

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.237.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ  
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 08 декабря № 5

О присуждении **Соломатину Роману Сергеевичу**, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Численное моделирование процессов высокоскоростного смешения и горения в неоднородных топливо-воздушных смесях» по специальности 1.2.2 – «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 29 сентября 2022 г. (протокол заседания № 5/пз) диссертационным советом 24.1.237.01, созданным на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук», 125047, Москва, Миусская пл., д. 4. Диссертационный совет утвержден приказом Минобрнауки России №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель **Соломатин Роман Сергеевич** 1994 года рождения, в 2017 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» с присвоением квалификации магистр по направлению подготовки 03.04.01 – Прикладные математика и физика.

В 2021 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» по направлению подготовки 09.06.01 – информатика и вычислительная техника с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь».

Диссертация выполнена в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. В период подготовки диссертации соискатель обучался в аспирантуре ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

В настоящее время соискатель работает в должности научного сотрудника отдела вычислительной математики Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук».

**Научный руководитель – Меньшов Игорь Станиславович**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник (уч. зв.), главный научный сотрудник 8-го отдела Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», член диссертационного совета 24.1.237.01.

**Официальные оппоненты:**

**Власенко Владимир Викторович**, доктор физико-математических наук, доцент, заместитель начальника лаборатории отделения аэродинамики силовых установок Федерального автономного учреждения "Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского" (ФАУ «ЦАГИ»),

**Шорстов Виктор Александрович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела 017 Федерального автономного учреждения «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»)

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук» в своем **положительном** отзыве, подписанном **Крупкиным Владимиром Георгиевичем**, доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником лаборатории 1313 ФГБУН ФИЦ ХФ им. Н.Н. Семенова РАН, и утвержденным **Надточенко Виктором Андреевичем**, доктором химических наук, профессором, директором ФГБУН ФИЦ ХФ им. Н.Н. Семенова РАН указала, что работе содержатся результаты, касающиеся численного моделирования высокоскоростных турбулентных многокомпонентных течений с учетом химических реакций между компонентами, которые могут быть применены для решения задач, представляющих научную и практическую ценность. Диссертация Р.С. Соломатина представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая может быть продолжена и расширена в дальнейшем. Результаты работы свидетельствуют о способности диссертанта решать сложные задачи вычислительной математики в области газовой динамики. Работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Роман Сергеевич Соломатин заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Соискатель имеет 13 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 7 работ, из них в журналах из списка ВАК по профилю специальности 6 работ, в том числе 2 работы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных.

Список публикаций по теме диссертации:

1. Соломатин Р.С., И.В. Семенов, И.С. Меньшов. К расчету турбулентных течений на основе модели Спаларта-Аллмараса с применением LU-SGS-GMRES алгоритма // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, препринт № 119. 2018. 30 с. (ВАК)

2. Соломатин Р.С., И.В. Семенов. Численное моделирование сверхзвукового смешения в камере сгорания Барроуса-Куркова с использованием SA-RANS модели // Горение и взрыв, Т. 12. № 3. 2019. С. 69-77. **(ВАК)**
3. Solomatin, R.S. and I.V. Semenov. Modelling of hydrogen-air supersonic mixing and combustion in near-wall region // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. Vol. 36. № 2. 2021. Pp. 101-115. **(ВАК, Scopus, Web of Science)**
4. Solomatin, R., I. Semenov and I. Menshov. Mixing and Combustion in Supersonic Near-Wall Shear Flows // WCCM-ECCOMAS2020 proceedings. 2021. 8 p. URL: [https://www.scipedia.com/public/Solomatin\\_et\\_al\\_2021a](https://www.scipedia.com/public/Solomatin_et_al_2021a). **(ВАК, Scopus)**.
5. Соломатин Р.С. О моделировании формирования нестационарного турбулентного пограничного слоя в рамках SA-IDDES подхода // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша, препринт № 33. 2022. 34 с. **(ВАК)**
6. Соломатин Р.С. Реализация модели смешения и горения турбулентных течений в рамках программного комплекса // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша, препринт № 47. 2022. 28 с. **(ВАК)**
7. Соломатин Р.С., И.В. Семенов. Моделирование сверхзвукового смешения в камере сгорания Барроуза-Куркова методом SA-RANS // Nonequilibrium processes. Vol. 2. Сборник трудов конференции 8th International Symposium On Nonequilibrium Processes, Plasma, Combustion, And Atmospheric Phenomena. 2019. С. 341-351.

В работах [1, 2, 4, 7] вклад автора заключался в разработке модели смешения и горения в высокоскоростных газовых потоках с использованием RANS подхода к моделированию турбулентности, реализации алгоритмов в виде программного кода и их интеграции в газодинамический программный комплекс, а также проведении численных экспериментов. В работе [5] автор реализовал метод моделирования высокоскоростных газовых потоков с использованием более сложного нестационарного гибридного подхода к

моделированию турбулентности IDDES, а также провел валидацию реализованных алгоритмов на задаче о турбулентном течении сверхзвукового потока в периодическом канале. В работе [6] автором была описана схема работы используемых программного комплекса, численных методов и алгоритмов, в том числе реализованных автором в процессе работы над диссертацией.

Научные статьи отражают основные результаты диссертационной работы. Недостоверных сведений в тексте диссертации об опубликованных соискателем работах нет.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы ведущей организации и оппонентов, также поступило 3 отзыва на автореферат. Все отзывы положительные. Отзывы содержат ряд замечаний:

*В отзыве ведущей организации ФГБУН ФИЦ ХФ им. Н.Н. Семенова РАН:*

1. Текст диссертации ряд опечаток и дублирующих обозначений, что затрудняет восприятие написанного.
2. Некоторые из представленных в диссертации рисунков содержат слишком большое количество информации (линий графиков), нанесенных на один рисунок. Информативность таких рисунков снижена, так как сложно ориентироваться в большом количестве ярких цветных линий, подчас наложенных друг на друга на небольшом по размеру рисунке.
3. Для основной задачи (камеры сгорания Барроуса-Куркова) не представлено распределения отношения турбулентной вязкости к ламинарной, как это было сделано в разделе 4.7 в задаче о нестационарном пограничном слое в канале. Между тем данное распределение служит хорошей иллюстрацией работы метода моделирования турбулентности, в данном случае гибридного.

4. В работе мало внимания уделено экспериментальной составляющей основной задачи. Представлены геометрические размеры камеры, а также сделано упоминание, о том, что стенки камеры сделаны из меди. Этим описание ограничивается. Нет упоминания о том, какие еще компоненты содержит установка и как они влияют на ход эксперимента.
5. Также в диссертации не представлено описание оборудования (датчиков), которые использовались в эксперименте, а также о точности экспериментальных данных, с которыми ведется сравнение. Точки на рисунках имеют достаточно большой размер, однако непонятно, отражает ли данный размер погрешность эксперимента. К примеру, на рисунках 113-114 показаны две экспериментальные точки для мольной доли воды, соответствующие примерно одному значению  $Y$ , но отличающиеся по значению концентрации. Учитывая, что воспроизведению пика мольной доли водяного пара в зоне пламени в работе уделяется много внимания, возникает вопрос о том, насколько точны экспериментальные данные, которые диссертант пытается повторить в расчетах?
6. Так как расчетная область в работе содержит не только саму камеру, но и часть изолятора, формулировку «профили параметров построены во входном и выходном сечениях камеры» желательно уточнять и приводить продольную координату данных сечений.
7. По результатам сравнения расчетов с использованием различных подходов показано, что применение менее вычислительно затратного RANS подхода позволяет получить лучшее соответствие контрольным данным, чем применение более сложного подхода IDDES. Стоило бы отметить в каком случае достаточно более простого подхода, а в каком оправдано применение более сложного.

*В отзыве официального оппонента д.ф.-м.н. Власенко В.В.:*

1. В используемой схеме расщепления по физическим процессам сначала определяется изменение параметров системы под действием газодинамического оператора (включающего процессы смешения компонент), а затем от полученного состояния делается локальный химический шаг, учитывающий только вклад от химических реакций. Очевидным недостатком такого подхода является то, что химический оператор, описывающий экспоненциально меняющиеся моды решения, действует в течение полного шага по времени на систему с другим начальным состоянием (полученным в результате такого же шага по времени на газодинамическом шаге). В существенно нелинейных задачах, к каким относится данный класс течений, расщепление может приводить к падению порядка аппроксимации метода. К сожалению, исследование порядка аппроксимации в работе отсутствует. По мнению оппонента, данный подход является вполне оправданным лишь в задачах с быстрой кинетикой, которая подстраивается под медленные процессы конвекции и диффузии. Однако в сверхзвуковых течениях, которые рассматриваются в диссертации, масштабы кинетики и смешения могут быть сопоставимы.
2. В работе не представлены классические тесты для вихреразрешающих подходов – “коробка” с изотропной турбулентностью, вихрь Тейлора-Грина. Не показано, какие спектры турбулентности получаются в расчетах, воспроизводится ли в них интервал универсального равновесия, существование которого является условием применимости метода LES. Согласно выводу в конце раздела 4.6, автор принял решение использовать в вихреразрешающих расчетах противопоточные аппроксимации для конвективных членов. По опыту Лаборатории физического и численного моделирования течений с турбулентностью и горением ЦАГИ, применение противопоточных схем приводит к порче спектра турбулентности и потере равновесного интервала. Это может быть одной из основных причин, по которой IDDES-расчеты основной задачи (эксперимент Бэрроуза и Куркова) дали худшие результаты, чем RANS-расчеты.

*В отзыве официального оппонента к.ф.-м.н. Шорстова В.А.:*

1. При рассмотрении модельных задач мало внимания уделяется вихреразрешающим расчетам.
2. Для задачи о развитом турбулентном течении в прямоугольном канале не представлены разрешаемые компоненты тензора Рейнольдсовых напряжений и осредненные поля скоростей (появляются ли вторичные токи в угол?). Источник в форме градиента давления должен приводить к подводу энергии к потоку подробности о его введении отсутствуют в работе.
3. Расчет приращений от реакций на основе  $n+1$  слоя газодинамической схемы приводит к снижению итогового порядка аппроксимации по времени до первого.

*В отзыве от д.ф.-м.н. Кудрявцева Алексея Николаевича, с.н.с. Лаборатории вычислительной аэродинамики ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН.*

Нет серьезных замечаний по сути работы. Небольшие претензии можно высказать по поводу оформления автореферата: в нем встречаются опечатки («теоритическими»), нестандартные названия («обратная схема Эйлера» - очевидно о неявном методе Эйлера), нерасшифрованные аббревиатуры (ФДН-метод Гира – очевидно о формулах дифференцирования назад). Рис .3 мало что говорит о величине диссипации рассматриваемых схем без информации о числе узлов сетки, на которой производились расчеты. Вызывают вопрос приведенные после системы уравнений (1) выражения для внутренней энергии и энтальпии в виде  $c_v T$  и  $c_p T$  соответственно: неужели при моделировании горения теплоемкости принимались не зависящими от температуры? Отмечу, что далее, на стр. 11, сказано «для теплоемкости и энтальпии используется полиномиальная зависимость от температуры».

*В отзыве от д.ф.-м.н. Кочеткова Анатолия Васильевича, профессора, заведующего кафедрой динамики многокомпонентных сред НИИ Механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского и к.ф.-м.н. Абузярова Мустафы Хасьяновича, с.н.с. (зв.), в.н.с. НИИ Механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского.*

1. Среди целей диссертации указана “разработка модели высокоскоростного смешения и горения...”. Видимо речь идет о создании строгой математической модели. А в выводах речь идет только о численной модели. Чем вызвано такое несоответствие?
2. Из автореферата неясно каким образом определяется давление в смеси.
3. При тестировании численной методики автором используются расчетные сетки на порядок грубее, чем у зарубежных авторов, чем это вызвано?
4. Что означает выражение ” ... в прямоугольном периодическом канале...”

*В отзыве д.ф.-м.н. Дерюгина Юрия Николаевича, с.н.с. (зв.), г.н.с. ИТМФ ФГУП «РФЯЦ -ВНИИЭФ»*

1. В автореферате не освещается вопрос об определении усредненных скоростей химических реакций для различных условий турбулентного смешения потоков.
2. В автореферате приведены результаты горения только для водородо-воздушной смеси. Как эти результаты переносятся на другие виды топлив (например углеводородные), поскольку в названии диссертации говорится о горении в топливо-воздушных смесях?

**Выбор официальных оппонентов** и ведущей организации обосновывается широкой известностью и высоким уровнем компетентности по основным вопросам, рассматриваемым в диссертации. Так в лаборатории отделения аэродинамики силовых установок, заместителем руководителя которой является оппонент Власенко В.В. проводится большое количество как экспериментальных, так и расчетных работ по моделированию физико-химических процессов в высокоскоростных камерах сгорания, а сам Власенко В.В. является автором и соавтором большого количества публикаций по данной теме, посвященных в том числе разработке новых газодинамических моделей, разработке и анализу новых численных алгоритмов. Оппонент Шорстов В.А. обладает высоким уровнем

компетентности в области моделирования газовой динамики с применением современных подходов, он является специалистом по численному решению задач аэродинамики, и аэроакустики, моделированию турбулентных течений с детальным вихререшением. Квалификация оппонента подтверждается списком его публикаций.

Сотрудники Федерального исследовательского центра химической физики являются известными специалистами в области вычислительной химии, в том числе моделирования горения в различных топливо-окислительных смесях, что также подтверждено их публикациями.

**Диссертационный совет** отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. **Разработана** численная модель турбулентного смешения и горения в высокоскоростных газовых потоках, основанная на использовании гибридного RANS-LES подхода IDDES, в основе которого лежит полуэмпирическая модель турбулентности Спаларта-Аллмараса (SA), а также детального кинетического механизма, включающего реакции, имеющие зависимость скорости, как от температуры, так и от давления.
2. **Реализованы** вычислительные алгоритмы и программных модули, которые были **интегрированы** в параллельный программный комплекс для моделирования пространственных течений потоков вязкого сжимаемого многокомпонентного газа на многопроцессорных ЭВМ.
3. **Проведена** верификация и валидация работы как отдельных блоков модели, так и модели в целом путем численного решения модельных задач и подтверждена корректность разработанных алгоритмов.
4. **Выполнено** моделирование процессов сверхзвукового смешения и горения в модельной камере сгорания с применением RANS и IDDES подходов. Проведен сравнительный анализ результатов между собой,

а также с экспериментальными и расчетными данными других авторов.

**Теоретическая значимость исследования** состоит в разработке комплексной физико-математической модели процессов смешения и горения в высокоскоростных многокомпонентных газовых потоках, которая представляет собой эффективную комбинацию существующих базовых моделей и численных методов.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что разработанная модель, вычислительные алгоритмы и программные модули могут быть использованы для численного решения актуальных практических задач, таких как моделирование физико-химических процессов в камерах сгорания современных энергетических и двигательных установок.

**Оценка достоверности результатов исследования** выявила, что результаты, полученные с использованием разработанной модели, подтверждены расчетами на ЭВМ модельных тестовых задач и сопоставлением полученных решений с экспериментальными и уже известными расчетными данными.

**Личный вклад соискателя:**

Лично автором была проведена разработка моделей, алгоритмов и программных модулей для реализации подходов к моделированию турбулентности, детального кинетического механизма. Реализован алгоритм взаимодействия газодинамического и кинетического модулей. Также автором была выполнена реализация гибридного модифицированного численного метода Кранка-Николсон и низкодиссипативного метода расчета конвективных потоков. Автор разработал и реализовал несколько программных модулей, расширяющих функционал используемого программного комплекса. Все численные исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично автором в процессе

научной деятельности. Материалы из совместных публикаций, использованные в работе, содержат оригинальные результаты автора.

В ходе защиты диссертации соискатель аргументированно и убедительно ответил на заданные вопросы и высказанные замечания.

Во время дискуссии в поддержку диссертации выступили: председатель совета академик РАН, д.ф.-м.н. Б.Н. Четверушкин, член совета д.ф.-м.н. Е.Н. Аристова, представитель ведущей организации ФИЦ ХФ РАН к.ф.-м.н. В.А. Сметанюк.

На заседании 8 декабря 2022 г. диссертационный совет принял решение: за разработку комплексной физико-математической модели процессов высокоскоростного смешения и горения в неподготовленных реагирующих газовых смесях, позволяющую проводить предсказательное моделирование физико-химических процессов в камерах сгорания современных двигательных установок, присудить Соломатину Роману Сергеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 16, против нет, недействительных бюллетеней нет.

Председатель

диссертационного совета 24.1.237.01 Четверушкин Борис Николаевич

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.237.01 Корнилина Марина Андреевна

08 декабря 2022 г.

