

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01) на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких температур Российской академии наук
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)
от 15 сентября 2021 г. (протокол № 12)

Защита диссертации **Киверина Алексея Дмитриевича**
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
**«Нестационарные режимы горения и формирования детонации в
газообразных и дисперсных средах»**

Специальность 01.04.14 (1.3.14) - теплофизика и теоретическая теплотехника

Москва – 2021

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01) на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного
института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва,
ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)

Протокол № 12 от 15 сентября 2021 г.

Диссертационный совет Д 002.110.02 (24.1.193.01) утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ от 11.04.2012 г. № 105/нк в составе 31 человека. На заседании присутствуют 21 человек, из них 10 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 11 докторов наук по специальности 01.04.14 (1.3.14) – теплофизика и теоретическая теплотехника. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

Председатель – зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01)
д.ф.-м.н., профессор Андреев Н.Е.

Ученый секретарь – ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01)
д.ф.-м.н. Васильев М.М.

1	Фортов В.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
2	Андреев Н.Е.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
3	Канель Г.И.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
4	Васильев М.М.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
5	Агранат М.Б.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.14	Подключен
6	Амиров Р.Х.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.9	Присутствует
7	Баженова Т.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
8	Вараксин А.Ю.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
9	Васильев М.Н.	Д.т.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
10	Василяк Л.М.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
11	Воробьев В.С.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
12	Гавриков А.В.	Д.ф.-м.н., доцент	1.3.14	Присутствует
13	Голуб В.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
14	Грязнов В.К.	Д.ф.-м.н.	1.3.14	Подключен
15	Дьячков Л.Г.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
16	Еремин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
17	Зейгарник Ю.А.	Д.т.н., с.н.с.	1.3.14	Присутствует
18	Иосилевский И.Л.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
19	Кириллин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
20	Лагарьков А.Н.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
21	Ломоносов И.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
22	Медин С.А.	Д.т.н., профессор	1.3.14	Подключен
23	Норман Г.Э.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
24	Петров О.Ф.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
25	Полежаев Ю.В.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
26	Савватимский А.И.	Чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
27	Сон Э.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
28	Старостин А.Н.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
29	Филиппов А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
30	Храпак А.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
31	Яньков Г.Г.	Д.т.н., с.н.с.	1.3.9	Присутствует

ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации старшего научного сотрудника лаборатории 15.2 – Вычислительной физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Киверина Алексея Дмитриевича** на тему «Нестационарные режимы горения и формирования детонации в газообразных и дисперсных средах». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 (1.3.14) – теплофизика и теоретическая теплотехника. Диссертация выполнена в лаборатории 15.2 – Вычислительной физики ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, jiht.ru).

Официальные оппоненты:

Смирнов Николай Николаевич - гражданин РФ, доктор физико-математических наук, профессор зам. декана Механико-математический факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, тел.: (495)939-12-44, <https://math.msu.ru/>, e-mail: mecmath.msu@inbox.ru)

Минаев Сергей Сергеевич – гражданка РФ, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИПМ ДВО РАН, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7, тел.: (423)231-33-30, <http://www.iam.dvo.ru/> e-mail: minaevss@yahoo.com)

Власенко Владимир Викторович – гражданка РФ, доктор физико-математических наук, заместитель начальника лаборатории Физического и численного моделирования течений с горением Отделения аэродинамики силовых установок Государственного научного центра Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ЦАГИ, 140180, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, 1, тел.: (495)556-43-03, <https://www.tsagi.ru/> e-mail: vlasenko.vv@yandex.ru)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, тел.: (383) 330-42-68, <http://www.itam.nsc.ru>, admin@itam.nsc.ru).

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., профессор Смирнов Н.Н. - очно, д.ф.-м.н. Минаев С.С. и д.ф.-м.н. Власенко В.В. – дистанционно.

СТЕНОГРАММА

Председатель

Кворум у нас есть, поэтому мы переходим к заседанию. Алексей Дмитриевич Киверин представляет свою диссертацию, но сначала мы должны услышать, как обстоят дела со всеми документами, и ченый секретарь нас сейчас с ними ознакомит.

Ученый секретарь

(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ).

Председатель

Спасибо, Михаил Михайлович! Я вопросов не вижу, поэтому давайте перейдем к существу нашего заседания. Алексей Дмитриевич, вам слово, и прошу вас уложиться в то время, которое должно быть.

Есть вопросы какие-нибудь? Требуется уточнения? Если нет, тогда давайте перейдем к существу дела.

Киверин А.Д.

Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Киверина А.Д. прилагается).

Председатель

Спасибо, Алексей Дмитриевич. Пожалуйста, вопросы? По существу работы кто хочет спросить? Пожалуйста...

Вараксин А.Ю.

Алексей Дмитриевич, в докладе не прозвучали уравнения математической модели. Поэтому вопрос сводится к тому, есть ли новизна в этой части? Использовался ли известный подход на уровне уравнений, на уровне замыкающих соотношений, на уровне граничных и начальных условий, есть ли новизна в этой части? Про численную реализацию Георгий Глебович, наверное, спросит.

Киверин А.Д.

На самом деле, здесь ситуация такая, что мы использовали традиционные подходы. То есть это газодинамика сжимаемой вязкой теплопроводной жидкости. Единственное, на тот момент, когда мы эти работы начинали, не так широко использовались детальные кинетические механизмы. В этом плане, это требует как аккуратного расчета диффузионных слагаемых в уравнениях баланса массы, так и расчета уравнения состояния. Здесь мы также использовали достаточно стандартный подход: брали табличные данные для отдельных элементов смеси и далее использовали уравнение состояния смеси совершенных газов. И расчет кинетики... В общем, сейчас определенный охват заняли продукты коммерческие, позволяющие проводить простые кинетические расчеты задачи и также одномерные. И мы используемые в них подходы взяли и имплементировали в наши коды, в наш программный пакет, чтобы получить возможность расчета детальной кинетики. Этот слайд я привел, потому что эти вопросы также возникли и у оппонентов, и у ведущей организации. По граничным условиям здесь использовались также стандартные вещи. То есть, если это были жесткие стенки, то только в отдельных задачах мы использовали проскальзывание потока (чтобы изучить развитие неустойчивости Ландау-Дарье), в большинстве же случаев использовалось прилипание потока к стенкам и использовались либо адиабатические, либо изотермические (в задачах, здесь представленных, мы использовали только такой подход,

хотя у нас реализован также подход с учетом теплопроводности внутри материала стенок). И, соответственно, когда открытый объем или канал с одним открытым концом, то использовалось граничное условие протекания. Новизна здесь, наверное, только в одном. В том, что мы помимо традиционного метода, метода «крупных частиц», который мы взяли в самом начале, мы еще взяли реализацию нового метода «КАБАРЕ», но его авторы также разработали граничные условия, которые нам удалось доработать и имплементировать.

Председатель

Спасибо, Алексей Дмитриевич! Я так понимаю, что Алексей Юрьевич спровоцировал отвечать на многие вопросы, которые последуют еще, но спасибо, это сократит время при ваших ответах на соответствующие замечания Ведущей организации. Есть еще вопросы? Да?

Еремин А.В.

Алексей, я позволю себе задать скорее общефилософский вопрос о развитии детонации и ее параметров. Поскольку ваша команда хорошо известны как одни из основных мировых лидеров и используете детальные кинетические механизмы для анализа развития детонации, вопрос, я думаю, закономерные. Он не прозвучал в докладе, но поскольку я знаю работы Алексея и был рецензентом на предзащите, читал диссертацию, то, собственно, вопрос вот какой. Несколько месяцев назад был довольно представительный семинар в Институте Теплофизики, вы, кстати, в нем тоже участвовали. И там был доклад одного из известных специалистов в мире и у нас в стране Васильева, которые сделал довольно смелое утверждение, что, поскольку кинетика приходит к равновесию только на бесконечности, то понятие точки Жугэ вообще не имеет никакого смысла, а ему возразил Эдуард Евгеньевич Сон, который с этим делом не согласился и предложил позже провести дискуссию по этому поводу. Но Эдуарда Евгеньевича, к сожалению, нет, и я возьму смелость повторить этот вопрос вам. Какова точка зрения, с точки зрения, понимаете, влияния кинетики, которая к равновесию то не приходит, можно ли взять и посчитать теплоту продуктов и определить точку Жугэ? Имеет ли это какой-то физический смысл? Хотелось бы услышать ваше мнение.

Киверин А.Д.

Вы имеете в виду, конкретно возможно ли рассчитать равновесие?

Еремин А.В.

Нет, вы же слышали, что сказал Анатолий Александрович, что точка Жугэ физического смысла не имеет.

Киверин А.Д.

Здесь я не могу с этим согласиться. В данном случае мы опираемся на классическую науку. Там есть вполне определенное значение, которое вытекает из газодинамических представлений о том, что такое детонация. Поэтому, честно говоря, я считаю, что она имеет физический смысл.

Еремин А.В.

То есть вы согласны с Эдуардом Евгеньевичем?

Киверин А.Д.

Да!

Председатель

Спасибо за вопрос и за ответ, особенно.

Киверин А.Д.

Можно я еще добавлю? На самом деле, само развитие детонации – это весьма интересная область. Мы больше здесь фокусировались на процессах, переходных, нестационарных, которые приводят к детонации. А то, как она развивается, мы этим тоже начали интересоваться, но там копий еще больше сломано, но попробуем разобраться в будущем.

Председатель

Спасибо! Еще вопросы, пожалуйста?

Ефремов В.П.

Вопрос у нас такой. На самом деле, вся эта работа нацелена, что на финише вы будете иметь некий датчик. Вы имеете энергонаполненную среду, и на финише вы будете иметь датчик. Это же такая же камера для визуализации излучения, как и многие другие физические приборы. И автор начал в этом направлении работать. То есть можно с помощью энергонасыщенной среды инициировать горение и детонацию, и использовать их в критических диаметрах, в реакторах и так далее.

Председатель

Это утверждение, а не вопрос.

Ефремов В.П.

Это вопрос, так как он не вошел в эту работу.

Председатель

То есть вопрос в том, почему это не вошло в диссертацию.

Ефремов В.П.

Но и без того достаточно много сделано.

Председатель

Хорошо, спасибо! Еще есть вопросы? Нет? Пожалуйста?

Вараксин А.Ю.

Алексей Дмитриевич, поскольку у вас в диссертации, в названии присутствуют дисперсные среды, и глава посвящена, фактически целиком, этому вопросу. В этой физике очень много зависимостей от размера включений, взвешенных частиц (у вас один микромметр фигурирует), от объемной концентрации (там какой-то диапазон указан, то есть вы этот параметр поварьировали). Вопрос сводится к тому, почему вы размер в один микромметр не поварьировали? Из каких соображений? Из каких-то физических предположений? Расскажите!

Киверин А.Д.

Дело в том, как вы правильно отметили, это задача очень многофакторная, и параметров очень много, это и размер частиц, и материал, включая и плотность, и теплоемкость, которые собственно определяют все те эффекты, которые мы показали. На самом деле здесь мы показали только те данные, которые нам показались наиболее референтные и показательные для иллюстрации тех эффектов, которые мы здесь выявили, и иллюстрации тех механизмов, о которых мы говорим. Но несомненно мы проводили расчеты и с другими размерами частиц, просто они не вошли в это обсуждение.

Председатель

Спасибо! Если вопросов больше нет, то я попрошу Михаила Михайловича ознакомить нас с письменными отзывами.

Ученый секретарь

Уважаемые коллеги, в качестве **ведущей организации** выступал **Институт теоретической и прикладной механики имени Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук**. И с вашего позволения, я не буду зачитывать отзыв целиком. Остановлюсь только на большом числе замечаний. Здесь есть и актуальность, и научная новизна работы, и структура и объем диссертации.

Председатель

Я думаю, что возражений по этому вопросу нет.

Ученый секретарь

Зачитаю только замечания и вопросы, которых не мало, 14 замечаний, поэтому сразу прошу прощения за долгий мой монолог.

1. При анализе данных на рисунке 1.2 указано, что наблюдаемые для в плоского и сферического случая количественные отличия, могут оказаться полезными при интерпретации экспериментальных данных. Можно ли такой анализ применить к экспериментам, представленным на рисунке 1.2 и объяснить, таким образом, причины разброса экспериментальных данных?
2. Имеется, на наш взгляд, ряд неудачных формулировок. Например, в пп. 1.4 на странице 27 «... возмущения на поверхности фронта пламени гидродинамически неустойчивы, что определяет развитие гидродинамической неустойчивости фронта пламени ...». На стр. 35 в предложении «Отсутствие наблюдаемого для водородно-воздушного пламени выхода на стационарный режим здесь можно объяснить следующим образом», кажется, речь здесь должна идти о водородно-кислородном пламени? На стр. 87 имеется утверждение «Проведенные трехмерные расчеты ... показали, что для инициирования детонации при меньшем влиянии волны разгрузки требуется вложение меньшей энергии в тот же объем», однако на следующей странице указано, что «... для получения детонации требуется существенное увеличение интенсивности энерговложения» и «величина вкладываемой энергии должна быть на порядок (в 10–12 раз) выше той, что дает экстраполяция результатов одномерной модели». Нет ли противоречия в этих утверждениях? Кроме того, не ясно результаты на рисунке 2.18 – это одномерные или трехмерные расчеты?
3. В третьей главе отсутствуют точные постановки задач, хотя во введении к главе отмечено, что постановки сформулированы диссертантом. Не приведены обоснования или объяснения выбора параметров расчетных задач. Непонятно, при каких температурных условиях на стенках проведены расчеты, результаты которых представлен на рис. 3.5. Нет описания численного алгоритма, расчетных сеток. В разделе 3.3. представлены результаты прямого численного моделирования ламинарно-турбулентного перехода. Однако даже здесь отсутствуют детали сетки, необходимые для понимания того, какие пространственно-временные масштабы течения разрешены в расчетах.
4. Дополнительные исследования и количественные сопоставления необходимы для сравнения механизмов развития неустойчивости пограничного слоя в 3D и 2D случаях (раздел 3.3).
5. На рис. 3.9 приведены хронограммы волн, полученных при моделировании реагирующего течения возникающих в реагирующем течении в одно- и двумерной постановках, которые показывают качественное согласие результатов. При этом двумерные расчеты, по всей видимости, выполнены для условия «холодной» стенки и моделируют развитие пограничного слоя, что, как отмечено в данной главе, оказывает существенное влияние на воспламенение. Но ни тот, ни другой фактор не могут быть

- учтены в одномерных расчетах, однако кривые на рис. 3.9, соответствующие разным постановкам, качественно соответствуют друг другу, что говорит о том, что механизмы воспламенения и в том, и в другом случае одинаковые.
6. Утверждение что разбавленные азотом водород-кислородные смеси имеют меньшую химическую активность, чем разбавленные аргоном (раздел 3.5), нужно обосновать.
 7. В разделе 3.6. для корректного переноса результатов 3D реагирующего течения в круглой трубе на 2D реагирующее течение, логичнее было бы использовать не плоскую, а осевую симметрию.
 8. Отсутствуют сравнения с опытными данными и результатами расчетов других авторов, даже для такой классической задачи, как воспламенение подготовленной смеси за ударной волной. В то же время в обзоре упоминается много расчетных и экспериментальных работ, данные которых могли бы быть использованы для верификации расчетной модели диссертанта, в том числе и работа [XXIII]. Однако сравнения с экспериментом, выполненных при близких условиях, проведены на качественном уровне. Расчеты, как отмечено в подписи к рис. 3.16, проведены при адиабатических тепловых условиях, в то время как в экспериментах, проводимых в ударных трубах, скорее всего, стенка является холодной.
 9. Следует отметить недостаточно полное представление численных результатов динамики нагрева смеси в разделе 4.3. В частности, отсутствуют формулировки начально-краевых задач и конкретные данные о параметрах расчета в представленных на рис. 4.6 – 4.10 результатах, показывающих эволюцию профилей давления и температур смеси.
 10. Отсутствуют сведения о том, частицы какого материала рассматривались в приведенных на рис. 4.4 – 4.11 расчетных данных.
 11. Замечание к терминологии в четвертой главе. Концентрацией частиц принято называть отношение плотности частиц к плотности смеси (а не к плотности газа). Таким образом, массовой концентрацией является величина $\zeta / (1 + \zeta)$, входящая в формулу (4.21).
 12. В четвертой главе не обсуждается вопрос о соотношении между массовой и объемной концентрациями частиц, зависящих от материала частиц. При этом длина свободного пробега излучения зависит от объемной концентрации, а теплообмен с газом – от массовой.
 13. Представление результатов в пятой главе является недостаточно полным. Отсутствуют формулировки начально-краевых задач, конкретные данные о параметрах расчета, детали представленных картин течений. Например, на рис. 5.18, 5.20 не указано, поля каких параметров представлены (шлирен-изображения или градиенты давления), то же относится к двумерным картинам течений на рис. 5.25, 5.31, 5.33, 5.34.
 14. Основной акцент в диссертации делается на феноменологических рассуждениях и качественном анализе процессов. При этом указанные критерии мало где представлены математически или сформулированы в терминах безразмерных параметров.

И дальше я просто обязан зачитать. Указанные замечания, однако, не снижают общей положительной оценки, которую заслуживает диссертация, результаты прекрасно опубликованы, диссертация обсуждена и одобрена, и с учетом всего вышесказанного, считаем, что диссертация представляет собой законченную работу и соответствует всем критериям, а автор заслуживает присуждения ученой степени.

Это был отзыв Ведущей организации, и еще у нас есть **6 отзывов на автореферат**, которые все положительные, но ряд из них имеют ряд замечаний.

Первый отзыв поступил из **Института теплофизики имени Кутателадзе Сибирского отделения Академии наук**, подписан академиком РАН Марковичем Дмитрием Марковичем и заместителем директора по научной работе Шарыповым Олегом Владимировичем. Отзыв положительный, в качестве недостатка автореферата отмечается отсутствие описания используемых математических моделей, кинетических

зависимостей, модели турбулентности, вычислительных алгоритмов (и их тестировании), а также характеристик сеток и анализа сходимости. Кроме того, автореферат не дает в целом представления о количественном соответствии полученных результатов экспериментальным данным. Тем не менее, отзыв положительный, а соискатель заслуживает присуждения искомой степени.

Второй отзыв поступил из **Института тепло- и массообмена имени Лыкова**, подписан академиком **НАН Белоруссии Пенязьковым** и главным научным сотрудником **Сметанниковым**. Отзыв положительный, без замечаний.

Третий отзыв из акционерного общества «**НПО Специальных материалов**», подписан член-корреспондентом **РАН Сильниковым Михаилом Владимировичем**, отзыв положительный, замечание такое: на основе проведенных в работе расчетов могут быть оценены максимально достигаемые нагрузки в процессе перехода к детонации в ограниченном объеме. В качестве замечания стоит отметить отсутствие в автореферате конкретных числовых данных. Тем не менее, отзыв положительный, соискатель заслуживает искомой степени.

Следующий **четвертый отзыв** – это **Институт проблем химической физики РАН**, подписан член-корреспондентом **РАН Минцевым Виктором Борисовичем** и **Султановым Валерием Гулямовичем**. Отзыв положительный, без замечаний.

Пятый отзыв поступил из **Института Гидродинамики имени Лаврентьева Сибирского отделения Академии наук** и подписан **Штерцером Александром Александровичем** и **Ульяницким Владимиром Юрьевичем**. Отзыв положительный, без замечаний.

Наконец, **шестой отзыв** поступил из **Института проблем безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ)**, составлен и подписан доктором физ.-мат. наук **Семеновым**, положительный, с замечаниями:

1. В п. 1.5, где речь идет об ускорении пламени при распространении от закрытого торца канала, ничего не сказано о том, как учитывалось и учитывалось ли вообще взаимодействие газового потока со стенкой канала – при том, что такое взаимодействие важно, поскольку само может быть причиной самоускорения пламени.
2. В п. 3.2, 3.3, где рассматривается воспламенение за ударной волной в ударной трубе, течение должно характеризоваться большими числами Рейнольдса, что способствует быстрой турбулизации пограничного слоя. Из текста реферата не ясно, какие использовались модели турбулентности и использовались ли вообще. Непонятно также, какую роль играют одномерные расчеты, когда суть явления – 3D очаги воспламенения.
3. Во многих местах в тексте автореферата упоминается об экспериментах по исследованию обсуждаемых явлений, но отсутствуют литературные ссылки.

Тем не менее, отзыв положительный, соискатель заслуживает присуждения искомой степени.

Председатель

Спасибо, Михаил Михайлович!

Алексей Дмитриевич, пожалуйста, замечаний по количеству много, но очень многие из них перекликаются, и на часть из них вы уже ответили. Пожалуйста.

Киверин А.Д.

Собственно, я подготовил слайды для ответа на вопросы. Конечно коллеги из Ведущей организации и многие рецензенты автореферата отметили большой кусок исследований, который, просто напросто, необходим для нашей работы, но не вошел в саму диссертацию, так как диссертация была посвящена уже использованию этих методик, но, тем не менее, о модели и о граничных условиях я уже рассказал немного, отвечая на вопрос Алексея Юрьевича. Также я упомянул, что мы использовали два основных

расчетных метода. Это метод, эйлерово-лагранжев, так называемый, или он еще также называется «метод крупных частиц» и метод «КАБАРЕ», современный бездиссипативный метод. И, разумеется, проводя верификацию и валидацию наших расчетных методик и кодов мы проводили довольно обширные расчеты (прежде, чем приступить к расчетам, которые пошли у нас на результат) по нормальной скорости горения; по ширине фронта пламени; по зависимости этих параметров от температуры и давления; по критической длине градиента температуры, отвечающему за инициирование детонации (это для задачи об инициировании детонации локализованными источниками энергии); по критической ширине пограничного слоя (это в задаче о развитии волн Толлмина-Шлихтинга в ударной трубе); по критической длине волны неустойчивости Ландау-Дарье; по длине и времени перехода в детонацию в открытых объемах. Использовали здесь мы классическую традиционную процедуру Ричардсона для оценки критического значения, к которому сходится решение и степени сходимости. Далее мы выбирали сетку для каждой задачи индивидуально. Здесь показан ряд результатов тестовых расчетов. Здесь показано сравнение с экспериментами по нормальной скорости горения. Здесь сходимость для двух методик для нормальной скорости горения. Здесь по инициированию детонации.

Председатель

Извините, Алексей Дмитриевич, это то, чего нет в диссертации?

Киверин А.Д.

Этого в диссертации нет, потому что это отдельная большая работа, больше техническая, и в погоне за лаконичностью ее в диссертацию я не включил.

Председатель

То есть рецензенты этого не видели?

Киверин А.Д.

Да, но все это было проделано. Это стандартные процедуры, которые были проделаны и в наших работах освещены.

Также имеются вопросы по количественным данным. Разумеется, здесь мы тоже работали, начиная с того, что в первых работах наших мы рассматривали одну конкретную смесь и рассчитывали все данные, характерные для стационарных процессов, для переходных процессов, таких как пересжатая детонация, и сравнивали их с экспериментом, так как эта информация была доступна. Мы также сравнивали данные по нормальной скорости горения. Что касается инициирования воспламенения в ударных трубах, мы здесь также провели такое сопоставление. Оно, к сожалению, в диссертацию не вошло, так как этот результат был получен несколько позже, но, тем не менее, здесь показан разброс экспериментальных данных. А здесь он таким же серым цветом показан, и мы показали, что те механизмы, которые мы предложили, довольно хорошо укладываются как раз в этот диапазон и описывают эти экспериментальные точки. Количественное согласие по переходу в детонацию я показывал. И также мы отмечали в отдельной задаче о переходе в детонацию в работе Розловского и Зельдовича, где время перехода порядка 100 микросекунд и дистанция перехода порядка двух сантиметров. Это неплохо соотносится с нашими данными с учетом того, что мы рассматривали двухмерную задачу, то есть не сферическое а цилиндрическое пламя.

Касательно вопросов по моделям турбулентности. Мы модели турбулентности никакие не использовали сторонние, так как мы проводили наши расчеты на довольно подробных сетках. В том числе эта картинка, которую я показывал, иллюстрирует формирование волн Толлмина-Шлихтинга и дальнейшее усложнение течения и, в конце концов, переход к турбулентности и показывает, что этот процесс мы улавливаем с одной стороны. А с другой стороны в тех задачах, которые мы решали переход к турбулентности

не успевал произойти в полной мере, по крайней мере, так как характерное время турбулизации потока было намного больше, чем те времена, которые мы исследовали. В частности, этот эффект в своей работе 1947 года отмечал Зельдович, критикуя несколько те работ, которые тогда были основными (это были работы Щелкина) по переходу горения в детонацию, где утверждалось, что турбулентность – есть основной механизм перехода горения в детонацию. Зельдович же показал, что это не так. Конечно же турбулентность оказывает свое влияние, но если бы турбулизации не было, а в активных смесях мы показали, что так оно и есть (она не успевает произойти), тем не менее механизм перехода к детонации должен работать.

Интересный вопрос, который самым первым сформулировала Ведущая организация, касался замечания к этому рисунку, который по большому счету мы использовали только для верификации наших кодов и приводили расчеты на фоне экспериментальных точек. И показали, что, решая плоскую задачу и сферически симметричную, мы можем получать некий разброс, и также разброс наблюдается в экспериментах. Используются либо плоские пламена на горелках, либо сферические расходящиеся пламена. На самом деле, это для нас очень актуальный вопрос и актуальный вопрос для всего сообщества. Мы эти работы инициировали, также задавшись этим вопросом, и сейчас у нас выходит уже первая работа на эту тему, где мы исследуем развитие неустойчивости фронта пламени и показываем, за счет чего у нас могут не согласованными быть кинетические расчеты нормальной скорости горения и те экспериментальные данные, которые получены в результате обработки экспериментальных картин течения. Это действительно очень интересный и актуальный вопрос, которым мы занимаемся, и я думаю, что мы добьемся здесь успеха, а это, к слову, станет основой для того, что нам видится важной задачей, - задачи создания подсеточных моделей для инженерных расчетов, в том числе для турбулентного горения, что будет весьма полезно.

Еще Ведущая организация сделала несколько замечаний по поводу расчетов эволюции пограничного слоя. В частности, одно касалось того, что сопоставление трехмерных и двухмерных расчетов, особенно со столь сложной структурой, требует дополнительного изучения. Это действительно так, но мы остановились, как я сказал в своем докладе, на той области, где происходит генерация роликовых вихрей, но еще нет их трехмерной деформации, потому что именно эта область важна для процессов которые мы рассматривали, а именно, инициирования воспламенения. Поэтому в этой области я считаю, что мы довольно убедительно показываем согласие трехмерных и двухмерных расчетов. В дальнейшей области, конечно, это неверно, и если мы будем решать задачу, где важна эта область, то, к сожалению, здесь нам уже без трехмерных расчетов не обойтись. И замечание, которое сделали авторы отзыва Ведущей организации касательно того, что более близкой к реальной ситуации являются осесимметричные расчеты, если мы берем двухмерные расчеты. Я с этим согласен, тем более, что мы похожее исследование проводили. Но, на самом деле, здесь можно видеть, что все точки лежат довольно близко, и, в принципе, в двухмерных расчетах мы получаем те же режимы, на которых мы основывались для формулирования механизма. Довольно близкие результаты получены в трехмерных и осесимметричных расчетах, полученных для цилиндрических труб.

Здесь был вопрос с одной стороны от Ведущей организации. Они указали на то, что механизм инициирования горения по-видимому один и тот же, что в одномерных расчетах (штриховой линией показаны), то и в двухмерных (показаны красной линией). И это действительно так, потому что механизм воспламенения один и тот же. Другой вопрос, что само воспламенение в результате того, что в двухмерном случае у нас имеет место неоднородность температуры, происходит многоочаговым образом. И в этом, собственно, и есть отличие. Более того, само инициирование происходит в области взаимодействия контактного разрыва с пограничным слоем. Как можно видеть, в ядре потока (здесь внизу стенка, а наверху ось симметрии) пока реакция не началась. В одномерном случае вдоль

всего контактного разрыва происходит инициирование горения. Отвечая же на вопрос Владимира Николаевича Семенова из ИБРАЭ, с какой целью вообще проводились одномерные расчеты, отвечаю, что они проводились для сопоставления с двухмерными и для подчеркивания локализации очагового воспламенения.

Вопрос довольно интересный от Ведущей организации касается активности смесей, разбавленных аргоном и азотом. Действительно, у них есть работа, в которой они анализировали экспериментальные данные и свои расчеты по задержкам воспламенения, и было показано, что в том диапазоне, котором они работали, действительно есть некая немонотонность. Где-то первой зажигается смесь с азотом, где-то с аргоном. Но в нашем диапазоне... Собственно для чего эта фраза была туда введена – только для иллюстрации этой картины, где в аргоном разбавленной смеси детонация с используемым разрешением (расчетное разрешение я имею в виду) фактически плоская, а в случае разбавления азотом у нас получилась довольно сложная структура, в которой существует локальное затухание реакции, то есть это некая предтеча развития общеизвестной ячеистой структуры детонации. Это, собственно, отражает активность смеси, то, что в этом случае она получается менее активна, и детонация более неустойчива. С другой стороны, есть работы, в которых рассматривается также разбавление аргоном, в том числе для нужд интенсификации горения в двигателях внутреннего сгорания. И там условия близкие к нашим, и там действительно аргон обеспечивает более активную смесь. Например, здесь смесь с аргоном показана красным, а по наклону роста давления как раз определяется интенсивность горения, и в красном случае он более острым оказывается, чем в синем. Таким образом разбавление аргоном более интенсивное горение обеспечивает, чем разбавление азотом.

Довольно важный вопрос по параметрам (Алексей Юрьевич его тоже коснулся) – действительно, формулируя некие механизмы, мы должны использовать наиболее наглядные его иллюстрации. Конечно, мы проводили расчеты и для других параметров. Но для того, чтобы как-то зафиксировать систему координат, когда мы говорим об этих механизмах, мы, конечно, ограничиваемся рассмотрением частиц только заданного диаметра, заданной теплоемкости, заданной плотности материала. И варьировали мы в первую очередь объемную концентрацию, что обеспечивало нам изменение одного из основных интересных для нас параметров – длины пробега излучения в такой дисперсной среде. И было еще такое замечание по определению массовой концентрации частиц. И действительно здесь есть некая оплошность, но в диапазоне параметров, в котором мы работаем, это довольно близкие величины – то, как мы ее определяли, и то, как определяют наши коллеги. И это на основные результаты никак не повлияло, но я согласен, что здесь допущена мною некая небрежность.

Касательно же математического представления или безразмерного вида критериев. Как, возможно, было понятно из моего доклада, мы здесь работаем с очень сложными системами, которые включают в себя и газодинамику, и более сложные, чем идеальный газ, уравнения состояния, и химическую кинетику, поэтому здесь довольно сложно говорить о каком-то простом критериальном представлении, но одно из них – это скорость звука в продуктах горения, а также скорость нормального горения. Это основные масштабные величины, которые мы здесь использовали, а более стройной именно аналитической теории здесь, к сожалению, нет.

Были вопросы также по опечаткам. Да, к сожалению, они присутствуют, и в том числе в ключевых моментах. Здесь представлено уравнение для скорости химической реакции...

Председатель

Алексей Дмитриевич, как я понимаю, Смирнов – это официальный оппонент, а мы его еще не заслушали.

Киверин А.Д.

Прошу прощения, здесь еще есть ответы на замечания Ведущей организации.

Действительно некоторые рисунки, может быть, не полностью описаны. Это действительно численный шпирен. И здесь вы тоже видите не трехмерные, а одномерные сферически симметричные расчеты.

Также был вопрос по косноязычным формулировкам. К сожалению, они имеют место, но хорошо, что их не так много. Прошу прощения.

Председатель

По-видимому, вы благодарны за эти замечания?

Киверин А.Д.

Да!

Председатель

Хорошо, спасибо, Алексей Дмитриевич!

Николай Николаевич, тогда прошу вас, тогда вам слово!

Смирнов Н.Н.

(Выступление оппонента не стенографируется, отзыв оппонента приложен в аттестационном деле.)

Председатель

Спасибо, Николай Николаевич!

Мы должны теперь перейти к заслушиванию мнения еще двух оппонентов. Алексей Дмитриевич, при ответе про рисунки не надо, про цвета линий...

Киверин А.Д.

Про рисунки я не буду, а вот интересный вопрос касательно скорости Чепмена-Жугэ. Действительно, там несколько далеко постановка задачи от этой картинки, но здесь смесь использовалась сильно разбавленная аргоном, и детонация происходила на фоне уже ударно-сжатого газа, и расчет скорости Чепмена-Жугэ для таких условий, действительно, полторы тысячи метров в секунду, но это все-таки водород-кислород.

И касательно схем вопрос тоже довольно интересный. Потому что мы такое исследование совместно с коллегами из Института Химической физики проводили, и все механизмы, которые у нас были, учитывали такой перескок от механизма, реализуемого при низких давлениях, к механизму, реализуемому при высоких давлениях. Может быть, здесь речь идет о том, что при более высоких температурах, которые реализуются как раз за ударной волной, или наоборот при более низких температурах такое вы могли наблюдать в каком-то определенном диапазоне, но в целом оно должно отвечать представленной зависимости.

Председатель

Спасибо, Алексей Дмитриевич!

У нас есть еще два оппонента. Предоставим слово по очереди, тогда Сергей Сергеевич Минаев.

Минаев С.С.

(Выступление оппонента не стенографируется, отзыв оппонента приложен в аттестационном деле.)

Председатель

Спасибо, Сергей Сергеевич! Мы вас услышали и даже увидели в конце концов. Пожалуйста, Алексей Дмитриевич, если вы можете ответить? Давайте это сделаем так,

чтобы Сергей Сергеевич тоже смог вас увидеть.

Киверин А.Д.

Сергей Сергеевич, спасибо большое за положительную оценку! Как я и говорил, рассказывая материалы первой главы диссертации, мы к выбору методики расчетной, которая достаточно хорошо бы переваривала различные эффекты, подходили довольно скрупулезно. В том числе, одним из толчков была наша работа совместно со Снежинском. Здесь я привел полученные ими картины течений, довольно стандартные – в вертикальной трубе пламя инициируется искрой и далее расширяется. При этом на поверхности пламени развивается неустойчивость. Так вот, когда мы пытались такую задачу посчитать доступными тогда для нас методами, типа метода «крупных частиц», то мы получили довольно большое расхождение. И в первую очередь, что бросалось в глаза, пламя у нас довольно неизотропно расширяется на той стадии, когда в эксперименте, казалось бы, оно расширяется изотропно. И даже попытки трехмерного моделирования, также не увенчались успехом. Здесь снизу показано по верхней точке на фронте, как распространяется пламя, и штриховая линия – это эксперимент, а штрих-пунктирная – расчеты по методу «крупных частиц». И тогда мы, как это написано в диссертации, провели дополнительное вычислительный эксперимент, просто напросто смоделировав частичное поглощение акустических волн, и получили улучшение ситуации, по крайней мере изменение ситуации. Это привело нас к выводу, что, действительно, необходимо использовать какие-то низкодиссипативные схемы для того, чтобы поле возмущений не «съедалось» схемной вязкостью, и все эти эффекты, которые собственно и определяют изотропное распространение пламени здесь разрешаются.

Касательно математической модели и сеток я уже сказал ранее.

Что касается третьего замечания, спасибо большое, это довольно полезное замечание. Я думаю, что наши расчеты как-то должны повлиять на улучшение ситуации. Возможно, их использование позволит так модифицировать, изменить представления, построить новую модель, которая позволила описывать ситуацию лучше, чем модель Сивашинского.

Председатель

Спасибо!

Мы можем теперь вернуться к участникам онлайн, поскольку я уже видел Владимира Викторовича Власенко. Добрый день! Мы вас слушаем.

Власенко В.В.

(Выступление оппонента не стенографируется, отзыв оппонента приложен в аттестационном деле.)

Председатель

Спасибо, Владимир Викторович!

Алексей Дмитриевич, вообще-то по существу я уже услышал ответы на те замечания, которые мы сейчас от Владимира Викторовича услышали. Так что, если вы хотите что-то добавить, то пожалуйста, но, наверное, нужно очень коротко, потому что, на самом деле, относительно сеток и подсеток вы уже рассказывали. По поводу турбулентности вы согласны, и мы уже этот вопрос обсуждали.

Киверин А.Д.

Не прозвучал только ответ на третий вопрос про учет теплообмена. На самом деле, мы это тоже проходили. Я взял два рисунка из своей кандидатской диссертации. Мы эти эффекты также исследовали, но именно для самой стадии перехода к детонации они оказались не столь существенны. То есть они действительно предотвращают ускорение пламени, но если мы возьмем достаточно широкую трубу, то пламя ускорится и будет переходить в

детонацию, и эти эффекты не такую важную роль играют, поэтому на этом этапе, в тех работах, которые вошли в докторскую диссертацию, мы это исключили из рассмотрения. А так, методика есть, и все работает.

Председатель

Спасибо, Алексей Дмитриевич!
Мы переходим тогда к дискуссии.

Еремин А.В.

Как я уже говорил, я достаточно долго слежу за работами Алексея и ответственно могу сказать, что работы эти имеют мировое признание и занимают очень серьезное место в развитии теории детонации. Сегодня уже достаточно много позитивных слов звучало. Я же хочу отметить вклад этих работ в более внимательный учет кинетики. Конечно, учет этих явлений во многом ограничивается возможностями компьютерной техники, но поскольку это все развивается, то потенциал учета этих явлений у этой группы тоже может быть приоритетный в мире. И я вижу, что эти работы не только сейчас имеют большой вклад, но и имеют большой потенциал развития. Поэтому я считаю, что мы конечно же должны поддержать эту работу и пожелать дальнейших успехов Алексею и всей его команде. Призываю диссертационный совет проголосовать за.

Председатель

Спасибо!
Генри Эдгарович? Пожалуйста.

Норман Г.Э.

Что касается содержания работ, здесь несколько раз прозвучало, что хоть эти работы расчетные, но основное внимание уделено физическим эффектам. Я считаю это важным достоинством. Что касается личности Алексея, я его наблюдаю уже более десяти лет на эльбрусских конференциях, видел, как он мужает, как растет его статус, как увеличивается растительность на лице. И поэтому у меня пожелание такое, с растительностью остановиться, а научный рост продолжать.

Председатель

Спасибо, Генри Эдгарович!
Еще есть кто-нибудь, кто хочет выступить, или представляется вопрос достаточно ясным?

Норман Г.Э.

Конечно, за!

Председатель

Мы догадались!

Апфельбаум Е.М.

Можно сделать комментарий? Десять лет назад, когда Алексей был еще на предзащите кандидатской, после этого Владимир Евгеньевич вызвал Иванова (а я был рядом, поэтому все это слышал) и сказал, а давайте вместо кандидатской сразу защитим докторскую.

Председатель

Вот и не прошло и десяти лет, как мы вернулись к этому вопросу. Спасибо!
Пожалуйста, только коротко!

Ефремов В.П.

На все вопросы, которые задали, он ответил, и если бы задали другие вопросы, то он бы

тоже на них ответил. Ну а кинетика действительно важна, она немножко уточняет ситуацию, она и совершенствуется со временем.

Председатель

Спасибо, Владимир Петрович!

Я считаю, что ситуация достаточно ясная, поэтому мы можем перейти к нашему волеизъявлению, которое по той же схеме произойдет. Михаил Михайлович попросит собрать все сведения. Те, кто присутствует, пожалуйста в бумажном виде оформите и положите Михаилу Михайловичу. Через некоторое время мы подведем итоги.

(Проводится процедура тайного голосования).

Председатель

Внимание! Михаил Михайлович готов. Слушаем результаты голосования.

Ученый секретарь

Уважаемые коллеги! У нас на защите очно присутствовало **15** членов диссертационного совета, из них докторов по профилю – **6** человек, присутствовало на защите онлайн **6** человек, из них докторов по профилю диссертации – **5** человек. Итого **21** член диссертационного совета. Проголосовало – **21** членов диссертационного совета.

за – 21, против – нет, воздержавшихся – нет.

Председатель

Спасибо! Мы должны утвердить. Кто за? *(Протокол счетной комиссии утвержден единогласно).*

Алексей Дмитриевич, мы вас поздравляем! И я лишил вас заключительного слова. Вы можете сейчас воспользоваться этой возможностью.

Киверин А.Д.

В первую очередь я хочу поблагодарить председателя и членов диссертационного совета, которые заслушали сегодня диссертацию и приняли положительное заключение. Хочу поблагодарить уважаемых оппонентов и коллег из Ведущей организации, которые очень подробно ознакомились с диссертацией и высказали, в том числе, ряд интересных и полезных замечаний, которые мы учтем на будущее. Хочу поблагодарить своих коллег и сотрудников моей лаборатории, без которых ряда работ просто не было бы, поблагодарить свою семью, особенно маму и жену, которые эти почти 20 лет моей научной деятельности разделили примерно поровну и поддерживали мой тыл. И, конечно, хотелось бы очень вспомнить добрыми словами моего учителя Михаила Федоровича Иванова, которому бы ровно через две недели исполнилось бы 76 лет (следующее ваше заседание – это будет как раз день его рождения). Спасибо большое!

Председатель

Спасибо!

Мы должны принять решение по проекту заключения.

(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения).

У меня есть предложение принять с теми замечаниями, что мы услышали. С такими поправками давайте примем проект заключения!

(Проект заключения принят единогласно)

И на этом процедура официальная закончилась!

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.02 (24.1.193.01),
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 15.09.2021г. № 12

О присуждении Киверину Алексею Дмитриевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Нестационарные режимы горения и формирования детонации в газообразных и дисперсных средах» по специальности 01.04.14 (1.3.14) - теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 10.06.2021г., (протокол заседания № 10) диссертационным советом Д 002.110.02 (24.1.193.01), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012г.

Соискатель Киверин Алексей Дмитриевич 1985 года рождения, в 2008 году окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана".

В 2011 году защитил диссертацию на тему "Исследование нестационарных процессов горения газообразных горючих смесей в каналах" на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 (1.3.14) - теплофизика и теоретическая теплотехника.

Работает в должности старшего научного сотрудника лаборатории № 15.2 – Вычислительной физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории № 15.2 Вычислительной физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, Механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» Смирнов Николай Николаевич;

- доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук Минаев Сергей Сергеевич;

- доктор физико-математических наук, заместитель начальника лаборатории Физического и численного моделирования течений с горением Отделения аэродинамики силовых установок Государственного научного центра Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» Власенко Владимир Викторович.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск) в своем положительном заключении, составленном сотрудниками лаборатории №12 "Волновых процессов", заведующим лабораторией к.ф.-м.н. Бедаревым И.А., в.н.с. д.ф.-м.н. Федоровой Н.Н. и в.н.с. д.ф.-м.н. Хмель Т.А. (утвержденном 20.08.2021г. и.о. директора Краус Е.И.) указала, что научная значимость работы обусловлена выявлением новых возможных режимов перехода горения в детонацию. Исследования, выполненные диссертантом, помогут

фундаментальному обоснованию пределов горения и детонации, а также корректной интерпретации экспериментальных исследований в этой области знаний. Практически результаты работы могут быть использованы, как в организациях занимающихся вопросами взрыво- и пожаробезопасности и использования водорода в качестве альтернативного источника энергии, так и в исследовательских группах институтов Академии наук, изучающих явление детонации.

Всего работ в реферируемых изданиях – 106, по теме диссертации – 37 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК, 35 из которых индексируются в международных системах Web of Science и Scopus:

1. Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Гальбурт В.А. Об одном способе ускорения перехода от дефлаграции к детонации в газообразных горючих смесях // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. т. 4. с. 38-45.
2. Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Гальбурт В.А. Численное моделирование ускорения пламени путем дополнительного энергообложения перед фронтом горения // Хим. Физика. 2009. т. 28, № 5. с. 35-39.
3. Иванов М.Ф., Киверин А.Д. Влияние состава горючей смеси на развитие неустойчивости фронта пламени // Хим.Физика. 2010. т. 29, № 2. с. 48-54.
4. Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Рыков Ю.В. Особенности распространения пламени в замкнутых объемах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. т. 1. с. 21-39.
5. Голуб В.В., Бакланов Д.И., Головастов С.В., Иванов К.В., Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Володин В.В. Воздействие акустического поля на развитие пламени и переход в детонацию // ТВТ. 2010. т. 48, № 6. с. 901-907.
6. Ivanov M. F., Kiverin A. D., Yakovenko I. S. The role of compression waves in flame acceleration and transition to detonation inside confined volumes // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. Vol. 653. P. 012062.
7. Kiverin A. D., Yakovenko I. S. Modes of choked flame instability defined by the peculiarities of combustion kinetics at rising pressure // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. Vol. 653. P. 012061.
8. Kiverin A. D., Yakovenko I. S., Ivanov M. F. On the structure and stability of supersonic hydrogen flames in channels // Int. J. Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41. P. 22465–22478.
9. Bykov V., Kiverin A., Koksharov A., Yakovenko I. Analysis of transient combustion with the use of contemporary CFD techniques // Comp. Fluids. 2019. Vol. 194. P. 104310.
10. Liberman M. A., Kiverin A. D., Ivanov M. F. On detonation initiation by a temperature gradient for a detailed chemical reaction models // Physics Letters A. 2011. V. 375. №. 17. P. 1803-1808
11. Liberman M. A., Kiverin A. D., Ivanov M. F. Regimes of chemical reaction waves initiated by nonuniform initial conditions for detailed chemical reaction models //Physical review E. 2012. V. 85. №. 5. 056312
12. Kiverin A. D., Kassooy D. R., Ivanov M. F., Liberman M. A. Mechanisms of ignition by transient energy deposition: Regimes of combustion wave propagation //Physical Review E. 2013. V. 87. №. 3. 033015
13. Иванов М. Ф., Киверин А. Д., КлуMOV Б. А., ФортOV В. Е. От горения и детонации к окислам азота // УФН. 2014. 184. С. 247–264
14. Kiverin A.D., Yakovenko I.S. Ignition and detonation onset behind incident shock wave in the shock tube // Combustion and Flame (2019) 204:227–236
15. Kiverin A., Minaev K., Yakovenko I. Modes of mild ignition in shock tubes: origins and classification // Combustion and Flame (2020) 221:420-428
16. Kiverin A., Yakovenko I. On the mechanism of flow evolution in shocktube experiments // Phys. Lett. A. (2018) 382(5):309
17. Kiverin A.D., Yakovenko I.S. Evolution of wave patterns and temperature field in shocktube flow // Phys. Rev. Fluids. (2018) 3:053201.
18. Киверин А., Минаев К., Яковенко И. Два механизма очагового воспламенения в ударных трубах // Химическая Физика (2020) 39(8):16-20

19. Drakon A.V., Kiverin A.D., Yakovenko I.S. Temperature perturbations evolution as a possible mechanism of exothermal reaction kernels formation in shock tubes // J. Phys.: Conf. Series (2016) 774:012092
20. Efremov V. P., Ivanov M. F., Kiverin A. D., Yakovenko I. S. Mechanisms of direct detonation initiation via thermal explosion of radiatively heated gasparticles layer // Results in Physics. 2015. V. 5. P. 290-296
21. Иванов М. Ф., Киверин А. Д., Либерман М. А. Влияние поглощения излучения микрочастицами на скорость пламени и режимы горения // ЖЭТФ. 2015. Т. 148. №. 1. С. 190.
22. Ivanov M. F., Kiverin A. D., Liberman M. A. Ignition of deflagration and detonation ahead of the flame due to radiative preheating of suspended micro particles // Combustion and Flame. 2015. Т. 162. №. 10. P. 3612-3621
23. Иванов М. Ф., Киверин А. Д., Пиневиц С. Г. Аномальное распространение пламени в горючих газовзвесьях // Вестник МГТУ им. НЭ Баумана. 2015. №5 (62)
24. Ефремов В.П., Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Яковенко И.С. Объемное инициирование газовой детонации путем лучистого нагрева взвешенных в газе микрочастиц // Письма ЖТФ. 2016 Т. 42 Вып. 4 С. 52-59
25. Ivanov M. F., Kiverin A. D. On the formation of new ignition kernels in the chemically active dispersed mixtures // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 653. №. 1. 012060
26. Efremov, V. P., Ivanov, M. F., Kiverin, A. D., Yakovenko, I. S. Direct initiation of gaseous detonation via radiative heating of microparticles volumetrically suspended in the gas // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 653. №. 1. 012063
27. Kiverin A. D., Yakovenko I. S. Estimation of critical conditions for deflagrationtodetonation transition in obstructed channels filled with gaseous mixtures // Mathematical Modelling of Natural Phenomena. 2018. V. 13. №. 6. P. 54
28. Kiverin A. D., Yakovenko I. S. Regimes of High Speed Hydrogen Flame Propagation in Channels: Classification and Criteria of Realization // Combustion Science and Technology. 2020. V. 192. №. 1. P. 112-129
29. Kiverin A. D., Yakovenko I. S., Ivanov M. F. On the mechanisms and criteria of deflagrationtodetonation transition in gases // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 754. №. 5. 052002
30. Киверин А. Д., Яковенко И. С., Иванов М. Ф. Режимы сверхзвукового распространения пламени в канале и критерии их реализации // Горение и взрыв 2017. т. 10, № 4. с. 17-22.
31. Ivanov M. F., Kiverin A. D., Galburt V. A. A computational study of the external shockwave impact on the combustion regime // Combust. Sci. Tech. 2010. V. 182. №. 11-12. P. 1683-1692
32. А. Киверин, И. Яковенко Высокоскоростные режимы распространения пламени в канале и переход к детонации // ТВТ (2020) 58(4): 707-716
33. А. Киверин, А. Смыгалина, И. Яковенко Классификация сценариев развития быстрых волн горения и перехода горения в детонацию в каналах // Химическая Физика (2020) 39(8): 9-15
34. Иванов М. Ф., Киверин А. Д. О генерации высоких давлений при взаимодействии пламени с ударными волнами // ТВТ 2015. Т. 53. №. 5. С. 703-712
35. Киверин А.Д., Яковенко И.С., Фортов В.Е. Механизм формирования детонации при свободном распространении пламени в неограниченном пространстве // Доклады Академии наук. 2019. Т. 489. №. 5. С. 461-464
36. Kiverin A., Yakovenko I. Mechanism of Transition to Detonation in Unconfined Volumes // Acta Astronautica. 2020 176:647-652
37. Киверин А. Д., Яковенко И. С. Переход к детонации в свободно распространяющихся пламенах // Горение и взрыв. 2020. 13(1): 47-54

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук**

(директор, академик РАН, д.ф.-м.н., проф. Маркович Д.М. и зам. директора по научной работе, д.ф.-м.н. Шарыпов О.В.) – отзыв положительный, с замечанием:

– В качестве недостатка автореферата следует отметить отсутствие описания используемых математических моделей, кинетических зависимостей, модели турбулентности, вычислительных алгоритмов (и их тестировании), а также характеристик сеток и анализа сходимости. Кроме того, автореферат не дает в целом представления о количественном соответствии полученных результатов экспериментальным данным.

2. **Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси** (директор, академик НАН Беларуси, д.ф.-м.н. Пенязков О.Г. и г.н.с., д.ф.-м.н. Сметанников А.С.) – отзыв положительный, без замечаний.

3. **Акционерное общество «Научно-производственное объединение Специальных материалов»** (генеральный директор – генеральный конструктор, член.-корр. РАН, академик РАН, д.т.н., проф. Сильников М.В.) – отзыв положительный, с замечанием:

– В качестве замечания, однако, стоит отметить отсутствие в автореферате конкретных числовых данных.

4. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики Российской академии наук** (зав. лаб., член-корр. РАН, д.ф.-м.н. Минцев В.Б. и зав. лаб., д.ф.-м.н. Султанов В.Г.) – отзыв положительный, без замечаний.

5. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук** (в.н.с., д.ф.-м.н. Штерцер А.А. и г.н.с., д.т.н. Ульяницкий В.Ю.) – отзыв положительный, без замечаний.

6. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук** (зам. зав. отделением, д.ф.-м.н. Семенов В.Н.) – отзыв положительный, с замечаниями:

– В п. 1.5, где речь идет об ускорении пламени при распространении от закрытого торца канала, ничего не сказано о том, как учитывалось и учитывалось ли вообще взаимодействие газового потока со стенкой канала – при том, что такое взаимодействие важно, поскольку само может быть причиной самоускорения пламени;

– В п. 3.2, 3.3, где рассматривается воспламенение за ударной волной в ударной трубе, течение должно характеризоваться большими числами Рейнольдса, что способствует быстрой турбулизации погранслоя. Из текста реферата не ясно, какие использовались модели турбулентности и использовались ли вообще. Непонятно также, какую роль играют одномерные расчеты, когда суть явления – 3D очаги воспламенения;

– Во многих местах в тексте автореферата упоминается об экспериментах по исследованию обсуждаемых явлений, но отсутствуют литературные ссылки.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- д.ф.-м.н., профессор Смирнов Николай Николаевич является ведущим специалистом в области физики горения и взрыва газообразных и дисперсных сред, а также крупным специалистом в области численного моделирования сложных газодинамических течений с учетом химических реакций горения.

1. Smirnov, N. N., Penyazkov, O. G., Sevrouk, K. L., Nikitin, V. F., Stamov, L. I., Tyurenkova, V. V. (2017). Detonation onset following shock wave focusing.// Acta Astronautica, 135, 114-130.

2. Smirnov, N. N., Nikitin, V. F., Stamov, L. I., Mikhalchenko, E. V., Tyurenkova, V. V. (2018). Rotating detonation in a ramjet engine three-dimensional modeling.// Aerospace Science and Technology, 81, 213-224.

3. Betelin, V. B., Kryzhanovsky, B. V., Smirnov, N. N., Nikitin, V. F., Karandashev, I. M., Malsagov, M. Y., Mikhalchenko, E. V. (2021). Neural network approach to solve gas dynamics problems with chemical transformations.// Acta Astronautica, 180, 58-65.

- д.ф.-м.н., Минаев Сергей Сергеевич является признанным специалистом в области нестационарного горения и развития неустойчивости пламени, в том числе при горении

газообразных и дисперсных сред в каналах.

1. Mokrin, S. N., Odintsov, E. S., Uriupin, G. V., Tezuka, T., Minaev, S. S., Maruta, K. (2017). Flammability limit of moderate-and low-stretched premixed flames stabilized in planar channel.// *Combustion and Flame*, 185, 261-264.

2. Fursenko, R., Mokrin, S., Minaev, S. (2019). Stationary combustion regimes and extinction limits of one-dimensional stretched premixed flames in a gap between two heat conducting plates.// *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(2), 1655-1661.

3. Miroshnichenko, T., Gubernov, V., Minaev, S. (2020). Hydrodynamic instability of premixed flame propagating in narrow planar channel in the presence of gas flow.// *Combustion Theory and Modelling*, 24(2), 362-375.

- д.ф.-м.н., Власенко Владимир Викторович является высококвалифицированным и признанным специалистом в области численного моделирования газодинамических течений в реагирующих средах, включая численное моделирование горения в потоке и детонации.

1. Sabelnikov, V. A., Vlasenko, V. V. (2018). Combustion in supersonic flows and scramjet combustion simulation.// *Modeling and Simulation of Turbulent Combustion* (pp. 585-660). Springer, Singapore.

2. Ivankin, M., Nikolaev, A., Sabelnikov, V., Shiryayeva, A., Talyzin, V., Vlasenko, V. (2019). Complex numerical-experimental investigations of combustion in model high-speed combustor ducts.// *Acta Astronautica*, 158, 425-437.

3. Vlasenko, V. V., Sabelnikov, V. A., Molev, S. S., Voloshchenko, O. V., Ivankin, M. A., Frolov, S. M. (2020). Transient combustion phenomena in high-speed flows in ducts.// *Shock Waves*, 30(3), 245-261.

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук является профильной организацией, специализирующейся на проведении исследований в областях аэрогазодинамики, математического моделирования в механике и физико-химической механике. В организации ведутся систематические экспериментальные и расчетно-теоретические исследования динамических процессов в реагирующих газах и дисперсных средах. В частности, в лаборатории №12 "Волновых процессов" разрабатываются физико-математические модели механики гетерогенных, гомогенных, инертных, реагирующих сред микро и нано- структуры, проводится математическое моделирование детальных и приведенных кинетических механизмов в реагирующих газах, а также физико-математическое моделирование гетерогенной детонации в аэрозвесах микро- и наноструктуры, в том числе и при повышенных концентрациях дисперсной фазы.

1. Гольдфельд, М. А., Захарова, Ю. В., Фёдоров, А. В., Фёдорова, Н. Н. (2018). Влияние волновой структуры течения в сверхзвуковой камере сгорания на воспламенение и стабилизацию горения.// *Физика горения и взрыва*, 54(6), 3-16.

2. Хмель, Т. А., Лаврук, С. А. (2020). Моделирование ячеистой детонации в двухфракционных нанодисперсных газозвесах частиц алюминия.// *Физика горения и взрыва*, 56(2), 73-82.

3. Tropin, D. A., Bedarev, I. A. (2021). Problems of Detonation Wave Suppression in Hydrogen-Air Mixtures by Clouds of Inert Particles in One-and Two-dimensional Formulation.// *Combustion Science and Technology*, 193(2), 197-210.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– Систематизированы ведущие физические механизмы, определяющие развитие дефлаграционного горения внутри ограниченных объемов, заполненных предварительно перемешанной газообразной смесью. На основе результатов численного моделирования продемонстрирована роль развивающейся на фронте пламени газодинамической неустойчивости, роль волн сжатия, генерируемых в зоне горения, и роль акустических полей, формируемых в результате взаимодействия волн

сжатия со стенками объема, фронтом пламени и друг с другом, в ускорении горения. Полученные результаты анализа нестационарных волн дефлаграции в ограниченном объеме указывают пути к выбору оптимальных расчетных методик для расчетно-теоретического сопровождения исследований в области нестационарного горения и интерпретации переходных режимов.

- Систематизированы ведущие физические механизмы, определяющие развитие воспламенения на фоне неоднородностей температуры, сформированных локальными источниками энергии. Представлена расширенная классификация режимов инициирования волн горения на заданном градиенте температуры для случая детальной кинетики горения. Продемонстрирована роль нестационарных газодинамических процессов, развивающихся на временах подвода энергии и последующих стадиях развития горения. На основе проведенного исследования сформулированы базовые механизмы формирования волн реакции, включая детонацию, при локализованном подводе энергии, а также критерий перехода к детонации при варьировании параметров источника энергии.
- Определены основные газодинамические механизмы, определяющие формирование очагов воспламенения и возникновение детонации в реагирующей смеси в условиях одно- и двукратного сжатия в ударной трубе. Продемонстрирована роль нестационарных газодинамических процессов, развивающихся в потоке за падающей ударной волной. Показано, что одну из ведущих ролей в формировании неоднородностей температурного поля играют роликотые вихри, формирующиеся в ходе нелинейной динамики пограничного слоя. На основе проведенного исследования сформулированы базовые механизмы формирования волн реакции, включая режим с многоочаговым воспламенением. Выявлены особенности формирования детонационной волны и сформулированы рекомендации к интерпретации экспериментальных измерений в реакторах на основе ударной трубы.
- Определена роль лучистого теплообмена в развитии горения в дисперсных средах на основе реагирующей газообразной смеси, содержащей взвешенные в ней твердые микрочастицы. Продемонстрированы базовые режимы развития горения, включая индуцированные лучистым преднагревом переходные режимы. Сформулирована концепция прямого инициирования объемного взрыва путем лучистого нагрева облака частиц от стороннего источника. Построены критерии формирования различных режимов горения газообразной смеси, инициированных в результате локального воспламенения нагретого облака микрочастиц.
- Проведен детальный анализ и систематизированы газодинамические механизмы, определяющие формирование детонации в результате нестационарного развития фронта пламени, и выявлены особенности развития ускоренного пламени в гладких и загроможденных каналах.
- Описана структура так называемого "запертого пламени", формируемого на стадии, предшествующей переходу в детонацию, и исследована устойчивость такой структуры в зависимости от особенностей протекания химической кинетики.
- Сформулированы базовые сценарии развития высокоскоростного пламени, включая переход горения в детонацию, установление квазистационарного режима высокоскоростного горения и независимое самовоспламенение перед фронтом пламени. На основе полученных данных сформулированы базовые критерии, определяющие реализацию того или иного режима, апробированные с использованием доступных в литературе экспериментальных данных по сценариям и критериям перехода к детонации.
- Изучены и систематизированы сценарии развития горения в условиях стороннего ударно-волнового воздействия на зону горения и получена интерпретация сценариев перехода к детонации в закрытых объемах.
- Сформулирован механизм перехода горения в детонацию в свободном пространстве.

Научная и практическая значимость исследования обоснована тем, что разработанные рекомендации к выбору вычислительных алгоритмов для математического моделирования нестационарных режимов горения в замкнутых объемах могут быть использованы для повышения предсказательной способности и точности методик, используемых для расчетно-теоретического сопровождения поисковых экспериментальных работ и процесса разработки реальных технических систем в области обеспечения взрывобезопасности и перспективной энергетики. Полученные в ходе исследования конкретные данные об особенностях развития волн горения и детонации могут быть использованы при проектировании ряда перспективных технических систем таких как системы зажигания, двигатели внутреннего сгорания нового поколения, системы пожаро- и взрывобезопасности химических производств, угольных шахт, водородных энергетических установок и атомных электростанций. В частности, принципиальными являются данные о пределах инициирования детонации, которые могут быть получены на основе относительно простых процедур количественной оценки таких пределов, сформулированных в ходе исследования. Практическую значимость для изучения кинетики горения и интерпретации специализированных экспериментов представляют полученные в рамках диссертационного исследования данные о развитии потока в реакторе на основе ударной трубы и о механизмах очагового воспламенения. Результаты работы могут быть использованы для широкого круга исследований в области физики нестационарного горения и взрыва, проводимых в таких научных центрах как Объединенный институт высоких температур РАН, Федеральный исследовательский центр Химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Институт проблем химической физики РАН, Институт безопасного развития атомной энергетики РАН, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, НИЦ Курчатовский институт, РФЯЦ ВНИИТФ и др.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что сделанные в работе выводы основаны на детальном анализе имеющейся в литературе экспериментальной и теоретической информации, а так же на специально поставленных и решенных численно задачах. При этом, в основу математических моделей и вычислительных алгоритмов, использованных при проведении численных исследований, положены общепринятые на сегодняшний день концепции описания фундаментальных законов горения газообразных и дисперсных сред. Проверка корректности полученных результатов основана на традиционных процедурах валидации использованных математических моделей и реализующих их компьютерных кодов и верификации получаемых расчетных данных с привлечением экспериментальных данных. Полученные расчетные результаты согласуются с экспериментальными данными и теоретическими представлениями о параметрах горения и детонации, а так же о динамике переходных режимов.

Личный вклад соискателя состоит в постановке отдельных задач, проведении вычислений, их анализе и интерпретации результатов. Все основные результаты вошедших в состав диссертации работ сформулированы коллективом авторов с непосредственным участием автора диссертации. На защиту выносятся положения, предложенные лично автором на основе проведенных с соавторами исследований.

Апробация результатов исследования проводилась на 52 российских и международных конференциях и симпозиумах, а также на Семинарах ОИВТ РАН, ЦИАМ, НИИ Механики МГУ, ИТ им. С.С. Кутателадзе СО РАН, ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН и на Ученом Совете ОИВТ РАН. Основные публикации по выполненной работе подготовлены при определяющем вкладе автора.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г.

На заседании от 15.09.2021г. диссертационный совет принял решение за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, решение научной проблемы, имеющей важное политическое, социально-экономическое значение, новые научно-обоснованные технические, технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, присудить Киверину Алексею Дмитриевичу ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 (1.3.14) - теплофизика и теоретическая теплотехника

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человека, из них 10 докторов наук по специальности 01.04.08 — «Физика плазмы» (из них 9 - очно) и 11 докторов наук по специальности 01.04.14 — «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (из них 7 - очно), участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - 21, против - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01)
д.ф.-м.н., профессор

Андреев Н.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01)
д.ф.-м.н.



Васильев М.М.

15.09.2021г.