

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

Диссертационный совет: Д 212.125.14

Соискатель: Кононов Дмитрий Сергеевич

Тема диссертации: «Численное моделирование высокоскоростных течений с ударными и детонационными волнами в каналах».

Специальность: 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Решение диссертационного совета по результатам защиты: на заседании 22 апреля 2022 года, протокол № 5, диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация полностью удовлетворяет пунктам 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года «О порядке присуждения ученых степеней», и принял решение присудить Кононову Дмитрию Сергеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.


Присутствовали: Красильников П.С. – *председатель*, Гидаспов В.Ю. – *ученый секретарь*, а также члены диссертационного совета: Холостова О.В., Бардин Б.С., Буров А.А., Колесник С.А., Косенко И.И., Котельников В.А., Котельников М.В., Никитченко Ю.А., Овчинников М.Ю., Ревизников Д.Л., Рябов П.Е., Формалев В.Ф., Ципенко А.В., Черепанов В.В., Шамолин М.В.

Председатель диссертационного совета Д 212.125.14,
доктор физико-математических наук,
профессор



Красильников
Павел Сергеевич

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.14,
доктор физико-математических наук



Гидаспов Владимир
Юрьевич



ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.125.14,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 22 апреля 2022 г. № 5

О присуждении Кононову Дмитрию Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Численное моделирование высокоскоростных течений с ударными и детонационными волнами в каналах», представленная к защите по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», принята к защите 16.02.2022 г., протокол № 2, диссертационным советом Д 212.125.14, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, приказ Минобрнауки РФ о создании совета - № 714/НК от 02.11.2012.

Соискатель Кононов Дмитрий Сергеевич, 1993 года рождения, в 2016 году окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет)» по специальности «Прикладная математика и информатика» с присуждением квалификации «Магистр» (диплом серия 107718 номер 0668265 от 29.02.2016 г.).

В период с 2016 г. по 2020 г. проходил обучение в очной аспирантуре на кафедре вычислительной математики и программирования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по специальности «Механика жидкости, газа и плазмы» (диплом серия 107718 номер 1121315 от 09.07.2020 г).

В настоящее время Кононов Д.С. работает в должности разработчика АО «Лаборатория Касперского».

Диссертация выполнена на кафедре вычислительной математики и программирования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник кафедры «Вычислительная математика и программирования» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Гидаспов Владимир Юрьевич.

Официальные оппоненты:

1. Мануйлович Иван Сергеевич, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова.
2. Котов Михаил Алтаевич, гражданин Российской Федерации, кандидат физико-математических наук, ученый секретарь Института

проблем механики им. А.Ю. Ишлинского, старший научный сотрудник Лаборатории лазерных разрядов.

Все оппоненты дали положительное заключение о диссертации.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматизации проектирования Российской академии наук» (ИАП РАН) (123056, г. Москва, ул. 2-я Брестская, д.19/18) представила положительный отзыв, который подписан главным научным сотрудником, доктором физико-математических наук Никитиным И.С., старшим научным сотрудником, кандидатом физико-математических наук Лопато А.И. и утвержден директором ИАП РАН, доктором физико-математических наук Никитиным И.С.

В отзыве ведущей организации указано, что диссертация Кононова Д.С. «Численное моделирование высокоскоростных течений с ударными и детонационными волнами в каналах» выполнена на высоком физико-математическом уровне, а проведенные в работе исследования являются научно-обоснованными и имеют практическую значимость в области вычислительной физической газовой динамики. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, а её автор, Кононов Дмитрий Сергеевич, заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук.

Замечания по диссертации:

1. При рассмотрении течения горючей смеси в ударной трубе вязкие эффекты не учитываются. Формирующиеся на стенках пограничные слои могут сильно изменить характер течения за ударной волной. Данный факт снижает ценность полученных результатов.

2. Сделанные выводы о стабилизации детонационной волны в канале, основанные на одномерной теории, имеют чисто теоретическое значение ввиду существенно многомерного характера течения с ударными и детонационными волнами в реальных энергетических установках.
3. На стр. 39-40 приведены зависимости концентраций от времени. Подобные графики качественно соответствуют результатам многих нульмерных расчетов для других смесей. Было бы желательно привести сравнение с какими-то расчетами из других статей для количественных сравнений с приведенными результатами.
4. На стр. 44 приведены результаты расчетов задачи Сода. Профили содержат участки с немонотонностями в районе ударной волны. В работе использовался метод Годунова для интегрирования уравнений и метод HLL для расчета потоков через грани ячеек. Подобные схемы, как правило, являются монотонными. Например, в книге Toro E.F. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics. Third Edition на стр. 339 приведены профили для схемы HLL. Там нет никаких немонотонных участков. Желательно объяснить полученные вычислительные эффекты.
5. В работе много повторов одних и тех же систем уравнений и соотношений, что приводит к неоправданному} увеличению объема текста. Например, соотношения Ренкина-Гюгонио приводятся на стр. 23, 49, 93, 108, 109, 110, 115.

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на семинаре отдела вычислительных методов и турбулентности, протокол № 1/03 от «29» марта 2022 года.

Соискатель имеет 4 публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, Scopus, WoS.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. *Гидаспов В.Ю., Кононов Д.С.* Численное моделирование сжигания топлива в стационарной детонационной волне в канале переменного сечения со сверхзвуковым потоком на входе и выходе. Труды МАИ, 2019, № 109, сс. 19 (перечень ВАК)
2. *Gidaspov V.Yu., Kononov D.S.* On the Stability of a Detonation Wave in a Channel of Variable Cross Section with Supersonic Input and Output Flows. Smart Innovation, Systems and Technologies. Advances in Theory and Practice of Computational Mechanics, 2020 (Scopus)
3. *Гидаспов В.Ю., Кононов Д.С., Северина Н.С.* Моделирование воспламенения и детонации метано-воздушных смесей за отраженной ударной волной. Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58. № 6. С. 909-914 (Web of Science)
4. *Кононов Д.С., Гидаспов В.Ю., Стрижак С.В.* Упрощенные кинетические модели горения метана для расширения возможностей пакета OpenFOAM и физико-химических библиотек. Труды Института системного программирования РАН, том 33, вып. 6, 2021, стр. 229-240. DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(6)-16 (перечень ВАК)

На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы (все отзывы положительные).

Отзыв на диссертацию официального оппонента, доктора физико-математических наук Мануйловича Ивана Сергеевича, заверенный начальником отдела кадров НИИ механики МГУ. Отзыв положительный, содержит замечания:

1. Описание математической модели для смеси совершенных газов, приведенное в первой главе работы, явно избыточно. Аналогичные описания содержатся в большом числе статей и монографий. Было бы целесообразно его вообще не приводить или вынести в приложение.
2. Для моделирования горения водорода в работе используются два кинетических механизма, включающих 19 и 8 обратимых стадий.

Однако сравнение результатов расчетов, проведенных с их использованием, отсутствует. Также нет сравнения с расчетными и экспериментальными данными по задержкам времени воспламенения.

3. В четвертой главе приведены результаты двумерных нестационарных расчетов распространения детонации в метано-воздушной горючей смеси, инициированной отраженной ударной волной. Как следует из рисунков, реализуется периодическая ударно-волновая структура детонации. Однако отсутствует оценка размеров полученных детонационных ячеек, являющихся важнейшей характеристикой при описании детонационных процессов. Также отсутствует исследование сеточной сходимости полученных результатов.
4. Все расчетные исследования детонации проводятся в областях простейшей формы, что существенно сужает область применения полученных результатов.
5. Хотелось бы получить объяснение по поводу употребления слова «постановка» по отношению к волне (например, стр. 23 диссертации).

Отзыв на диссертацию официального оппонента, кандидата физико-математических наук Котова Михаила Алтаевича, заверенный директором ИГиЛ СО РАН, доктором физико-математических наук Якушем С.А. Отзыв положительный, содержит замечания:

1. Ссылки на источники в работе расположены не по порядку возрастания. Например, ссылки во введении начинаются сразу со [110].
2. Обзорная часть хорошо написана, однако, содержит достаточно скупое упоминание коллектива ИГиЛ СО РАН. Есть только ссылка на работу по спиновой детонации [60], но не упоминаются труды В.М. Титова, В.В. Митрофанова.
3. При численном моделировании не учитываются диффузия, вязкость и теплопроводность. В рассматриваемом диапазоне параметров их изменения в зависимости от давления и температуры уже могут

начинать вносить свой вклад в получаемое решение. То же самое можно сказать и о плотности, которая в работе предполагается постоянной. Нужно заметить, что корректный учет данных параметров значительно усложняет вычислительную задачу и, в общем случае, в квазиодномерной постановке не целесообразен.

4. В третьей главе работы при численном моделировании нестационарного течения с неравновесными химическими превращениями используется фиксированный контур канала, что не позволяет сделать вывод о влиянии кинетики химических реакций на положение и устойчивость детонационной волны при изменении геометрических характеристик.
5. В тексте диссертации отсутствует описание способа повышения порядка численной схемы до второго. Это представляло бы интерес, например, для определения тепловых потоков на стенки камеры.
6. Работа богата интересными вычислительными результатами. Но сравнение с экспериментальными данными представлено только с работой [84] по самовоспламенению метановоздушных смесей. Хотелось бы видеть больше подобных сопоставлений и не только по самовоспламенению. Например, даже сравнения X-T диаграмм с распределениями градиента плотности из работ Б.В. Войцеховского, Р.И. Солоухина, А.А. Васильева и др. представляли бы большой интерес.
7. Есть замечания технического плана - в тексте присутствуют опечатки и неточности, в т.ч. на некоторых картинках. Например, на рис. 2.7 не указаны номера кривых, без которых разобраться в представленных газодинамических зависимостях затруднительно.

На автореферат диссертации поступило 3 отзыва. Все поступившие отзывы положительны. В поступивших отзывах отмечается актуальность и научная новизна диссертационного исследования, практическая значимость полученных результатов работы.

1. Отзыв подписан главным научным сотрудником ПАО «РКК Энергия», доктором физико-математических наук, доцентом Алексеевым Алексеем Кирилловичем и заверен ученым секретарем ПАО «РКК Энергия», доктором физико-математических наук Хатунцевой Ольгой Николаевной. Отзыв положительный, в отзыве представлены замечания:

1. В работе приводятся результаты расчетов течений в каналах, длина которых может составлять несколько метров (рис. 21, 22). при этом вязкие эффекты не учитываются, что в определенной степени снижает практическую ценность полученных результатов.
2. В автореферате нарушена нумерация рисунков, так как после рис. 17 приводится рис. 20, рисунки 18 и 19 отсутствуют.

2. Отзыв подписан кандидатом физико-математических наук, доцентом кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова Мурсенковой Ириной Владимировной и заверен ученым секретарем физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, профессором Караваевым Владимиром Александровичем. Отзыв положительный, в отзыве сделано замечание, что исследование устойчивых и неустойчивых режимов течения в одномерной постановке носит оценочный характер ввиду многомерности реального течения.

3. Отзыв подписан заместителем начальника отделения 2 – начальником отдела АО ГНЦ «Центр Келдыша», доктором технических наук, профессором Борисовым Дмитрием Мариановичем и заверен ученым секретарем АО ГНЦ «Центр Келдыша» Смирновым Юрием Леонидовичем. Отзыв положительный, в отзыве представлены замечания:

1. Отсутствует анализ влияния геометрических характеристик канала на устойчивость химически неравновесного течения.

2. В качестве реагирующих смесей в работе рассматриваются водородовоздушные и метановоздушные смеси. С практической точки зрения более важным является исследование керосиновоздушных смесей.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью в отрасли наук, к которой относится диссертационная работа Кононова Дмитрия Сергеевича, что подтверждается наличием у них многочисленных публикаций по теме диссертации в рецензируемых изданиях за последние 5 лет.

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

- *Разработаны* вычислительные алгоритмы расчета параметров течений с равновесными и неравновесными химическими реакциями. В них при неубывании энтропии осуществляется непрерывный переход к состоянию термодинамического равновесия от начального неравновесного состояния.
- *Решена* задача прохождения особой точки в прямой задаче теории сопла в канале переменного сечения со сверхзвуковым потоком на входе и выходе в квазиодномерной постановке для многокомпонентного совершенного газа с химическими превращениями, описываемыми многостадийными кинетическими механизмами с наличием ударной (детонационной) волны в области перед критическим сечением.
- *Проанализирована* устойчивость течения в канале переменного сечения со сверхзвуковым потоком на входе и выходе, в квазиодномерной нестационарной постановке, численно получены устойчивые режимы течения с пересжатой детонационной волной в докритической области.
- *Численно решена* задача о распространении пересжатой детонационной волны в канале постоянного сечения после отражения ударной волны

от закрытого торца. Установлено, что параметры течения, которые реализуются на больших расстояниях от отражающей стенки, с высокой точностью соответствуют решению задачи о равновесной отраженной детонационной волне. Предложен алгоритм определения значений числа Маха падающей ударной волны, при которых детонационная волна выходит на режим Чепмена-Жуге.

Практическая значимость работы: разработанные вычислительные алгоритмы и комплекс программ могут использоваться для анализа течений с химическими превращениями, описываемыми как многостадийными, так и упрощенными кинетическими механизмами, в энергетических и технологических установках, которые используются в ракетно-космической и авиационной отраслях промышленности. Предложенные в диссертации методики математического моделирования позволяют рассчитывать равновесные и неравновесные течения с физико-химическими превращениями, которые могут использоваться при моделировании в частности таких явлений, как горение и детонация, образование токсичных компонент, позволяют определять тонкую структуру химически неравновесных течений от инициирования реакций до перехода к термодинамическому равновесию.

Достоверность результатов подтверждается проведением верификации и валидации результатов численного моделирования: соответствия точным аналитическим решениям, сравнением с расчётами других авторов и сопоставлением с экспериментальными данными.

Личный вклад заключается в разработке вычислительных алгоритмов, написании программных кодов, проведении широкомасштабных вычислительных экспериментов и анализе полученных результатов.

Диссертационная работа Кононова Д.С. полностью удовлетворяет пунктам 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года «О порядке присуждения ученых степеней», представляет законченную научно-квалификационную работу, в которой проведены автором исследования актуальных задач численного моделирования высокоскоростных течений на основе реализованной физико-математической модели и разработанных вычислительных алгоритмах.

На заседании 22 апреля 2022 года протокол № 5 диссертационный совет принял решение присудить Кононову Дмитрию Сергеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 9 докторов наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», участвовавших в заседании; из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного
совета Д 212.125.14,
доктор физико-математических наук,
профессор

Красильников
Павел Сергеевич

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.125.14,
доктор физико-математических наук

Гидасов Владимир
Юрьевич



22 апреля 2022 г.