

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д212.125.14 НА
БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение Диссертационного Совета от 24.12.2014 №17

О присуждении Лариной Елене Владимировне, гражданке РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Численное моделирование высокоскоростных турбулентных течений на основе двух и трехпараметрических моделей турбулентности» по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите «23» октября 2014 года (протокол № 15) Диссертационным Советом Д 212.125.14 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Министерство образования и науки РФ, 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4.

Соискатель Ларина Елена Владимировна 1987 года рождения, в 2011 году с отличием окончила «Московский авиационный институт (государственный технический университет)». В период подготовки диссертации соискатель обучался в очной аспирантуре кафедры «Вычислительная математика и программирование» факультета «Прикладная математика и физика» Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», которую окончила в 2014 году.

С апреля 2011 года по май 2014 года техник, инженер НИС-806 кафедры «Вычислительная математика и программирование» факультета «Прикладная математика и физика», с мая 2014 года ассистент кафедры «Вычислительная математика и программирование» факультета «Прикладная математика и физика».

По теме диссертации имеется 13 работ, в том числе 3 из них из перечня ВАК. Экзамены кандидатского минимума сданы на отлично. Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано 18 апреля 2014 года. Материалы предварительной экспертизы диссертации и все остальные документы соответствуют требованиям положения «О порядке присуждения ученых степеней» в полном объеме.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт» на кафедре «Вычислительная математика и программирование» факультета «Прикладная математика и физика».

Научный руководитель – Крюков Игорь Анатольевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, старший научный сотрудник НИО-806.

Официальные оппоненты:

1. Секундов Александр Николаевич, начальник сектора ЦИАМ им. П.И.Баранова, профессор, доктор технических наук;

2. Сафронов Александр Викторович, руководитель отдела «Газодинамика старта» ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ЦНИИмаш), кандидат физико-математических наук

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Государственный научный центр Российской Федерации федеральное государственное унитарное предприятие «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша» (ГНЦ ФГУП «Центра Келдыша»), г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном заместителем начальника отделения, д.т.н., профессором Борисовым Дмитрием Мариановичем, главным научным сотрудником, д.ф.-м.н., профессором Черкасовым Сергеем Гелиевичем, старшим научным сотрудником, к.ф.-м.н. Ананьевым Анатолием Викторовичем, указала, что тема диссертации является актуальной, а предложенные автором модели турбулентности могут быть использованы для моделирования течений в широком диапазоне скоростей. Разработанный программный комплекс позволяет получать осредненные характеристики турбулентных потоков газа в двумерной и трехмерной постановках для задач внешней и внутренней аэродинамики летательных аппаратов. Работа выполнена на высоком научном уровне и соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Замечания.

1. В работе рассмотрено влияние неравновесной вязкости в случае затухания однородной изотропной турбулентности. Желательно было бы добавить теоретическую оценку влияния неравновесной вязкости для таких течений, как пограничный слой на плоской пластине и течение с постоянным сдвигом.

2. Не во всех рассматриваемых расчетных случаях имеются полные описания параметров набегающего потока и граничных условий.

3. Следовало больше внимания уделить вопросу о степени универсальности предложенных моделей турбулентности.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании секции НТС отделения 2 (протокол № 8 от 01 декабря 2014 года), утвержден заместителем генерального директора на науке ГНЦ ФГУП «Центра Келдыша», профессором А.М.Губертовым

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован наличием публикаций в области численного моделирования и моделей турбулентности, а также их компетентностью по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Соискатель имеет 13 опубликованных научных работ, из них 3 работы опубликовано в научных изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для публикации основных научных результатов диссертации.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Иванов И.Э., Крюков И.А., Ларина Е.В. Влияние времени релаксации турбулентной вязкости на моделирование течений в соплах и струях // Изв. РАН. МЖГ. 2014. № 5. С. 149-159. (ВАК)
2. Иванов И.Э., Крюков И.А., Ларина Е.В. Математическое моделирование взаимодействия турбулентности с ударными волнами. Вестник МАИ, т. 18, №1, 2011, с. 21-26. (ВАК)
3. Крюков И.А., Глушко Г.С., Ларина Е.В. Некоторые особенности моделирования турбулентности в высокоскоростных течениях. Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского, № 4, часть 3, Нижний Новгород, 2011 г., с. 902-903. (ВАК)
4. Иванов И.Э., Крюков И.А., Ларина Е.В. Влияние учета неравновесности турбулентности на численное моделирование взаимодействия турбулентности с ударными волнами: 4-я Всероссийская школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем». Сборник научных трудов, Москва, 2011г., с. 59-62.
5. E.V. Larina, I.A. Kryukov, I.E. Ivanov. Numerical simulation of high-speed separation flow in the aerospace propulsion systems. ICAS 2014 Proceedings (29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences), 2014г, ISBN: 3-932182-80-4.
6. Ларина Е.В., Крюков И.А., Шушаков А., Иванов И.Э. Численное исследование течения вязкого газа в прямоугольной мелкой каверне

Материалы X международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2014). Алушта, 25-31 мая 2014 г., с. 40-43.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

Секундов Александр Николаевич (официальный оппонент)

Отзыв заверен секретарём Совета ЦИАМ, к.ф.-м.н. Исаковой Н.П.

Замечания по содержанию диссертации:

1. Отмечается, что $k-\omega-\mu_t$ модель, разработанная автором, в ряде случаев лучше других. Однако на стр. 30-31 введено три определения для времени релаксации μ_t . Как следствие, в работе используется все три варианта в форме уравнений (1.20)-(1.22). Получаются три различных $k-\omega-\mu_t$ модели. Но не указано, какая из них наилучшая.

2. На стр. 117 написано, что «Наиболее удачными для моделирования указанного течения являются высокорейнольдсовы модели: двухпараметрическая $k-\varepsilon$ модель Chen [90] с моделью сжимаемой диссипации Sarkar [149] и трехпараметрическая $k-\varepsilon-\mu_t$ модель без учета сжимаемой диссипации». Такое сравнение не совсем корректно, так как в одном случае используется модель с введенным эффектом сжимаемости, а в другом без учета этого эффекта.

3. Автор показал потенциальные возможности своей программы для расчета турбулентной струи методом моделирования крупных вихрей (метод LES). Однако этот раздел работы не доведен до конца. В расчете значительный участок струи ламинарный, что противоречит физике течения.

Сафронов Александр Викторович (официальный оппонент)

Отзыв заверен Советником генерального директора ЦНИИмаш, главным ученым секретарем, д.т.н., профессором Смагиным Ю.Н.

В работе выявлены следующие недостатки:

1. В большей части работы основным параметром, по которому сравниваются модели турбулентности, является статическое давление. Такой выбор не всегда достаточен. Так в струйном течении можно было

дополнительно провести сравнение по числу Маха, скорости или давлению торможения Пито на оси струи, а в задаче обтекания сжимающего угла по тепловому потоку или коэффициенту трения.

2. Как известно, имеются проблемы моделирования турбулентной вязкости в высокотемпературных сверхзвуковых течениях, однако автором не показана применимость предложенных моделей для этого случая.

3. В работе проведено тестирование предложенных автором моделей турбулентности на разнообразных высокоскоростных течениях, но большое количество выводов в работе затрудняет понимание того, какая же из рассмотренных моделей турбулентности, по мнению автора, является лучшей для расчета высокоскоростных турбулентных течений.

Отзыв составлен **Украинским Леонидом Ефимовичем**, заместителем директора Научного центра нелинейной волновой механики и технологии РАН, д.т.н., профессором.

По автореферату имеется следующее замечание:

Автором использовалось несколько вариантов двухпараметрических и трехпараметрических моделей турбулентности и проведены исследования для различных вариантов высокоскоростных течений. В автореферате было бы желательно более акцентировано указать, какие модели являются предпочтительными для рассмотренных классов течений.

Отзыв составлен **Шустовым Станиславом Алексеевичем**, доцентом кафедры теории двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (СГАУ), к.т.н.

Замечание: из автореферата не ясно, обеспечивает ли модифицированная модель учет таких физических факторов, существенно влияющих на процесс отрыва потока в сверхзвуковых соплах ракетных двигателей с профилированной сверхзвуковой частью, как число Рейнольдса

(пропорционально тяге двигателя), теплообмен продуктов сгорания со стенкой сопла, шероховатость стенок, наличие вихрей Гертлера.

Отзыв составлен **Савельевым Александром Дмитриевичем**, старшим научным сотрудником Вычислительного центра им. А.А. Дородницына Российской академии наук (ВЦ РАН).

Замечания:

1. В автореферате не нашли отражения некоторые методические вопросы, например, размеры разностных сеток, количество узлов в пограничном слое, в ламинарном подслое, сходимости по сетке, исходные значения турбулентных параметров и т.д.

2. Сравнение с экспериментальными и расчетными данными других авторов проводится в основном по одному параметру – распределению статического давления, в то время как для практики необходимы также данные о распределениях поверхностного трения и теплового потока, потерях полного давления.

Отзыв составлен **С.А. Исаевым**, профессором кафедры механики Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации, заведующим лабораторией фундаментальных исследований, д.ф.-м.н., профессором.

По автореферату можно сделать несколько замечаний:

1. Несколько странно, что в числе обзореваемых для сравнения моделей отсутствует MSST с множественными модификациями, однопараметрические модели вихревой вязкости Спаларта-Аллмареса и Секундова-Гуляева. В 2013 г. в ИПМ им. М.В.Келдыша РАН защищена докторская диссертация Усачовым А.Е. «Разработка и верификация многоблочных вычислительных технологий в пакете VP2/3 с приложениями к фундаментальным и прикладным задачам аэромеханики и теплофизики», в которой решен ряд задач сверхзвукового обтекания тел с использованием MSST.

2. Постановки задач представлены неполно. В особенности это касается теплообмена. Не ясно, какие пристеночные функции применяются, в частности, для тепловых потоков? Какими задавались входные параметры: кинетическая энергия и масштаб турбулентности, вихревая вязкость?

3. На каких сетках были проведены расчеты и каков был Y^+ для низкорейнольдсовых моделей?

4. Непонятно, можно ли использовать развитые трехпараметрические модели для расчета нестационарных течений?

5. Насколько адекватно отображается ударно-волновая картина струйных течений, в особенности, дисков Маха?

6. Выводы 6 и 8 в автореферате должным образом не обоснованы.

7. Не понятно, какую смысловую нагрузку в работе несут результаты расчета по модели крупных вихрей, тем более, что использованная модель не конкретизирована?

Отзыв составлен **Запрыгаевым Валерием Ивановичем**, д.т.н., профессором, заведующим лабораторией «Экспериментальной аэрогазодинамики» ИТПМ СО РАН.

В качестве замечаний следует отметить:

1. В работе не рассмотрены случаи сверхзвуковых перерасширенных струй, представляющий для моделей турбулентности еще более трудный тестовый случай по сравнению с недорасширенными струями. Представляет интерес применение предложенных диссертантом моделей турбулентности для расчета такого сверхзвукового струйного течения.

2. При рассмотрении гиперзвукового отрыва в угле сжатия желательно проверить по числу Кнудсена, является ли рассматриваемое течение течением с прилипанием газа на стенке. В описании не указано число Рейнольдса, не понятно является ли рассматриваемое течение турбулентным, поэтому желательно сравнить полученные результаты с ламинарным решением.

Отзыв составлен **Кузеновым Виктором Витальевичем**, ведущим научным сотрудником ФГУП ВНИИА им. Духова, к.т.н., доцентом.

По автореферату имеется следующее замечание:

Уравнение для турбулентной вязкости выводилось рядом авторов (Секундов А.Н., Yoshizawa A. и др.) при различных предположениях. Это уравнение содержит заметно большее количество членов, чем используется в данной работе. Возможно, учет этих членов приведет к улучшению точности предложенных автором вариантов модели.

Отзыв составлен **М.С.Кублановым**, профессором кафедры «Аэродинамика, конструкция и прочность ЛА» МГТУГА, д.т.н. и **В.В.Ефимовым**, доцентом кафедры «Аэродинамика, конструкция и прочность ЛА» МГТУГА, к.т.н.

Ряд вопросов и замечаний:

1. Автор исследовал ряд двухпараметрических моделей турбулентности в задаче взаимодействия турбулентности с ударными волнами. С точки зрения моделирования турбулентных течений данное течение является чрезвычайно важным, так как взаимодействие турбулентности и ударных волн встречается почти во всех высокоскоростных турбулентных потоках. Однако известно, что модели турбулентности не могут предсказать роста кинетической энергии турбулентности за ударной волной, поэтому желательно было бы автору не только исследовать, но и предпринять попытку модифицировать двухпараметрические модели так, чтобы лучше воспроизводить параметры турбулентности в данном течении.

2. Из автореферата остается не ясно, с какими постоянными в уравнении для кинетической энергии турбулентности и для скорости ее диссипации используется предложенная автором трехпараметрическая k - ε - μ_t модель турбулентной вязкости.

3. В автореферате говорится, что высокорейнольдсовы модели предполагают использование пристеночных функций, но при этом ничего

не сказано о том, какие модели из используемых являются высокорейнольдсовыми, а какие нет. Поэтому если учесть, что автор считает турбулентные течения с отрывами, то неясно какие пристеночные функции для таких течений можно и нужно использовать.

Отзыв составлен **Знаменской Ириной Александровной**, профессором кафедры молекулярной физики Физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова, д.ф.-м.н.

По материалу, представленному в автореферате, можно сделать следующие замечания:

1. Во второй главе при описании LES моделирования (рис. 4) недорасширенной сверхзвуковой струи не приводятся никакие важные параметры расчета. Не указана как реализована подсеточная модель турбулентности и каков размер расчетной сетки.

2. Следует более четко сформулировать рекомендации по применению предложенных моделей турбулентности к моделированию отдельных классов газодинамических течений (струи, сопла, пристеночные течения, диапазоны чисел Маха).

В дискуссии приняли участие:

- Пирумов Ульян Гайкович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, член Совета по специальности 01.02.05.

- Ревизников Дмитрий Леонидович, доктор физико-математических наук, профессор, член Совета по специальности 01.02.05.

- Владимир Федорович Формалев, доктор физико-математических наук, профессор, член Совета по специальности 01.02.05.

- Галиуллин Ильяс Абдэльхакович, доктор физико-математических наук, профессор, член Совета по специальности 01.02.01.

- Косенко Иван Иванович, кандидат физико-математических наук, профессор, член Совета по специальности 01.02.01.

- Котельников Михаил Вадимович, доктор физико-математических наук, член Совета по специальности 01.02.05.

Диссертационный Совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **разработаны** модификации релаксационной $k-\omega-\mu_t$ модели Olsen, Coakley (2001) с учетом трех различных зависимостей времени релаксации турбулентной вязкости к равновесному значению, а именно с учетом влияния вязкости, турбулентного давления и неравновесности турбулентности

- **разработана** высокорейнольдсовая релаксационная $k-\varepsilon-\mu_t$ модель турбулентности,

- **проведено** исследование предложенных моделей на применимость для моделирования сверхзвуковых турбулентных течений в недорасширенной струе и внутри сопел,

- **проведено** исследование сверхзвуковых и гиперзвукового обтекания сжимающего угла с использованием релаксационных моделей турбулентности, получено хорошее соответствие эксперименту результатов расчетов с использованием трехпараметрических моделей,

- **проведено** моделирование сверхзвукового двумерного течения в воздухозаборнике и получено приемлемое соответствие ударно-волновой картины сверхзвукового течения в канале (воздухозаборника) и статического давления между экспериментом и расчетом с использованием трехпараметрических моделей,

- **проведено** численное моделирование сверхзвукового течения в каверне и исследована возможность управления пульсационным режимом с помощью геометрического фактора.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- исследована и модифицирована малоизвестная модель турбулентной вязкости и показана ее применимость к моделированию сложных течений с большими градиентами давлений,

- предложенные модели турбулентности являются вычислительно экономичными моделями, позволяющими уточнять предсказание положения и протяженности отрывов в высокоскоростных пристеночных течениях, и ударно-волновой структуры в свободных течениях.

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

- разработанный программный комплекс позволяет проводить исследования влияния геометрии на средние характеристики стационарных и нестационарных турбулентных течений в широком диапазоне скоростей, таких как течения вблизи элементов летательных аппаратов и элементов двигательных установок, например, в воздухозаборных устройствах, соплах и вблизи каверн.

Личный вклад соискателя состоит в разработке моделей турбулентности для высокоскоростных сжимаемых течений и программного комплекса расчета турбулентных пространственных течений на неструктурированных сетках. Автор принимал непосредственное участие в проведении всех представленных в работе численных экспериментов, в построении сеток и постановке начальных и граничных условий в соответствии с экспериментальным описанием, исследованиях сходимости и применимости моделей турбулентности.

Диссертационный Совет пришёл к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней.

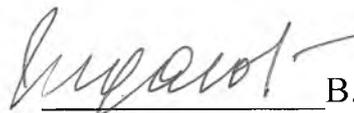
На заседании «24» декабря 2014 года Диссертационный Совет принял решение присудить Лариной Е.В. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования Диссертационный Совет в количестве 18 человек, из них 9 докторов наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав Совета, проголосовали: за 18, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель
Диссертационного Совета Д 212.125.14
д.ф.-м.н., профессор

 П.С. Красильников

Ученый секретарь
Диссертационного Совета Д 212.125.14
к.ф.-м.н., доцент

 В.Ю. Гидаспов

Ученый секретарь МАИ, к.т.н.



 А.Н. Ульяшина

24.12.2014