

МИНИСТЕРСТВО  
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Казанский национальный  
исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ»  
(КНИТУ-КАИ)**

ул. К. Маркса, д. 10, Казань, 420111  
Тел.: (843) 238-41-10 Факс: (843) 236-60-32  
E-mail: kai@kai.ru <http://www.kai.ru>  
ОКПО 02069616, ОГРН 1021602835275,  
ИНН/КПП 1654003114/165501001

От 23.09.16' № 28-1310-3083

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



УТВЕРЖДАЮ  
Ректор КНИТУ-КАИ  
им. А.Н. Туполева  
А.Х. Гильмутдинов  
2016 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации  
на диссертационную работу Коромыслова Евгения Васильевича  
«Численное моделирование течений газа в узлах авиационного двигателя»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук  
по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

### Актуальность темы диссертации

В настоящее время при проектировании основных узлов ТРДД, в частности, его газогенератора, узлов и двигателя в целом широко используется математическое моделирование. Требования к эффективности, а также эмиссионным характеристикам авиадвигателей (низкий уровень шума и выброс токсичных веществ) непрерывно ужесточаются, в связи с чем становится необходимым все более точное моделирование течений в двигателе, включающее учет тех физических явлений, которые ранее не рассматривались, или учитывалось опосредованно. В связи с этим тема представленной диссертации, а именно: разработка и анализ новых подходов к моделированию течений газа в узлах ТРДД, учитывающих особенности течений газа в конструкциях основных узлов авиадвигателя, является актуальной.

## **Анализ содержания диссертации.**

На отзыв представлены: диссертационная работа на 173 страницах машинописного текста, содержащего 66 иллюстраций и 9 таблиц; автореферат на 16 страницах, включая список из 15 основных публикаций автора по теме диссертационной работы, в том числе 3 статьи в журналах из списка, рекомендованного ВАК.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы (131 наименование).

Во **введении** представлены актуальность и новизна исследования, сформулирована цель диссертации, представлено краткое содержание работы. Также перечислены полученные результаты и описана их практическая значимость.

В **первой главе** диссертации рассмотрены математические модели, использованные в работе для моделирования трехмерных нестационарных турбулентных течений газа в узлах авиационного двигателя, представлены основные уравнения, описывающие трехмерные течения газа, а также подход к уменьшению паразитных отражений от внешней границы расчетной области. Предложена аналитическая методика для определения коэффициентов модели, использованной в данном подходе, проведен анализ характеристик подхода.

Во **второй главе** описаны применяемые в работе численные схемы и методы. Проведено обсуждение применяемых в диссертационной работе конечно-разностных схем высокого порядка аппроксимации и узкополосных фильтров для них. Рассмотрен метод крупных вихрей с релаксационной фильтрацией, применяемый для моделирования турбулентности. Эффективность и выявленные особенности метода показаны на примере задачи о распаде вихря Тейлора-Грина. Предложено выражение для минимизации зависимости метода от размера шага по времени. Рассмотрен применяемый в работе подход для моделирования течений в случае трансзвукового на основе фильтрации с детектором скачков. Для данного подхода автором предложено применение альтернативного детектора скачков, приведено выражение для силы фильтра с улучшенными свойствами. Рассмотрен метод перекрывающихся сеток для реализации ротор-статор интерфейса, показана его достаточная точность для рассматриваемых в работе задач. Описан разработанный параллельный программный пакет для

графических процессоров, реализующий приведенные в диссертации схемы и методы.

В третьей главе рассмотрены течения в различных узлах ТРДД, проведено их моделирование как с помощью предложенного подхода (разработан программный пакет GHOST CFD), так и с помощью стандартных подходов на основе RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), LES (Large Eddy Simulation) и DES (Detached Eddy Simulation).

Рассмотрено обтекание профиля турбинной лопатки на различных режимах, в том числе – отрывных. Показано, что предложенный подход к моделированию позволил достаточно точно определить границу режимов с малыми потерями кинетической энергии для рассмотренного профиля лопатки, а также получить более близкий к эксперименту характер повышения потерь на высоких режимах в сравнении со стандартным подходом.

Представлены и проанализированы результаты моделирования течения в модельном смесителе камеры сгорания, включая распределения средних полей скорости и спектральных характеристик прецессирующих вихрей. Показано достаточно хорошее согласие результатов даже на значительном расстоянии от выхода из канала предварительного перемешивания смесителя. Представлен спектр осевой скорости с четко выраженными пиками на частотах вращения прецессирующих вихрей, близких к экспериментальным, и инерционным интервалом с теоретическим наклоном.

Рассмотрены дозвуковые сопла двух различных конфигураций, определены аэродинамические и шумовые характеристики истекающей из них реактивных струй. Проанализирована возможность получения в расчете быстрой турбулизации слоя смешения, аналогичной наблюдаемой в экспериментах, без введения искусственного возбуждения пограничного слоя внутри сопла. Показано достаточно хорошее согласие полученных результатов с экспериментальными данными по средним полям и шуму струи. Для спектров в различных точках струи на достаточном удалении от среза сопла показан инерционный интервал, имеющий теоретический наклон и разрешенный по частотам дальше, чем в аналогичных работах.

Представлены результаты моделирования шума вентилятора на различных режимах. Проведен анализ модального состава полученного шума и определено соответствие между особенностями полученной направленности шума и его различными компонентами и источниками. Проведено сравнение тональной компоненты шума с экспериментальными

данными. Показано достаточно хорошее согласие результатов предложенного метода на грубой сетке по сравнению с результатами стандартных методов на подробной сетке. Показано, что при использовании предложенного подхода возможно моделирование широкополосной компоненты шума.

В **заключении** диссертационной работы сформулированы основные результаты и изложены направления и планы дальнейшей работы.

### **Основные результаты, полученные автором**

Предложен подход для численного моделирования трехмерных нестационарных турбулентных течений газа в областях сложной конфигурации, основанный на решении уравнений Навье Стокса для вязкого газа методом крупных вихрей с релаксационной фильтрацией, в рамках которого применены модифицированные параметр силы узкополосного фильтра и фильтра с детектором скачков.

Предложенный подход реализован в виде программного пакета GHOST CFD для графических процессоров, предназначенный для моделирования трехмерных нестационарных турбулентных течений газа в областях сложной формы с использованием схем высокого порядка аппроксимации и высокой разрешающей способности, и позволяющий значительно ускорить расчеты в рамках предложенного метода по сравнению со стандартными центральными процессорами.

Получены распределения коэффициента скорости по поверхности турбинной лопатки на различных режимах обтекания профиля турбинной лопатки. Получено более близкое к эксперименту описание роста потерь кинетической энергии по сравнению с подходом на основе RANS.

Для смесителя жаровой трубы камеры сгорания получены хорошо согласующиеся с экспериментом осредненные поля скоростей, в том числе – на достаточно большом расстоянии от выхода из канала предварительного перемешивания. Получена спектральная плотность мощности осевой скорости, имеющая четко выраженные тональные пики на частотах вращения прецессирующих вихрей и широкополосную составляющую с инерционным интервалом теоретического наклона.

Для задачи об истечении реактивной струи из сопла JEAN получены близкие к экспериментальным распределения средней и пульсационной скоростей, которые ранее получались другими авторами только с искусственным возбуждением пограничного слоя внутри сопла и на более

подробной расчетной сетке. Для конического сопла получено более близкое к эксперименту спектральное распределение звукового давления.

Проведено моделирование уровня шума вентилятора ТРДД и получены уровни широкополосного шума без применения полуэмпирических методик. Получены уровни тональной составляющей шума, более близкие к экспериментальным, чем результаты, полученные с помощью подхода uRANS со схемами 2-го порядка аппроксимации.

## **Практическая значимость**

Основная практическая значимость связана с возможностью применения подхода, предложенного в диссертационной работе, для моделирования трехмерных нестационарных турбулентных течений газа в областях сложной конфигурации, а также программный пакет, при оценке аэродинамических и акустических характеристик узлов авиационного газотурбинного двигателя при их проектировании и дальнейшей доработки.

Результаты работы рекомендуются к использованию на предприятиях:

ОАО «НПО Сатурн» (г. Рыбинск)

ОАО КПП «Авиамотор» (г. Казань)

АО «Авиадвигатель» (г. Пермь)

и других предприятиях аэрокосмического комплекса для определения характеристик различных узлов и систем, а также ряде академических институтов и ВУЗов для моделирования различных турбулентных течений газа.

Рассматривая оцениваемую работу в целом положительно, необходимо сделать ряд замечаний:

1. В первой главе показан вывод применяемых в работе уравнений, что можно считать избыточным в силу их общеизвестности.
2. В параграфе 1.3 автором предложена формула для нахождения максимального коэффициента поглощения, однако ее сравнения с формулами других авторов не проводится.
3. Подход перекрывающихся сеток, применяемый в работе, видится избыточным для ротор-статор интерфейса. Более простым и удобным вариантом было бы применение метода скользящих сеток или его аналога.
4. В работе говорится о параллельном программном пакете собственной разработки, однако непосредственно о его реализации сказано достаточно мало.

5. В работе и автореферате (стр.5,10,11) присутствует небольшое количество опечаток, в частности, в тексте и на подписях к графикам на стр. 130-133 фамилие «Андерссон» (Andersson) в половине случаев написана как «Адерссон».

Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

### Заключение

Диссертационная работа Коромыслова Е.В. «Численное моделирование течений газа в узлах авиационного двигателя» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Результаты, полученные диссидентом, представляют интерес для исследовательских групп, изучающих сложные нестационарные турбулентных течения, в частности – течения в различных узлах такого объекта, как современный двухконтурный турбореактивный авиационный двигатель. Диссертационная работа по своей научной и практической ценности полностью соответствует требованиям п.9 и удовлетворяет критериям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013г. № 842, а ее автор Коромыслов Евгений Васильевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки» 22 сентября 2016 г., Протокол № 2.

Зав. кафедрой  
«Реактивные двигатели и  
энергетические установки» КНИТУ-КАИ  
доктор технических наук, профессор

Доцент кафедры  
«Реактивные двигатели и  
энергетические установки» КНИТУ-КАИ,  
кандидат технических наук

Б. Г. Мингазов  
Подпись *Мингазов Б.Г.*  
заверяю. Начальник управления  
делами КНИТУ-КАИ

Ф. М. Валиев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ). г. Казань, 420111, ул. К. Маркса, д. 10.  
Тел.: (843) 238-41-10, Факс: (843) 236-60-32. E-mail: kai@kai.ru <http://www.kai.ru>

Подпись *Валиев Р.М.*  
заверяю. Начальник управления  
делами КНИТУ-КАИ