

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.012.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ИНСТИТУТА МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 20.10.2016 № 135

О присуждении Коромыслову Евгению Васильевичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Численное моделирование течений газа в узлах авиационного двигателя» по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 21.06.2016, протокол № 111, диссертационным советом Д 004.012.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России от 11.04.2012 № 105/нк.

Соискатель Коромыслов Евгений Васильевич 1989 года рождения, в 2012 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по специальности «Механика». Соискатель окончил аспирантуру очной формы обучения в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки институте механики сплошных сред уральского отделения российской академии наук по научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы в 2016 году. В настоящее время работает инженером-конструктором расчетчиком отдела Систем инженерного анализа АО «Авиадвигатель». Диссертация выполнена в лаборатории вычислительной гидродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки института механики сплошных сред уральского отделения российской академии наук.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Любимова Татьяна Петровна, заведующий лабораторией вычислительной гидродинамики, ФГБУН ИМСС УрО РАН.

Официальные оппоненты:

Козубская Татьяна Константиновна, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГУ Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша» РАН, заведующий сектором вычислительной аэроакустики;

Тимушев Сергей Федорович, доктор технических наук, ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), заведующий кафедрой ракетных двигателей.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ), г. Казань, в своем положительном заключении, подписанным Мингазовым Б.Г., доктором технических наук, профессором и Валиевым В.М., кандидатом технических наук, и утвержденном ректо-

ром КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева Гильмутдиновым А.Х., доктором физико-математических наук, чл.-корр. Академии наук Республики Татарстан, указала, что диссертационная работа представляет собой законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Результаты, полученные диссертантом, 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 полностью удовлетворяет критериям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013г. № 842, а ее автор Коромыслов Евгений Васильевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Соискатель имеет 15 опубликованных работ по теме диссертации, из них 3 статьи в рецензируемых научных изданиях (в журналах, рекомендуемых ВАК). Наиболее значительные работы:

1. Назукин, В. А. Моделирование трехмерных нестационарных закрученных потоков в коммерческом пакете и решателе собственной разработки на примере модельной задачи / В. А. Назукин, В. Г. Августинovich, В. Thornber, P. Aguado Lopez, В. В. Цатиашвили, Е. В. Коромыслов // Вестник СГАУ, – 2013. – № 3(41), –С. 197-205.
2. Коромыслов, Е. В. Использование схем типа DRP высокого порядка аппроксимации и метода крупных вихрей с релаксационной фильтрацией для расчёта турбулентных течений газа на примере распада вихря Тейлора-Грина / Е. В. Коромыслов, М. В. Усанин, Л. Ю. Гомзиков, А. А. Синер // Вычислительная механика сплошных сред, – 2015. – Т. 8, №1. – С. 24-34.
3. Коромыслов, Е. В. Численное моделирование аэродинамических и шумовых характеристик дозвуковых турбулентных струй с использованием графических процессоров / Е. В. Коромыслов, М. В. Усанин, Л. Ю. Гомзиков, А. А. Синер, Т. П. Любимова // Вычислительная механика сплошных сред, – 2016. – Т. 9, №1. – С. 24-34.

На диссертацию поступили отзывы от ведущей организации и оппонентов.

1. Положительный отзыв официального оппонента Козубской Татьяны Константиновны. В отзыве указывается на то, что проблема, рассматриваемая в рамках представленной диссертационной работы, является актуальной, научно важной, а её результаты необходимыми для практического использования. Оппонент отмечает, что в тексте диссертации ничего не сказано о способе численного определения метрических коэффициентов. Также отмечается, что 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. Оппонент указывает, что 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. Кроме того, оппонент обращает внимание на то, что не вполне убедительными выглядят результаты расчёта струи из сопла JEAN и/или пред-

ставление их 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. Не совсем понятно, почему образуется достаточно протяженный участок (размером около половины диаметра сопла) стационарного слоя смешения до точки возникновения неустойчивости. Оппонент отмечает также 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. Оппонент указывает на то, что не объяснена причина заметного завышения звукового давления на низких частотах (рис. 3.25) в задаче об определении уровня шума конического дозвукового сопла. Как отмечает оппонент, диссертационная работа написана достаточно аккуратно. Тем не менее, по ее оформлению и написанию можно сделать ряд замечаний, в частности на стр.33 не дано определение величин «со звёздочкой», а именно T^*, p^* ; на стр. 33 во второй выносной формуле в первой строке допущена опечатка в показателе степени. Вместо $\gamma/(\gamma-1)$ надо $(\gamma-1)/\gamma$; на стр. 32 в разделе 1.2 выражение «массовых долей компонентов газовой смеси» не имеет отношения к дальнейшему изложению; 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. В тексте диссертации перепутана нумерация страниц - ...,106,108,109,107,110.

2. Положительный отзыв официального оппонента Тимушева Сергея Федоровича. В отзыве указано на то, что актуальность представленной диссертационной работы диктуется необходимостью совершенствования методов и программного обеспечения для численного моделирования трехмерного турбулентного течения в таких ответственных агрегатах как компрессор, камера сгорания, турбина, сопло турбореактивных двухконтурных двигателей. Оппонент отмечает, что на странице 110 имеется опечатка в формуле для определения коэффициента потерь. Также оппонент указывает на то, что не подведены итоги сравнения эффективности разработанного соискателем метода с известными коммерческими пакетами. Оппонентом отмечается, что не приведены детали расчета уровней звуковой мощности струи конического сопла, в частности положение поверхности интегрирования по аналогии Фокс-Вильямса-Хоукинга. Кроме того, оппонент указывает на то, что не приведены подробности расчета акустического поля вентилятора с использованием модального разложения и пакета ASTRAN. Отмечается 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.

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отмечается актуальность темы диссертации, основные научные результаты, теоретическая и практическая значимость работы. В целом, оценивая работу положительно, ведущая организация отмечает, что в первой главе показан вывод применяемых в работе уравнений, что можно считать избыточным в силу их общеизвестности. В параграфе 1.3 автором предложена

формула для нахождения максимального коэффициента поглощения, однако ее сравнение с формулами других авторов не проводится. 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. В работе говорится о параллельном программном пакете собственной разработки, однако непосредственно о его реализации сказано мало. В работе присутствует небольшое количество опечаток, в частности, в тексте и на подписях к графикам на стр. 130-133 фамилия «Андерссон» в половине случаев написана как «Андессон»

На автореферат поступило 6 отзывов: 1) Положительный отзыв без замечаний от Болдырева Ю.Я., д.т.н., профессора кафедры прикладной математики, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет; 2) Положительный отзыв без замечаний от Дементьева О.Н., д.ф.-м.н., профессора, зав. кафедрой вычислительной механики и информационных технологий, ФГБОУ ВО Челябинский государственный университет; 3) Положительный отзыв без замечаний от Малышкина В.Э., д.т.н., профессора, зав. лабораторией синтеза параллельных программ, ФГБУН Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; 4) Положительный отзыв от Русакова С.В., д.ф.-м.н., профессора, зав. кафедрой прикладной математики и информатики, ФГБОУ ВО Пермский государственный национальный исследовательский университет; 5) Положительный отзыв от Шуваева Н.В., к.т.н., инженера-конструктор I кат. бригады аэродинамических расчетов, Инженерный центр ПАО "НПО Сатурн"; 6) Положительный отзыв от Острикова Н.Н., к.ф.-м.н., доцента, начальника научно-исследовательского отдела отделения аэроакустики и экологии ЛА, ГНЦ ФГУП НИМК "Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского".

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- В автореферате практически отсутствует информация об особенностях предложенных автором разностных схем повышенного порядка аппроксимации, хотя об этом упоминается в разделе научная новизна;
- Мнение о том, что автору следовало бы сузить заявленную область применения разработанного комплекса на определенный тип течений, в частности, характеризующиеся существенными турбулентными пульсациями в потоке;
- В автореферате не указаны основные свойства использовавшейся разностной схемы: порядок аппроксимации, консервативность, монотонность и другие;
- В автореферате не описаны принципы выбора значения максимального коэффициента поглощения σ_m , приведена лишь полученная формула для его вычисления;
- DRP коэффициенты настраиваются на определенный диапазон волновых чисел. Использовались ли разные настройки DRP-схемы для рассмотренных в диссертации задач или же были использованы некоторые универсальные настройки, было ли проведено обоснование данного выбора?
- В тексте автореферата не указано, как реализовано решение вблизи твердых стенок: разрешается ли пограничный слой напрямую или же используются функции стенки и другие аналогичные подходы
- В работе большое внимание уделено исполнению программного комплекса с использованием библиотек для графических процессоров, но в тексте автореферата нет све-

дений о достигнутом ускорении счета по сравнению с однопоточным исполнением или исполнением в параллельном режиме на центральных процессорах

- Из текста автореферата не ясно, как организовывалось получение начального распределения для нестационарных расчетов и как быстро задача сходилась к устойчивому решению, если начальное распределение не было получено заранее.
- Из представленных материалов неясен итоговый порядок численного метода после применения новой процедуры фильтрации
- Не приводятся результаты формальных тестов на сходимость метода
- Уравнения (1) представлены в неконсервативном виде, что сделало бы разработанный метод неприменимым к течениям с ударными волнами
- На рисунке 8г не представлены результаты других авторов по моделированию шума, излучаемого струей под углом наблюдения 90° , истекающей из сопла JEAN, которые получили лучшее совпадение с экспериментальными данными.
- Не представлены результаты расчета шума вентилятора в переднюю полусферу
- Не представлено сравнение расчетных и экспериментальных узкополосных спектров излучения вентилятора в заднюю полусферу.

В отзывах отмечено, что диссертация выполнена на достаточно высоком научном уровне, разработанные научные подходы и методологии лежат в русле одного из важнейших направлений математического моделирования на базе суперкомпьютерных технологий и способствуют расширению применения таких технологий не только в инженерном анализе, но способствуют расширению применимости современных моделей турбулентности к естественнонаучным исследованиям.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области газовой динамики, численных методов механики жидкости и газа, аэроакустики, течений в соплах и обтекании вентиляторов авиационных двигателей; имеют большое число публикации с результатами разработки физико-математических моделей генерации шума различных узлов авиационного двигателя и численных методов моделирования его генерации и распространения, а также моделирования обтекания различных тел потоком газа; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ) является одним из научно-образовательных центров России и имеет в своем составе Институт авиации, наземного транспорта и энергетики. КНИТУ-КАИ хорошо известен своими исследованиями в области аэродинамики летательных аппаратов и процессов, протекающих в ракетных силовых установках и турбореактивных авиационных двигателях.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан подход к моделированию трехмерных нестационарных турбулентных течений газа в областях сложной геометрии, основанный на численных схемах высокого

порядка аппроксимации и методе крупных вихрей с релаксационной фильтрацией;
предложены: переменный коэффициент силы узкополосного фильтра и выражение для ее определения, альтернативный подход к определению силы фильтра с детектором скачков в случае трансзвуковых течений, выражение для определения максимального коэффициента поглощения для неотражающих граничных условий в виде поглощающего слоя;

введена аналитическая модель распространения возмущения в поглощающем слое, на основе которой получено выражение для определения максимального коэффициента поглощения;

доказана эффективность применения метода крупных вихрей с релаксационной фильтрацией в комбинации с оптимизированными схемами высокого порядка аппроксимации для моделирования турбулентных течений газа;

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– предложенный подход к определению силы фильтра на основе детектора Дюкро позволяет более точно, чем стандартный фильтр на основе детектора Джеймсона, определить положение скачков уплотнения и ударных волн;

– предложенное выражение для максимального коэффициента поглощения позволяет определить его необходимое значение без предварительного численного моделирования;

– для метода крупных вихрей с релаксационной фильтрацией показано влияние размера шага по времени на эффективные диссипативные свойства узкополосного фильтра;

– предложенное выражение для переменной силы узкополосного фильтра позволяет уменьшить зависимость численных результатов от размера шага по времени.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов)

использованы численные методы для моделирования трехмерных турбулентных нестационарных течений газа в каналах сложной формы, в том числе при наличии относительного движения обтекаемых недеформируемых тел;

изложены новые результаты, подтверждающие эффективность применения схем высокого порядка аппроксимации и метода крупных вихрей с релаксационной фильтрацией для определения характеристик течения в различных узлах авиационного двигателя;

раскрыты особенности поведения метода крупных вихрей с релаксационной фильтрацией при изменении шага интегрирования по времени.

изучено влияние свойств численной схемы на возможность адекватного описания турбулизации слоя смещения на выходе из дозвукового сопла;

проведена модернизация существующих математических моделей трехмерных турбулентных течений газа, обеспечившая получение новых результатов по теме диссертации.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработан программный пакет, основанный на параллельных вычислениях, для моделирования трехмерных турбулентных течений газа в узлах авиационного двигателя;

определены уровни широкополосного фона в общем шуме рассмотренного вентилятора

турбореактивного двухконтурного двигателя;
создана методика для моделирования трехмерных турбулентных течений газа в узлах турбореактивного двухконтурного двигателя;
представлены результаты численного моделирования течений в различных узлах авиационного двигателя, в том числе сопле, смесителе, вентиляторе, межлопаточных каналах турбины.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория построена на известных и проверяемых приближениях сплошной среды и вязкого совершенного газа;

идея базируется на обобщении имеющегося опыта по моделированию трехмерных турбулентных течений газа конечно-разностными методами высокого порядка аппроксимации;

использованы апробированные современные программные средства для проведения численного моделирования течений газа;

установлено качественное и количественное соответствие полученных в работе численных и аналитических решений теоретическим и экспериментальным данным, представленным в литературе.

Личный вклад соискателя состоит в участии в постановке задач исследований, в разработке и реализации параллельного программного пакета, проведении численных экспериментов и аналитических расчетов, обсуждении полученных результатов и подготовке публикаций; результаты совместных работ представлены в диссертации с согласия соавторов.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, концептуальности и взаимосвязи основных выводов.

На заседании 20 октября 2016 г. диссертационный совет принял решение присудить Коромыслову Е.В. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 10 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 20, против – 0, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель

диссертационного совета

 / Матвеев Валерий Павлович

Ученый секретарь

диссертационного совета

 / Зуев Андрей Леонидович

20.10.2016 г.

М.П.

