании искусственного возбуждения пограничного слоя;
- 5) получен более близкий к экспериментальному характер роста потерь при обтекании турбинной лопатки в случае появления отрыва погранслоя по сравнению с подходами на основе RANS;
- 6) расчетом получены близкие к экспериментальным уровни шума вентилятора ТРДД без применения полуэмпирических методик.

## ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ РАБОТЫ

Научные положения и выводы, изложенные в тексте диссертации, являются практически и теоретически обоснованными. Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается согласием с результатами других авторов и экспериментальными данными. Методы и схемы, применяемые в работе, верифицированы на тестовых задачах с известными аналитическими или достаточно точными численными решениями. Результаты работы апробированы в ходе участия автора в 13 конференциях в России и за рубежом, опубликованы в 6 статьях.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

Практическая значимость работы заключается в возможности применения представленного подхода и параллельного программного пакета для моделирования трехмерных нестационарных турбулентных течений газа в областях сложной конфигурации, таких, как различные узлы авиационного двигателя, для анализа параметров и совершенствования конструкций. Полученные автором результаты имеют самостоятельное значение для оценки точности и эффективности вычислительных методов, для прогнозирования амплитуд пульсаций давления и динамических нагрузок в элементах авиационных двигателей, совершенствовании численных методов для прогнозирования уровня излучения шума вентилятором и соплом ТРДД

## АНАЛИЗ И ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы (131 наименование). Работа содержит 66 рисунов и 9 таблиц. Общий объем – 173 страницы. По теме диссертации представлено 15 научных публикаций, из которых 3 статьи опубликовано в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК.

**Во введении** рассматривается актуальность и новизна исследования, формулируется цель диссертации, представлено краткое содержание работы; перечислены полученные новые результаты, описано их практическое значение.

**В первой главе** рассмотрены математические модели, применяемые в работе для моделирования трехмерных нестационарных турбулентных течений газа, представлены основные уравнения, а также специальный подход к уменьшению нефизичных отражений от границ расчетной области. Предлагается аналитический метод определения коэффициентов модели, использованной в данном подходе, проведен его анализ.

**Во второй главе** приводится описание используемых в работе численных схем и методов. Проводится обсуждение применяемых конечно-разностных схем с улучшенными дисперсионными и диссипативными свойствами и узкополосная фильтрация для них. Рассматривается метод крупных вихрей с релаксационной фильтрацией для моделирования турбулентности на примере задачи о распаде вихря Тейлора-Грина. Выявляется зависимость результатов, полученных с помощью данного метода, от величины шага по времени, предлагается выражение для минимизации такой зависимости. Рассматривается фильтрация с детектором

скачков для моделирования трансзвуковых течений. Предлагается применение альтернативного детектора скачков и выражение для определения необходимой силы фильтра на его основе. Рассматривается метод перекрывающихся сеток, анализируется его точность в контексте передачи волн через интерфейс. Описывается разработанный параллельный программный пакет для графических процессоров, основанный на приведенных ранее схемах и методах.

В третьей главе рассматриваются различные течения в узлах ТРДД.

Рассматривается обтекание профиля турбинной лопатки на различных режимах. С помощью численного моделирования приведенными ранее методами определяется граница режимов с малыми потерями кинетической энергии, а также получается более близкий к эксперименту характер повышения потерь на высоких режимах в сравнении со стандартным подходом на основе RANS.

Проводится моделирование течения в модельном смесителе камеры сгорания. Показывается достаточно хорошее согласие результатов даже на значительном расстоянии от выхода из канала предварительного перемешивания смесителя. Представляется спектр осевой скорости с четко выраженным пиками на частотах вращения прецессирующих вихрей, согласующихся с экспериментальными, и инерционным интервалом по степенному закону  $-5/3$ .

Рассматривается дозвуковое модельное сопло JEAN. Определяются его аэродинамические характеристики. Показывается достаточно хорошее согласие результатов моделирования с экспериментальными данными по средним полям скорости. Представляются спектры скорости в различных точках реактивной струи, имеющие инерционный интервал с наклоном  $-5/3$ , разрешенный по частотам дальше, чем в аналогичных работах других авторов. Показана возможность получения в расчете быстрой турбулизации слоя смешения, аналогичной наблюданной в эксперименте, без введения дополнительного возбуждения пограничного слоя внутри сопла. Рассматривается дозвуковое коническое сопло и определяются его шумовые характеристики.

Проводится моделирование шума вентилятора ТРДД на различных режимах. Проводится анализ модального состава полученного шума и определяется соответствие между особенностями полученной направленности шума и его различными компонентами и источниками. Проводится сравнение результатов разработанного Е.В. Коромысловым программного пакета с результатами коммерческого пакета и экспериментами. Демонстрируется достаточно хорошее согласие результатов

предложенного метода на грубой сетке с результатами методов на основе RANS с подробной сеткой.

В **заключении** работы формулируются основные результаты, а также направления и планы дальнейшей работы.

Содержание диссертации соответствует требованиям ВАК, установленным к кандидатским диссертациям, включает в себя совокупность новых научных результатов и положений, их обоснование и применение к практическим задачам проектирования узлов и агрегатов авиадвигателей. Личный вклад автора обоснован и подтвержден. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой. Содержание автореферата полностью отражает основные положения, изложенные в диссертации. Диссертация написана технически грамотным языком, содержит логически стройный материал.

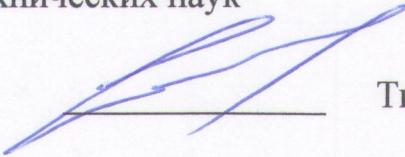
При рассмотрении рецензируемой работы считаю необходимым обратить внимание на следующие **замечания**:

- 1) на странице 110 имеется опечатка в формуле для определения коэффициента потерь;
- 2) не подведены итоги сравнения эффективности разработанного соискателем метода с известными коммерческими пакетами;
- 3) не приведены детали расчета уровней звуковой мощности струи конического сопла, в частности положение поверхности интегрирования по аналогии Фокс-Вильямса-Хоукинга;
- 4) не приведены подробности расчета акустического поля вентилятора с использованием модального разложения и пакета ACTRAN ;
- 5) терминологическая неточность типа «на первой частоте следования лопаток должен проявляться только широкополосный шум» (на стр.147). На самом деле надо говорить об уровне широкополосного фона в зоне дискретной компоненты на частоте следования лопаток.

Вышеперечисленные замечания не влияют на высокую оценку диссертационной работы, которая является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор, Евгений Васильевич Коромыслов, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой ракетных двигателей Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», доктор технических наук



Тимушев Сергей Федорович

Адрес: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Телефон: +7 (499) 158-43-51

Электронная почта: irico.harmony@gmail.com

Отзыв составлен «03 октября 2016 г.

Я, Тимушев С.Ф., даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.



Подпись Тимушева С.Ф. заверяю:



Зам. начальника УКПДО МАИ (НИУ)

Иванов А.М.