

На правах рукописи



Киверин Алексей Дмитриевич

**НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ И
ФОРМИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗООБРАЗНЫХ И
ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ**

Специальность 01.04.14 —
«Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва — 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Официальные оппоненты: **Смирнов Николай Николаевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
МГУ им. М.В. Ломоносова,
заведующий лабораторией

Минаев Сергей Сергеевич,
доктор физико-математических наук,
Институт прикладной математики ДВО РАН,
главный научный сотрудник

Власенко Владимир Викторович,
доктор физико-математических наук,
Центральный аэрогидродинамический институт
имени профессора Н. Е. Жуковского,
заместитель начальника лаборатории

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится ”__” _____ 2021 г. в __ ч. __ на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 ОИВТ РАН по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, ученому секретарю диссертационного совета Д 002.110.02.

Автореферат разослан ”__” _____ 2021 г..

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.110.02,
д.ф.-м.н.



М. М. Васильев

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2021

Общая характеристика работы

Настоящая работа посвящена исследованию нестационарных режимов горения и механизмов формирования детонации в газообразных и дисперсных средах методами математического моделирования.

Актуальность темы. Процессы горения и взрыва являются основой широкого класса технических систем, включая энергоустановки и двигатели. При этом, в последнее время актуальность приобретают альтернативные топлива, включая газообразные. Помимо этого, взрыв газообразных и дисперсных реагирующих сред представляет интерес с точки зрения пожаро- и взрывобезопасности технических систем, работа которых связана с использованием газообразных химически активных компонентов или с рисками их спонтанного накопления и выброса в атмосферу окислителя. Так, например, принципиальными являются задачи обеспечения взрывобезопасности химических производств, хранилищ газообразных топлив и транспортных сетей, угольных шахт и реакторных залов атомных электростанций. Как для решения задач энергоэффективного сжигания газообразных топлив, так и для задач прогноза и обеспечения взрывобезопасности промышленных объектов необходимо иметь информацию о реализуемых в заданных условиях режимах горения. Важно отметить, что горение в ограниченных объемах, будь то объем камеры сгорания или объем промышленного помещения, развивается нестационарным образом, что способствует генерации газодинамических течений с формированием ударных и детонационных волн. Причем, именно детонационное горение рассматривается как наиболее опасное с точки зрения взрывоопасности и как наиболее эффективное с точки зрения энергетики. Несмотря на более чем вековую историю теории горения и взрыва, нестационарное развитие процессов воспламенения, горения и детонации газообразных и дисперсных смесей остаются предметом многочисленных научных исследований. Многомасштабность протекающих процессов, многомерность, а также чувствительность горения к внешним воздействиям, в значительной мере усложняют всестороннее экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование реальных технических систем. Следует отметить значительные успехи в этой области, достигнутые за последние десятилетия благодаря развитию компьютерных ресурсов и вычислительных методов. Актуальной задачей при этом является определение областей применения различных вычислительных методов для достоверного расчетно-теоретического исследования нестационарного горения и детонации.

Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию методами математического моделирования широкого класса задач физики горения и детонации газообразных сред, включая дисперсные среды, представляющие собой взвешенные в газообразной атмосфере микрочастицы. В рамках диссертационного исследования решен ряд принципиальных задач. В частности, на основе систематизации и разностороннего описания нестационарных режимов горения в ограниченных объемах сформулированы рекомендации к выбору

вычислительных методик для достоверного расчетно-теоретического исследования режимов горения в реальных условиях. В работе исследованы механизмы воспламенения и инициирования детонации при объемном энерговыделении и при ударноволновом воздействии на реагирующую среду. Информация о физических механизмах воспламенения и возникновения детонации является определяющей для разработки устройств инициирования заданных режимов горения, для фундаментального обоснования пределов горения и детонации, а так же для интерпретации специально поставленных экспериментов, направленных на исследование кинетики горения смесей заданного состава в заданных условиях. В рамках диссертационного исследования выполнено разностороннее изучение сценариев развития горения с переходом в детонацию. Прогнозирование развития переходных режимов актуально как с точки зрения оценки рисков взрывобезопасности, так и с точки зрения повышения КПД перспективных энергоустановок.

Степень разработанности темы. Процесс становления физики горения и взрыва можно формально разделить на три этапа. На первом этапе (19 век - начало 20 века) были определены базовые сценарии развития горения, такие как дефлаграция и детонация, а также базовые параметры и характеристики горения. Далее, на протяжении 20 века, были построены стационарные и нестационарные теории горения и взрыва [1], а развитие экспериментальных методик позволило всесторонне исследовать различные аспекты процессов горения, включая нестационарное развитие пламени, развитие неустойчивости фронта пламени, переход горения в детонацию, многомерную структуру детонационного фронта, воспламенение при ударном сжатии и многие другие. Достижения в области химической кинетики процессов горения, разработка новых эффективных методов математического моделирования и развитие технических возможностей их программной и машинной реализации создали основу для перехода в конце 20 века на третий этап становления физики горения и взрыва, где появилась возможность сопровождать экспериментальные и теоретические исследования подробным численным моделированием изучаемого явления. Начиная с 1970-ых годов активно исследовались одномерные задачи, такие как развитие детонации на фоне неравномерного распределения температуры, инициирование детонации мощным источником энергии, распространение детонации в газах и дисперсных средах, переход горения в детонацию в системах с потерями. С ростом производительности вычислительных средств появилась возможность решения двумерных задач, таких как развитие многомерного фронта детонации в канале и в слое конечной ширины, разлет продуктов детонации в открытое пространство, развитие неустойчивости пламени, переход горения в детонацию. Ранние работы, посвященные численному анализу нестационарного горения выполнялись в приближении одноступенчатой кинетики, подразумевающей полный переход исходной горючей смеси как единого целого в продукты горения согласно брутто реакции, описываемой одним уравнением Аррениуса. При этом накопленный опыт в области химической кинетики горения указывает на то, что

процесс идёт по куда более сложному пути, задействующему цепные механизмы (разветвленные и неразветвленные), что, в частности, позволяет разрабатывать методики химического воздействия на процессы горения для катализации или напротив ингибирования процесса горения. Новый виток развития компьютерной техники в 1990-е годы обеспечил возможность учитывать кинетические особенности горения, и новое поколение работ, выполненных методами численного моделирования, использует, как минимум, двух- или трехступенчатые механизмы кинетики горения, но в большей степени детальные кинетические механизмы. Определенную роль в развитии горения может играть турбулизация потока. В таком случае, в особенности, при решении инженерных задач, требующих разрешения процесса на относительно крупных масштабах, прибегают к использованию подсеточных моделей турбулентного горения. В ряде задач, это обеспечивает хороший уровень результатов расчета, но, тем не менее, локальные эффекты развития фронта пламени, в том числе в условиях действия турбулентности, в настоящее время недостаточно изучены и требуют более детального исследования на фундаментальном уровне. Здесь уместно отметить, что сегодняшний уровень развития вычислительных методов и компьютерных систем позволяет проводить достаточно корректные оценки интегральных параметров исследуемых систем, что существенно при разработке новых перспективных энергетических систем. При этом, однако, более детальные исследования структуры реагирующих течений указывают на то, что для повышения точности расчетов для реальных технических объектов следует создавать новые или, по крайней мере, совершенствовать уже имеющиеся на вооружении подсеточные модели. И в первую очередь это касается нестационарных и переходных режимов горения, когда локальные эффекты могут играть определяющую роль в развитии процесса, определять конкретные пути развития нестационарного горения на всех стадиях от воспламенения до формирования детонации. Это отчасти продемонстрировано в упомянутых выше работах и этому посвящены исследования, представленные в настоящей диссертации.

Целью работы является определение и систематизация механизмов воспламенения, нестационарного развития горения и формирования детонации в газообразных и дисперсных средах. Для достижения цели исследования поставлены частные задачи численного моделирования, направленные на:

1. Изучение особенностей развития волн горения в закрытых объемах и свободном пространстве.
2. Анализ режимов воспламенения и инициирования детонации при локальном импульсном подводе энергии.
3. Исследование эволюции потока, формирования неоднородных температурных полей и воспламенения в условиях экспериментов в ударных трубах.
4. Анализ сценариев воспламенения и инициирования детонации при лучистом нагреве инертных микрочастиц, взвешенных в газообразной среде.

5. Изучение особенностей формирования детонации в результате нестационарного развития горения в различных условиях, включая разные составы газообразных смесей, варьируемые термодинамические условия и различные геометрии реакторов (открытый канал, закрытый канал, свободное пространство).

Научная новизна:

1. Предложены новые рекомендации к выбору вычислительных алгоритмов для математического моделирования нестационарных режимов горения в замкнутых объемах.
2. Получена более полная, по сравнению с представленной ранее в литературе, детализация процесса эволюции очагов воспламенения и детонации при локальном подводе энергии реагирующей среде.
3. Впервые проведено детальное описание эволюции потока в ударной трубе и формирования очагов воспламенения на неоднородностях течения.
4. Предложена новая концепция инициирования детонационной волны в газовой среде путем лучистого нагрева инертных микрочастиц, взвешенных в объеме.
5. Впервые описана структура так называемого “запертого пламени”, развивающегося на стадии ускорения пламени, предшествующей переходу в детонацию.
6. Впервые проведена систематизация и классификация возможных режимов развития высокоскоростного пламени в ограниченном объеме и предложена методика расчета пределов перехода к детонации в газообразных смесях.
7. Впервые методами математического моделирования воспроизведен процесс перехода к детонации в свободном пространстве и предложен механизм перехода к детонации при свободном распространении пламени в газообразной среде.

Научная и практическая значимость. 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.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Рекомендации к выбору вычислительных алгоритмов для математического моделирования нестационарных режимов горения в замкнутых объемах, выработанные на основе описания и систематизации ведущих механизмов развития пламени, включая механизм ускорения пламени за счет взаимодействия с генерируемыми им волнами сжатия.
2. Механизм формирования волн реакции, включая детонацию, при локализованном подводе энергии, заключающийся в формировании неравномерного распределения температуры и развитии нестационарного теплового взрыва на его фоне.
3. Механизм формирования очагов воспламенения в ударных трубах через нестационарное развитие пограничного слоя за падающей ударной волной.
4. Механизм формирования детонации посредством нестационарного развития волны реакции при очаговом воспламенении в ударных трубах.
5. Концепция локального инициирования теплового взрыва в реагирующей газообразной среде путем нагрева облака микрочастиц от источника лучистой энергии.
6. Классификация механизмов формирования волн горения и детонации в нагретых двухфазных облаках, в том числе многоочаговое воспламенение.
7. Результаты анализа и описание механизма распространения быстрого пламени в режиме “запертого пламени”, включая структуру “запертого пламени” и условия его устойчивости.
8. Методика расчета критериев перехода к детонации в газообразных смесях, включая переход к детонации в загроможденных объемах и результаты расчетов критерия перехода к детонации в смесях на основе водорода.
9. Механизмы генерации сверхвысоких давлений при переходе в детонацию в замкнутых объемах с учетом фактора взаимодействия пламени с ударными волнами.
10. Механизм перехода в детонацию в открытых объемах как прямое следствие развития гидродинамической неустойчивости фронта пламени.

Достоверность. 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 газобразных 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. Исследования, результаты которых изложены в первой главе, выполнены в соавторстве с М.Ф. Ивановым и И.С. Яковенко. Большая часть использованных в первой главе постановок задач предложена лично автором настоящей диссертации. В частности, автор предложил исследовать эволюцию волновых полей за фронтом пламени при его распространении в канале от закрытого торца, что позволило выявить их роль в развитии горения и конкретные механизмы их воздействия на динамику фронта пламени на различных стадиях его ускорения. Так же автор предложил изучить особенности развития горения при использовании различных граничных условий на стенках замкнутого объема, что позволило сделать вывод о необходимости воспроизведения с высокой точностью эволюции акустических полей при математическом моделировании нестационарного горения в замкнутых объемах. На защиту выносятся положения, предложенные лично автором на основе проведенного с соавторами исследования.

Исследования, результаты которых изложены во второй главе, выполнены в соавторстве с М.Ф. Ивановым, М.А. Либерманом и D. Kassou. Все вычисления, их анализ и интерпретация результатов выполнены лично автором настоящей работы. Постановка задачи о развитии воспламенения в результате локализованного подвода энергии сформулирована лично автором на основе его обсуждений с соавторами. Все основные результаты использованных в разделе работ сформулированы коллективом авторов с непосредственным участием автора настоящей работы. На защиту выносятся положения, предложенные лично автором на основе проведенного с соавторами исследования.

Исследования, результаты которых изложены в третьей главе, выполнены в соавторстве с И.С. Яковенко. Постановки задач сформулированы лично автором настоящего исследования. На защиту выносятся положения, предложенные лично автором.

Исследования, результаты которых изложены в четвертой главе, выполнены в соавторстве с М.Ф. Ивановым, М.А. Либерманом, В.П. Ефремовым и И.С. Яковенко. Автор настоящей работы принимал участие во всех постановках задач, провел все представленные в работах вычисления и их анализ. Выводы опубликованных работ сформулированы коллективом авторов. Автору настоящей работы принадлежит постановка задач об анализе многоочаговых режимов

воспламенения и об устойчивости формирующихся детонационных волн. На защиту выносятся положения, предложенные автором на основе проведенных исследований.

Исследования, результаты которых изложены в пятой главе, выполнены в соавторстве с М.Ф. Ивановым и И.С. Яковенко. Автор настоящей работы является автором постановок рассмотренных задач, принимал активное участие в проведении вычислений и их анализе. При формулировании выводов опубликованных работ основная роль принадлежит автору настоящей работы.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих Всероссийских и Международных конференциях: International conference on the Equation of State for Matter (Эльбрус, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018), Академические чтения по космонавтике (Москва, 2008, 2009, 2010), Всероссийский Симпозиум по горению и взрыву (Черноголовка, 2008), International conference on the Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (Эльбрус, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017), International Symposium on Shock Waves (Санкт-Петербург, 2009), International Conference on Fluid Control, Measurements and Visualization (Москва, 2009), International colloquium on the dynamics of explosions and reactive systems (Минск, 2009, Irvine, 2011, Taipei, 2013, Leeds, 2015, Beijing, 2019), International Shock Interaction Symposium (Москва, 2010), Юбилейная научная конференция, посвященная 50-летию создания ОИВТ РАН (Москва, 2010), Всероссийская научно-техническая конференция «Авиадвигатели XXI века» (Москва, 2010, 2015), International Colloquium on Pulsed and Continuous Detonations (Санкт-Петербург, 2010, 2016), Научный семинар по горению и взрыву, посвященного памяти профессора Б.Е. Гельфанда (Санкт-Петербург, 2012, 2014, 2016, 2018), Всероссийская научная школа молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах» (Москва, 2012), Всероссийская конференция «Необратимые процессы в природе и технике» (Москва, 2013, 2019), European combustion meeting (Lund, 2013), Конференция «Современная химическая физика» (Туапсе, 2013), Минский международный коллоквиум по физике ударных волн, горения и детонации (Минск, 2013, 2015, 2017, 2019), International Seminar on Flame Structure (Berlin, 2014), International Symposium on Non-equilibrium Processes, Plasma, Combustion, and Atmospheric Phenomena (Сочи, 2014, 2018), 3-rd International Conference «Zel'dovich Memorial: Accomplishments in the combustion science in the last decade» (Москва, 2014), Всероссийская конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2016), Ежегодная научная конференция отдела горения и взрыва ИХФ РАН (Москва, 2017, 2020), Заббахинские научные чтения (Снежинск, 2017), Ginzburg Centennial Conference on Physics (Москва, 2017), International Conference on Flow Dynamics (Sendai, 2017), Конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике» (Москва, 2019).

Результаты работы так же обсуждались на Семинаре «Фундаментальные проблемы горения и эмиссии вредных веществ» (17.03.2016, ЦИАМ), на Семинаре «Химическая кинетика в газовой динамике» (06.06.2019, НИИ Механики

МГУ), на Семинаре “Фундаментальные исследования процессов горения и детонации применительно к развитию основ энерготехнологий” (19.02.2021, ИТ СО РАН) и на Ученом Совете ОИВТ РАН (10.12.2018).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 39 печатных изданиях, 37 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 35 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 284 страницы, включая 121 рисунок. Список литературы содержит 249 наименований.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность, научная новизна и практическая значимость задач, решаемых в работе. Сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу базовых физических механизмов, определяющих нестационарное развитие горения газообразных смесей в замкнутых объемах. Показано, что одну из ведущих ролей в развитии пламени в замкнутом объеме играют формируемые в ходе горения акустические поля. Взаимодействие пламени с акустическим полем, в частности, приводит к интенсификации развития гидродинамической неустойчивости фронта пламени. Более того, формируемые в ходе развития горения волны сжатия определяют характер передачи энергии и импульса среде, что в свою очередь влияет на динамику фронта пламени, включая его ускорение. На основе полученных результатов сформулированы требования к выбору вычислительных методик для математического моделирования нестационарного горения, а также требования к их корректному использованию. Представленные в настоящей главе материалы являются результатами исследований, проведенных автором и опубликованных в работах [I—IX].

В **п. 1.1** вводится объект исследования, которому посвящена настоящая глава - дефлаграционное горение. Отмечаются основные особенности развития горения в дефлаграционном режиме и важность исследования нестационарных режимов горения, диктуемая как перспективами практического применения и создания мер безопасности при работе с горючими смесями, так и необходимостью решения широкого класса фундаментальных проблем, в том числе освещенных в настоящей работе.

В **п. 1.2** представлена математическая модель нестационарного горения, в основу которой положена традиционная газодинамическая модель сжимаемого вязкого газа с учётом теплопроводности, многокомпонентной диффузии, химических превращений в зоне реакции и соответствующего выделения энергии. Представлены модели для расчета уравнения состояния многокомпонентной газовой смеси, коэффициентов переноса и химической кинетики.

П. 1.3 посвящен определению нормальной скорости горения - одной из базовых характеристик горения в целом и процесса распространения пламени в частности, определяемой как скорость распространения фронта пламени относительно горючей смеси, находящейся в заданном термодинамическом состоянии. В соответствии с классическими представлениями сформулирован алгоритм численного определения нормальной скорости горения. Представлены значения нормальной скорости горения, полученные из анализа расчетов, полученных с применением трёх различных вычислительных алгоритмов, и их сопоставление друг с другом и экспериментальными данными. Эта процедура является необходимым шагом в процессе валидации и верификации нестационарных математических моделей и компьютерных кодов, предназначенных для решения задач горения и взрыва.

В **п. 1.4** обсуждается вопрос развития гидродинамической неустойчивости фронта пламени в канале. Представлен краткий обзор результатов предшествующих теоретических и численных исследований. Описана постановка задачи численного моделирования процесса распространения пламени в полуоткрытом канале от закрытого торца. Численный анализ позволил определить ход развития гидродинамической неустойчивости фронта и описать особенности развития неустойчивости. Показано, что в более реалистичной ситуации, воспроизводимой численно с учетом детальной кинетики горения, развитие неустойчивости определяет большую степень ускорения пламени, и результирующая скорость оказывается выше теоретической оценки. Важно отметить также, что обнаружено существенное влияние на ход развития процесса химического состава смеси. Так, при моделировании горения в высокоактивной водород-кислородной смеси выход пламени на стационарный режим распространения не наблюдался, и пламя продолжало ускорение после нелинейной стабилизации неустойчивости. Все представленные в п. 1.4 данные указывают на важную роль неустойчивости фронта пламени в развитии нестационарных режимов горения, а следовательно и на необходимость корректного разрешения связанных с этим эффектов при численном моделировании.

П. 1.5 посвящен анализу газодинамических процессов, развивающихся в полуоткрытом канале в ходе ускорения пламени. В первую очередь внимание уделено генерации и распространению волн сжатия, а так же их взаимодействию с фронтом пламени. Продемонстрировано, что характер генерации волн сжатия и механизмы их воздействия на фронт горения различны на разных стадиях ускорения пламени. Это позволяет объяснить особенности эволюции пламени в терминах взаимодействия фронта пламени с волнами сжатия. Так, на ранней стадии распространения пламени в канале от закрытого торца скорость пламени ($U_{f,L}$) существенно меньше скорости звука в продуктах горения (a_b), и влияние волн сжатия, распространяющихся в зоне продуктов горения, является существенным, во многом определяя и само ускорение пламени от закрытого торца. На поздней стадии процесса ускорения пламени при достижении пламенем максимально допустимой скорости $U_{f,L} \sim a_b$ волны сжатия отстают от

фронта пламени и их влияния на динамику горения отсутствует. На промежуточной стадии выравнивание давления в области продуктов горения происходит на существенно больших временных масштабах, чем на ранних стадиях распространения пламени. При этом в зоне реакции можно наблюдать формирование пика давления, нарастающего в процессе распространения фронта пламени (рисунок 1). Особенности развития описанных стадий взаимодействия фронта пламени и излучаемых им волн сжатия полностью соответствуют стадиям эволюции пламени, наблюдаемым в натуральных экспериментах и расчетах.

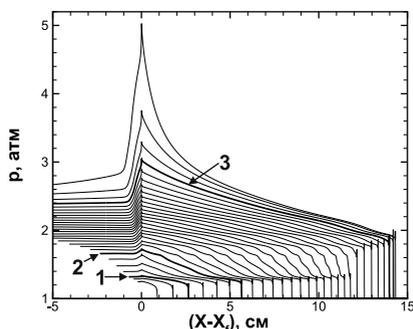


Рис. 1 — Эволюция профиля давления вблизи ведущей точки фронта пламени в системе координат, движущейся совместно с фронтом пламени. $t_0 = 10$ мкс, $\Delta t = 20$ мкс. 1 – начало формирования пика давления, 2 – момент окончания начальной стадии экспоненциального роста скорости, 3 – момент достижения пламенем скорости звука в свежей смеси.

В п. 1.6 обсуждаются особенности динамики распространения пламени в каналах, закрытых с обоих концов. Представлены результаты численного моделирования в одномерном и двухмерном приближении. Это позволило в явном виде продемонстрировать влияние волн сжатия, отраженных от стенок закрытого канала, и возвратных течений на структуру и динамику фронта пламени. На основе полученных данных о развитии пламени в замкнутом объеме рассмотрено явление так называемых ячеистых пламен. Показано, что особенности развития ячеистого пламени в замкнутом объеме определяются внутренней геометрией и характерными скоростными масштабами задачи. В виду этого следует ожидать, что при изменении геометрии испытательной камеры в среднем особенности динамики волны горения, развивающейся в режиме устойчивого ячеистого пламени, будут сохраняться. Сравнение структур фронтов пламени, распространяющихся в каналах различной ширины указывает на удовлетворительную масштабируемость устойчивого ячеистого пламени. При этом показано, что формирование ячеистой структуры фронта пламени в замкнутом объеме можно определить как самосогласованное развитие гидродинамической неустойчивости фронта и акустического поля внутри рассматриваемого объема. В результате взаимодействия распространяющегося фронта пламени

с формирующимся полем пульсаций пламя способно развить большую скорость распространения на меньших временных масштабах. Важно отметить, что описанный физический эффект развивается на фоне весьма малого повышения давления, что определяет малую амплитуду пульсаций давления. С другой стороны, большинство традиционных разностных методов решения газодинамических задач характеризуется относительно высокой величиной схемной вязкости, что не позволяет на прямую наблюдать указанный эффект, а следовательно в расчетах медленнее развивается поверхность фронта пламени, и медленнее распространяется фронт пламени по сравнению с экспериментальными данными. В рамках настоящей работы для качественной иллюстрации описанного эффекта были проведены дополнительные расчеты с искусственным заданием поглощения 12.5% доли импульса и энергии акустических волн в пограничном слое, что имитирует рассеивание и поглощение этих волн на начальной стадии турбулизации среды. Это обеспечило сдвиг в спектре возмущений и формирование относительно интенсивных пульсаций давления, как следствие была получена более развитая структура фронта пламени.

В **п. 1.7** на основе выявленных в настоящей работе механизмов развития горения в замкнутых объемах сформулированы рекомендации к выбору вычислительных методик для проведения численного моделирования нестационарных процессов горения. В том числе, отмечено, что минимизация схемной диссипации и хорошие дисперсионные свойства вычислительной методики являются первостепенными.

В **п. 1.8** содержатся заключение и выводы к Главе 1.

Вторая глава диссертации посвящена задаче инициирования волн горения в предварительно перемешанной газообразной смеси путем локального подвода энергии. На основе результатов численного моделирования представлена уточненная классификация режимов инициирования волн горения и детонации по Я.Б. Зельдовичу на примере водород-кислородной смеси. Представлен детальный анализ возможных режимов инициирования горения при локализованном подводе энергии. Сформулированы критерии перехода к детонации при варьировании величины подводимой энергии и мощности источника энергии. Представленные в настоящей главе материалы являются результатами исследований, проведенных автором и опубликованных в работах [X—XIII].

В **п. 2.1** следуя классической работе Я.Б. Зельдовича [2] представлены фундаментальные основы описания механизма нестационарного теплового взрыва в неравномерно нагретом газе.

П. 2.2 посвящен описанию возможных режимов инициирования волн горения и детонации в неравномерно нагретом газе и их классификации.

В **п.2.2.1** представлена классификация режимов инициирования волн горения и детонации в неравномерно нагретом газе согласно представлениям Я.Б. Зельдовича, сформулированным для реагирующей системы, описываемой моделью одноступенчатой экзотермической реакции. Сделано предположение, что для более подробного описания механизмов формирования различных режимов

горения в реальных горючих смесях требуется расширение представлений о развитии процесса с учетом детальных кинетических механизмов, позволяющих в отличие от одноступенчатой реакции Аррениуса описать кинетику горения смесей на базе водорода или углеводородных топлив. С учетом этого в п. 2.2 решается задача о воспламенении на градиенте температуры с учетом детального механизма протекания реакции на примере водородно-воздушной и водородно-кислородной смесей.

В п. 2.2.2 представлена постановка задачи численного моделирования процесса воспламенения на градиенте температуры с учетом детального механизма окисления водорода. В качестве параметров задачи введены: протяженность градиента температуры L , начальная температура (T_0) и давление (p_0) среды и максимальное значение температуры на градиенте (T^*). Отмечена принципиальная особенность кинетики окисления водорода, выражающаяся в смене характера зависимости времени задержки воспламенения (времени индукции) от температуры при определенном значении температуры T_1 , называемую в литературе как “продленный второй предел воспламенения” или “кроссовер” (“crossover”). В области градиента температуры $T > T_1$ следует ожидать довольно высоких скоростей спонтанной волны горения, формируемой на градиенте температуры согласно концепции Я.Б. Зельдовича. По мере продвижения вдоль градиента температуры в область меньших температур и как следствие больших времен индукции следует ожидать снижения скорости спонтанной волны горения. Тогда как при переходе в низкотемпературную область ($T < T_1$) скорость спонтанной волны будет падать скачком.

В п. 2.2.3 представлены результаты анализа динамики развития режимов нестационарного теплового взрыва, результаты параметрического исследования и уточненная классификация режимов инициирования волн горения и детонации на градиенте температуры. В первую очередь рассматривается случай $T^* > T_1$, наиболее приближенный к условиям воспламенения в природе и эксперименте. При достаточно пологих градиентах температуры (высоких, сверхзвуковых скоростях спонтанной волны горения U_{sp}) спонтанная волна горения генерирует волну давления за своим фронтом, которая по мере торможения спонтанной волны горения нагоняет ее и при пересечении ее фронта в области $T = T_1$ формирует ударную волну. При этом механизм распространения волны горения сменяется со спонтанного на газодинамический в потоке за фронтом отходящей ударной волны. В зависимости от определяемой градиентом температуры величины U_{sp} в точке ее максимального торможения могут быть реализованы различные режимы распространения формируемых волн горения. При этом выделяются следующие характерные масштабы скорости, определяющие критерии формирования того или иного режима горения: скорость звука в точке Чепмена-Жуге стационарной детонации (a_{CJ}), скорость звука в точке Неймана (a_N), скорость звука в продуктах горения (a_b), скорости звука в невозмущенной среде в нижней и верхней точках градиента температуры ($a_f = a(T_0)$ и $a^* = a(T^*)$) и нормальная скорость горения u_f (скорость ламинарного пламени).

Число выделенных характерных масштабов здесь больше, чем при классификации режимов по Зельдовичу Я.Б., что позволяет теперь получить, уточненную на случай детального механизма реакции классификацию формируемых режимов горения.

Как показывают результаты численного решения при низких температурах в области воспламенения ($T^* \sim T_1$ и меньше) для инициирования режимов с формированием ударных и детонационных волн требуется значительно более пологий и протяженный температурный градиент. При этом само формирование режимов происходит путем, отличным от случая градиента с высокой температурой T^* . В этом случае режим формирования детонации во многом аналогичен реализуемому для одноступенчатой экзотермической реакции, в котором определяющую роль играет газодинамика, а не механизм Я.Б. Зельдовича. Классификация возможных режимов, полученных в результате развития воспламенения на градиенте температуры, отражена на диаграммах, построенных на основе расчетных данных в координатах $L - T^*$ и $L - p_0$.

Выше в **п. 2.2.3**, исходя из представления о спонтанной волне горения, показано, как формируются различные режимы горения на неравномерном температурном фоне. В то же время само инициирование того или иного режима горения зависит от пространственно-временных характеристик источника энергии. Анализ этой зависимости представлен в **п. 2.3** и позволяет провести корректную оценку величины подводимой энергии и масштабов ее локализации в пространстве и далее использовать концепцию Я.Б. Зельдовича применительно к описанию воспламенения от нестационарных источников энергии.

В **п. 2.3.1** представлена постановка задачи численного моделирования процесса воспламенения от локализованного источника энергии. В объеме, заполненном стехиометрической водород-кислородной смесью при постоянном давлении и температуре, выделялась область линейного размера $L = 1 - 10$ мм ($0 < x < L$ в одномерной постановке), в которой за время Δt_Q смеси сообщалась энергия $Q_{ign} = W\Delta t_Q$ при постоянной мощности источника энергии W . Выбранный диапазон длительности энерговложения охватывает субмикросекундные, микросекундные и миллисекундные импульсы энерговложения. Газодинамика процесса, вызванного локальным энерговложением в ограниченной области размера L , характеризуется акустическим временем $t_a = L/a$, где a – скорость звука, и характерным временем распространения тепловой волны $t_T \sim L^2/\chi$, определяемым величиной температуропроводности χ . В водород-кислородной смеси при атмосферном давлении эти временные масштабы составляют для $L = 1$ мм, соответственно, $t_a \sim 2$ мкс и $t_T \sim 0.1$ с. Время инициирования химической реакции и формирование волны горения определяется соотношением между параметрами Δt_Q , t_a , t_T и временем воспламенения t_{ign} , характеризующим протяженность стадии индукции с учетом темпа энерговложения.

В **п. 2.3.2** представлены результаты параметрического исследования и классификация режимов воспламенения в зависимости от параметров источника

энергии. Согласно результатам численного моделирования сделано заключение, что в зависимости от параметров энерговложения (величины вкладываемой энергии, времени энерговложения и размера области энерговложения) возможны два основных механизма инициирования волн реакции: градиентный механизм Зельдовича и объемный тепловой взрыв (представляющий одну из асимптотик механизма Зельдовича с градиентом нулевой крутизны). Для практически важных временных масштабов выделены следующие принципиальные сценарии воспламенения: 1) субмикросекундные импульсы энерговложения обеспечивают условия для теплового взрыва в объеме горячего пятна; 2) в результате микросекундных импульсов волной разгрузки создается градиент температуры и давления, инициирующий волну горения по механизму Зельдовича воспламенения на градиенте времени индукции; 3) в случае миллисекундных импульсов расширение нагретых газов ведет к формированию температурного градиента при практически постоянном давлении, и горение инициируется по механизму Зельдовича в классической постановке (рассмотренной в п. 2.2).

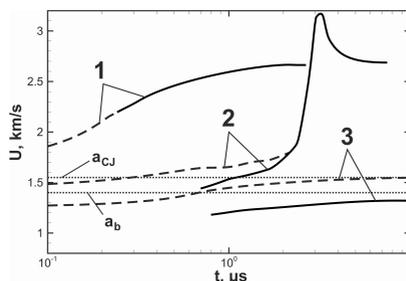


Рис. 2 — Хронограммы скоростей ударной волны (штриховые линии) и фронта реакции (сплошные) в случае прямого инициирования детонации (1 и 2) и волны быстрого горения (3) в результате локального подвода энергии в плоской области протяженностью 4 мм в течение 0.1 мкс.

В п. 2.3.3 более подробно рассмотрены особенности формирования волн горения при использовании коротких высокомоощных импульсов энергии (случай $\Delta t_Q \leq t_{ign} \ll t_a$). Наибольшее внимание при этом уделено критерию формирования детонационной волны. Продемонстрировано, что важным критерием возможности прямого инициирования детонации высоко мощным источником энергии является достижение начальной скоростью фронта реакции величины, превышающей скорость звука в продуктах горения. Это наглядно отражают хронограммы развития процесса, представленные на рисунке 2 для трех характерных режимов: прямого инициирования детонации (1), формирования детонации в результате нестационарного переходного процесса (2) и формирования волны дефлаграционного горения за отходящей ударной волной (3). Нестационарный переходный режим (2) развивается согласно следующему сценарию. Фронт реакции формируется на контактной границе между свежей

смесью и горячими продуктами горения и распространяется в потоке сжатой смеси за фронтом отошедшей ударной волны. Ускорение волны реакции в составе двухволновой конфигурации способствует ускорению потока перед ее фронтом и соответствующему дополнительному сжатию смеси [3], что, в частности, выражается в ускорении бегущей на расстоянии перед фронтом ударной волны (рис. 2). Дополнительное сжатие смеси в области между ведущей ударной волной и фронтом реакции определяет ускорение реакции в этой области, а, следовательно, и ускорение фронта реакции, распространяющегося по предварительно сжатой смеси [4]. Таким образом, имеет место положительная обратная связь, определяющая совместное ускорение фронта реакции и непрерывное сжатие смеси. Результатом этого является формирование ударной волны, достаточной интенсивности для формирования детонации. Описанный сценарий аналогичен предложенному ранее в работе [5] SWACER механизму. При этом важно отметить, что реализация такого механизма становится возможной только при выполнении определенного критерия – при превышении начальной скоростью фронта реакции величины скорости звука в продуктах горения, что исключает воздействия волны разрежения на фронт реакции на протяжении всего процесса. Экспериментально этот факт был явным образом продемонстрирован в работе [6], где было обнаружено, что факт успешного формирования детонации соответствует факту достижения начальной скоростью волны реакции величины скорости звука в продуктах горения.

В п. 2.4 содержатся заключение и выводы к Главе 2.

Третья глава посвящена исследованию особенностей воспламенения в ударных трубах. Рассмотрены режимы воспламенения за падающей и отраженной ударными волнами. При этом в случае воспламенения за отраженной ударной волной, в первую очередь внимание сосредоточено на режимах, так называемого, «мягкого» или очагового воспламенения, реализуемых при умеренных интенсивностях ударной волны и как следствие умеренных температурах воспламенения. Показано, что одну из основных ролей в формировании очагов воспламенения играет развитие гидродинамической неустойчивости в потоке за падающей ударной волной. В результате, в потоке формируются вихревые структуры, определяющие перераспределение энергии и формирование очагов повышенной температуры, в последствие определяющих развитие процесса воспламенения. На основе результатов численного моделирования показано, что в процессе воспламенения формируется волна экзотермической реакции, распространяющаяся в смеси, реагирующей при фоновой температуре. Аналогично тому, как это происходит в случае воспламенения локализованным источником энергии, рассмотренном в предыдущем разделе, волна реакции оказывается неустойчивой и в зависимости от интенсивности экзотермической реакции вырождается в волну дефлаграции или детонации. Пространственно неравномерная картина течения, характеризующая последовательностью разнесенных в пространстве вихревых структур, определяет механизм многоочагового воспламенения, наблюдаемого экспериментально и ранее не получившего физической

интерпретации. Представленные в настоящей главе материалы являются результатами исследований, проведенных автором и опубликованных в работах [XIV—XIX].

В **п. 3.1** представлен современный обзор литературы по режимам воспламенения газообразных смесей в ударных трубах.

В **п. 3.2** обсуждаются особенности постановки задачи численного моделирования воспламенения в ударных трубах. Основной целью ставится дать систематическое описание элементарных газодинамических и кинетических процессов, вовлеченных в процесс воспламенения за ударной волной, распространяющейся в трубе. Для достижения этой цели была проведена серия одно-, двух- и трехмерных расчетов. Отмечена необходимость многомерных расчетов (рис. 3) в виду определяющей роли нестационарного развития многомерного течения, определяющего механизмы формирования неоднородностей потока, включая очаги воспламенения.

В **п. 3.3** проведен анализ эволюции пограничного слоя, формируемого вблизи стенок ударной трубы в потоке за падающей ударной волной. Наравне с описанием структуры течения на качественном уровне проведена количественная оценка параметров, характеризующих развитие неустойчивости пограничного слоя – основного механизма, ответственного за развитие вихревых структур и связанных с их эволюцией неоднородностей поля температуры. На основе проведенного анализа сделан вывод о том, что эволюция течения в трубе за прошедшей ударной волной полностью определяется особенностями поведения классического решения об обтекании плоской пластины. При этом важно отметить, что структуры в течении (роликовые вихри), во многом определяющие последующую эволюцию течения и, в конце концов, формирование очагов воспламенения в первую очередь связаны не с развитой турбулентностью, а с переходной стадией развития пограничного слоя. Показано, что характерный масштаб температурных неоднородностей, ассоциированный с формированием роликовых вихрей, составляет величину порядка размеров роликового вихря (2 мм), чего вполне достаточно для формирования очага устойчивого воспламенения согласно данным, представленным во второй главе. Таким образом, представляется, что одним из ведущих механизмов формирования очагов воспламенения в потоке за прошедшей ударной волной является зарождение и развитие неустойчивости пограничного слоя, выражаемое в формировании роликовых вихрей.

П. 3.4 посвящен анализу процессов инициирования горения в водород-кислородной смеси, разбавленной аргоном, за падающей ударной волной и формирования детонации. Представлен подробный анализ серии одномерных и двумерных расчетов. Показано, что нестационарное развитие пограничного слоя определяет как перераспределение тепла в пристеночной области, как об этом сказано выше в п. 3.3, так и условия газодинамического ускорения потока. С учетом уноса тепла из области контактного разрыва наиболее интенсивный

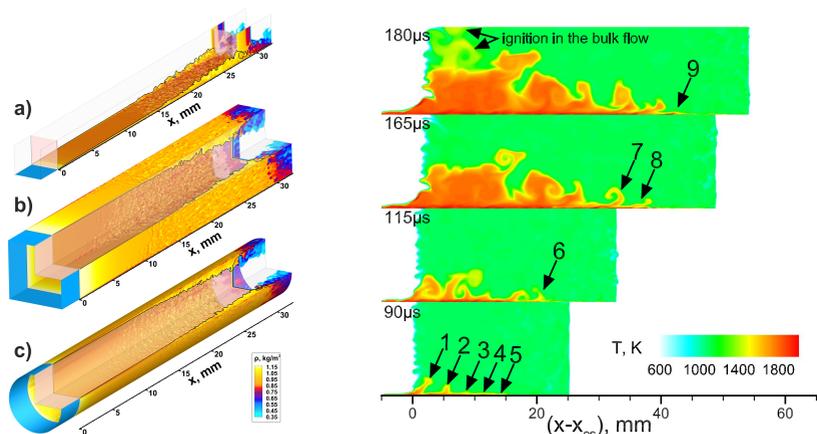


Рис. 3 — (слева) Поля течений за ударной волной, распространяющейся вдоль плоской пластины (а), внутри канала квадратного сечения (b) и внутри трубки круглого сечения (с). Для визуализации пространственных структур потока вблизи стенок изоповерхность плотности 1.1 кг/м^3 показана красной полупрозрачной поверхностью. Для визуализации поверхности контактного разрыва изоповерхность плотности 0.8 кг/м^3 показана белой полупрозрачной поверхностью. Цветом показано поле плотности. $x = 0$ соответствует положению фронта ударной волны. Показан случай со скоростью ударной волны $D = 675 \text{ м/с}$. В направлении всех трех осей использован один и тот же пространственный масштаб.

Рис. 4 — (справа) Картина течения за прошедшей ударной волной в смеси $10\%(2\text{H}_2 + \text{O}_2) + \text{N}_2$. Температура в ядре потока за прошедшей ударной волной составляет величину $\sim 1100 \text{ К}$. Стрелки показывают области формирования очагов воспламенения в пограничном слое (1-9) и в ядре потока. Эволюция картины течения показана на последующие моменты времени.

нагрев имеет место в области пересечения границы пограничного слоя и контактного разрыва, разделяющего толкающий газ и горючую смесь. После локального воспламенения формирующаяся волна реакции распространяется за отошедшей волной сжатия по сжатой уже реагирующей смеси. Ударное сжатие горючей смеси создает условия для самоподдерживающегося ускорения волны реакции, что, в конечном счете, ведет к формированию детонационной волны.

В п. 3.5 в дополнении к представленным выше результатам представлены расчеты для горючих смесей, разбавленных азотом. В первую очередь следует отметить, что такие смеси являются менее химически активными, чем рассмотренные выше, что определяет меньшую скорость реакции при той же температуре. С другой стороны, пограничный слой в таких смесях растет быстрее, что выражается в формировании более крупных вихревых структур на развитой стадии. Характерная длина волны, определяющая размер роликовых

вихрей (или расстояние между ними) может быть оценено как $\sim 3\text{--}5$ мм (в случае смеси, разбавленной аргоном, диаметр вихрей оценивается как 1 мм, рис. 3). Таким образом, очаги воспламенения, формирование которых связано с этими роликовыми вихрями, оказываются разнесенными в пространстве. В результате этого, последовательность воспламенений, которая в предыдущем рассмотренном случае происходит фактически непрерывно, здесь реализуется дискретным образом. При этом задержка между последующими воспламенениями оценивается в 15–25 мкс. Развитие процесса в таком режиме показано на рисунке 4. Здесь следует отметить экспериментальные работы [7; 8], где подобно рассмотренному случаю наблюдалась последовательность воспламенений в очагах, разнесенных в пространстве.

В п. 3.6 рассматриваются особенности воспламенения за ударной волной, отраженной от закрытого торца. Анализ расчетных картин течения, формируемых в реагирующем потоке за отраженной ударной волной после ее взаимодействия с пограничным слоем, показывает, что торможение вихревого течения на масштабах пограничного слоя ведет к формированию горячих очагов непосредственно после воздействия ударной волны, и следом за этим в очагах начинается химическое превращение. Таким образом, источником очагов воспламенения являются тепловые неоднородности, связанные с эволюцией роликовых вихрей, сформированных в потоке за падающей ударной волной. Запоздывание формирования вихревых структур за падающей ударной волной в результате развития неустойчивости пограничного слоя определяет зарождение очагов воспламенения на расстоянии от закрытого торца ударной трубы.

П. 3.7 посвящен обсуждению особенностей регистрации режимов воспламенения с формированием детонации за отраженной ударной волной в ударных трубах с учетом представленных выше результатов. Детонация развивается по сценарию, описанному в п. 3.4 из очага, сформированного на расстоянии от закрытого торца ударной трубы (п. 3.6). При этом возможны различные сценарии с формированием детонации на относительно большом расстоянии от торца, а также с формированием двух детонационных волн при распространении волны реакции от очага в направлении к торцу и в направлении от торца. В результате этого экспериментально при использовании датчиков давления и/или при регистрации эмиссии возбужденных радикалов ОН и другой дополнительной информации в разнесенных в пространстве измерительных сечениях можно наблюдать различные последовательности сигналов, указывающих на приход детонационной волны в измерительное сечение. Более того в виду нестационарного развития горения из очага, локализованного на масштабах пограничного слоя, можно в отдельном измерительном сечении регистрировать нарастание давления, предшествующее приходу детонационной волны и связанное с частичным сгоранием горючей смеси.

В п. 3.8 содержатся заключение и выводы к Главе 3.

Четвертая глава диссертации посвящена особенностям развития горения в двухфазной среде, представляющей из себя взвесь твердых микрочастиц в реагирующей газообразной среде. В разделе представлена модель газодинамики реагирующей двухфазной среды, результаты численного анализа режимов распространения волн горения в газозвеси, а также режимов инициирования волн горения и детонации в результате лучистого разогрева твердых микрочастиц от стороннего источника теплового излучения. В ходе исследования было продемонстрировано, что инициирование горения в газозвеси реализуется согласно механизму нестационарного теплового взрыва Я.Б. Зельдовича. При этом при достаточно больших длинах пробега излучения во взвеси и достаточных временах нагрева на масштабах облака частиц может сформироваться волна детонации, устойчивость которой зависит от степени неоднородности облака частиц, а также от химической активности горючей смеси. На основе проведенных исследований сформулирована концепция инициирования детонации путем генерации в реагирующей газообразной смеси облаков твердых микрочастиц заданной структуры. Представленные в настоящей главе материалы являются результатами исследований, проведенных автором и опубликованных в работах [XX—XXVI].

В **п. 4.1** представлен современный обзор литературы по особенностям развития взрывов двухфазных систем, представляющих собою газозвеси, содержащие твердые микрочастицы.

В **п. 4.2** представлена традиционная математическая модель динамики гетерогенного потока на основе приближения двухскоростной двухтемпературной модели динамики сплошной среды. В принятом приближении поток частиц, так же как и поток несущего газа, описывается в континуальном приближении. Газовая среда на характерных для рассматриваемого класса задач масштабах прозрачна для излучения из области интенсивного энерговыделения. Поглощение излучения определяется взвешенными в газе твердыми частицами и зависит от их концентрации, размеров и пространственного распределения. В случае однородной газозвеси, содержащей частицы одного размера, перенос и поглощение теплового излучения описывалось в одноклассовом диффузионном приближении. В газозвеси, содержащей частицы разных размеров, сопоставимых с длиной волны переносимого излучения, перенос и поглощение излучения описывалось в многоклассовом диффузионном приближении.

В **п. 4.3** представлено решение задачи о взаимодействии пламени с облаком взвешенных в газе микрочастиц. Показано, что важную роль в развитии горения может играть лучистый теплообмен, посредством которого тепло от фронта пламени может поглощаться твердыми химически нейтральными микрочастицами, взвешенных в газообразной горючей смеси. В случае распространения пламени по горючей смеси, существенно неравномерно засеянной частицами, лучистое тепло от зоны горения поглощается на границах облаков взвешенных в газе частиц, которые могут находиться на существенном расстоянии от начального очага воспламенения, служащего источником излучения. Если это расстояние обеспечивает время прихода фронта пламени на границу облака

больше, чем необходимо для разогрева газа до температуры воспламенения, то область поглощения становится очагом зарождения новой волны горения или детонации. В случае облака, состоящего из двух (и более) слоев частиц различного размера, распределение температуры в результате лучистого нагрева от фронта пламени имеет характерную двухгорбовую (или многогорбовую) структуру. В таких условиях реализуется режим с многоочаговым воспламенением. Последовательность таких “взрывов” в ряде случаев ведет в конечном счете к формированию детонации (рисунок 5). Описанные режимы воспламенения с последующим формированием детонации в области поглощения лучистой энергии представляется перспективным как метод управляемого инициирования детонации.

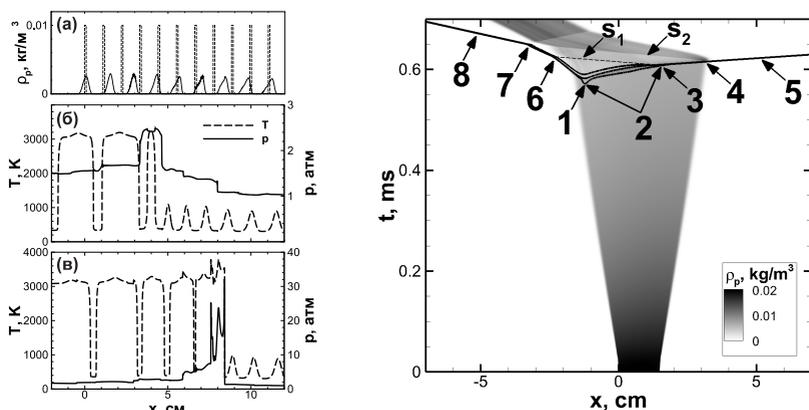


Рис. 5 — (слева) Начальное распределение микрочастиц (1) и их распределение на момент воспламенения (2) (а), профили температуры и давления на момент времени возгорания третьего слоя частиц (третий очаг возгорания) (б) и то же на момент времени возгорания шестого слоя частиц (шестой очаг возгорания) и возникновения детонации (в).

Рис. 6 — (справа) Эволюция дисперсного слоя во время его лучистого нагрева и последующего теплового взрыва. Цветом показано изменение в объемном распределении частиц. Сплошными линиями показаны изолинии температуры в 1100.0 К, 2000.0 К и 3000.0 К (последовательно начиная с нижней линии). 1 – первичное воспламенение, 2 – область теплового взрыва, 3 – точка формирования детонации, 4 – выход детонации из нагретой области в свежую смесь, 5 – самоподдерживаемая детонация, 6 – взаимодействие левого фронта реакции с волной ретонации s_1 , 7 – взаимодействие левого фронта реакции с ударной волной s_2 , 8 – распространение высокоскоростного пламени навстречу источнику лучистой энергии.

В **п. 4.4** рассмотрен процесс инициирования горения и детонации путем лучистого нагрева облака взвешенных частиц от внешнего источника. Исследовано влияние ширины слоя частиц, длины пробега излучения, определяемой объемной концентрацией частиц и их размером, неоднородного распределения частиц на сценарии развития воспламенения смеси. На рисунке 6 показана характерная картина развития процесса, включая стадию нагрева и расширения, стадию теплового взрыва внутри нагретого слоя и стадию формирования детонации в свежей смеси. Данные представлены для слоя начальной ширины $L_1 \approx 0.45 L$. На ранней стадии нагретая среда расширяется практически изотропно, после чего тепловой взрыв (2) внутри нагретого слоя генерирует детонационную волну (5), распространяющуюся в направлении от источника излучения (направо), и волну быстрого горения (8), распространяющуюся навстречу источнику излучения (налево). Траектории самоподдерживаемых волн детонации и быстрого горения показаны тремя изотермами 1100.0 К, 2000.0 К и 3000.0 К.

Представленные в п. 4.4 результаты численного анализа указывают новый концептуальный путь контролируемого (с заданным местом и временем) прямого инициирования детонации в газе посредством лучистого нагрева химически нейтральных микрочастиц, взвешенных в горючей газообразной смеси. Структура слоя частиц полностью определяет параметры очага воспламенения (такие как, температурное распределение внутри слоя перед воспламенением) и, как следствие, режим развития теплового взрыва. Нагрев одиночного слоя равномерно распределенных в пространстве частиц принципиально может явиться источником детонационной волны, распространяющейся в заданном направлении. Неоднородности в пространственном распределении частиц определяют принципиальные изменения в режимах воспламенения и формирования детонации, что, в частности, может способствовать изотропному распространению детонационной волны.

В **п. 4.5** содержатся заключение и выводы к Главе 4.

Пятая глава диссертации посвящена детальному анализу процесса перехода горения в детонацию в газообразных смесях. Проведен детальный анализ развития фронта пламени на стадии его существенного ускорения до скоростей порядка скорости звука в продуктах горения. Сформулирована классификация режимов распространения быстрых пламен в каналах и трубах. Определены механизмы формирования так называемого “запертого пламени”, описана структура таких пламен и сформулированы критерии их устойчивости. На основе полученных данных сформулирована методика построения критериев реализации того или иного режима быстрого горения путем параметрического анализа характеристик горения в процессе распространения пламени. Изучены особенности развития горения в загроможденных каналах и построенная методика оценки критериев перехода к детонации дополнена геометрическим критерием. Решена задача о развитии горения в замкнутом объеме в условиях взаимодействия с ударными волнами. Проведена классификация возможных режимов перехода к детонации и сформулированы механизмы генерации сверхвысоких

давлений. Отдельно изучены особенности ускорения свободно расходящихся пламен и сформулирован механизм перехода к детонации в открытых пространствах. Представленные в настоящей главе материалы являются результатами исследований, проведенных автором и опубликованных в работах [IV; V; VIII; XXVII—XXXVII].

В п. 5.1 представлен современный подробный обзор режимов сверхзвукового горения в каналах. Наиболее часто рассматриваемой постановкой задачи об исследовании ускорения пламени и ПГД является распространение пламени в канале от закрытого торца (рисунок 7(a,b)). При этом, как правило, предварительно перемешанная газообразная смесь воспламеняется с использованием источников малой энергии (таких как, например, свеча зажигания), расположенных вблизи закрытого торца канала. В общем случае в таких условиях можно наблюдать четыре основные стадии развития процесса: (1) экспоненциальное ускорение, (2) квазистационарное пламя, (3) вторичное ускорение и (4) либо установление высокоскоростного квазистационарного пламени, либо формирование волны самовоспламенения, либо ПГД. Различные сценарии развития процесса на финальной стадии связаны с особенностями развития горения на стадии развития горения в режиме, так называемого, “запертого пламени” (“flame choking”), детально проанализированной в настоящей работе. Схожие условия также могут быть достигнуты в результате распада детонации (например при ее перепуске из широкого канала в узкий) (рисунок 7(c,d)).

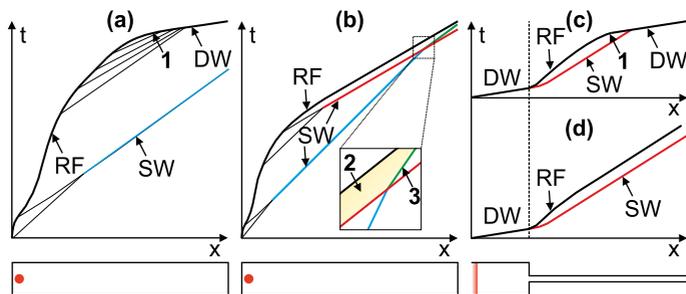


Рис. 7 — Схематичное описание возможных режимов высокоскоростного горения, сформированных в результате ускорения пламени (a), (b) или в результате перепуска детонации (c), (d). RF – фронт реакции (фронт пламени), SW – ударная волна, DW – детонационная волна, 1 – точка реализации ПГД непосредственно на фронте пламени, 2 – область преднагрева между ведущей ударной волной и фронтом реакции, где может произойти независимое воспламенение, 3 – контактный разрыв, сформированный в результате взаимодействия двух следующих друг за другом ударных волн. Нижние сегменты на рисунке показывают начальные условия в постановке задач.

П. 5.2 посвящен определению структуры так называемого “запертого пламени”, формируемого в результате ускорения пламени в канале на финальной

стадии, предшествующей переходу к детонации, на которой скорость пламени достигает величины порядка скорости звука в продуктах горения (a_b). Используя подход к анализу эволюции процесса и результаты, изложенные в п. 1.4, продемонстрированы особенности развития ускоряющегося пламени на заключительной стадии ускорения. В частности, показана независимость динамики пламени от волновых процессов, развивающихся в области за фронтом пламени. Другой особенностью на этой стадии является наличие области внутри фронта пламени, в которой волны сжатия, излучаемые в направлении распространения пламени, оказываются заперты, что обеспечивает дополнительное сжатие смеси, поступающей во фронт горения. В виду того, что дополнительное сжатие вызывает изменения в скорости горения и интегральном выходе энергии в зоне реакции, устойчивость структуры запертого пламени полностью зависит от особенностей кинетики горения при непрерывном сжатии. В общем случае возможны два пути развития запертого пламени, условно обозначим их как устойчивый и неустойчивый. В первом случае реализуется самоподдерживаемое ускорение запертого пламени, и происходит совместный экспоненциальный рост скорости пламени и давления. В итоге, на масштабах волны реакции формируется сильная ударная волна, ведущая к формированию детонации непосредственно на фронте пламени согласно механизму, впервые предложенному в работе [9]. В случае, если запертое пламя оказывается неустойчивым, устанавливается квазистационарный режим распространения пламени с околосвуковой скоростью. Здесь следует отметить, что в менее активных смесях (например, в обедненных составах или в смесях при пониженном давлении) достаточное ускорение потока может быть достигнуто только на относительно протяженных временах и, соответственно, в условиях существенно большей степени сжатия смеси посредством волн сжатия, излучаемых ускоряющимся пламенем. В таких условиях, температура перед фронтом квазистационарного пламени может достичь температуры самовоспламенения.

Приняв во внимание все выше освещенные факты можно сделать вывод, что имеет место прямое соответствие между реактивностью смеси и возможностью реализации различных высокоскоростных режимов горения. Так как сжатие свежей смеси перед ускоряющимся фронтом пламени происходит посредством последовательности волн сжатия, состояние смеси непосредственно перед фронтом пламени может быть оценено на основе соотношения Гюгонно для ударной волны, также являющейся результатом сложения распространяющихся друг за другом волн сжатия. Этот факт может быть наглядно подтвержден на основе анализа экспериментальных [10] и расчетных данных о параметрах потока перед фронтом пламени. В виду этого, оправдано предложение, использовать расчеты характеристик горения вдоль ударной адиабаты для оценки критериев формирования того или иного режима высокоскоростного горения.

В п. 5.3 представлены результаты расчетов развития запертого пламени в устойчивом и неустойчивом режиме. Показано, что в водородо-кислородной смеси переход от устойчивого режима с переходом в детонацию к неустойчивому

происходит при понижении давления (рисунок 8). Это связано с особенностями развития кинетики горения водорода в условиях дополнительного сжатия смеси и отражает полученные в п. 5.2 результаты.

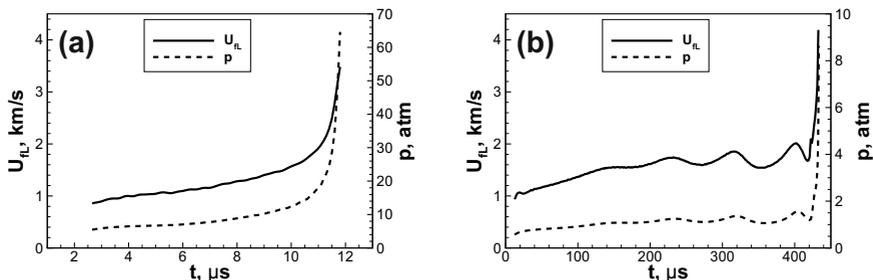


Рис. 8 — Хронограмма скорости пламени (сплошная линия) и пикового давления (штриховая). (а) — Запертое пламя в стехиометрической водород-кислородной смеси при нормальном давлении, (б) — при пониженном давлении в 0.1 атм.

В п. 5.4 на основе представленных в п. 5.2 результатов проведены расчеты критериев реализации различных режимов высокоскоростного горения в каналах для водородо-кислородной, водородно-воздушной, ацетилено-воздушной и ацетилено-кислородной смесями. Проведенный параметрический анализ показал хорошее согласие расчетных значений с доступными экспериментальными данными по сценариям и критериям перехода к детонации в рассмотренных смесях. Таким образом, предложенные в рамках проведенных исследований критерии достоверно отражают экспериментальные наблюдения и могут быть положены в основу методики расчета критериев перехода к детонации в газообразных смесях.

П. 5.5 посвящен анализу процесса перехода к детонации в загроможденном канале.

В п. 5.5.1 представлены расчеты процесса распространения пламени в загроможденном канале, выявлены особенности развития пламени на стадии, предшествующей переходу в детонацию. В частности показано, что режим запертого пламени если и реализуется в условиях загроможденного канала, то в течении конечного промежутка времени в виду влияния поперечных ударных волн, формируемых в результате взаимодействия ведущей ударной волны с препятствиями. Более того, показано, что в загроможденном канале определяющую роль в процессе формирования детонации играют препятствия. Согласно экспериментальным данным [11], основным механизмом перехода горения в детонацию является взаимодействие ударных волн с препятствиями. В ходе такого взаимодействия смесь дополнительно сжимается в отраженной ударной волне, и при условии, что время воспламенения сжатой смеси окажется меньше характерного времени разгрузки сжатого слоя вблизи поверхности препятствия, происходит локальное воспламенение смеси [12]. Последовательность

таких независимых воспламенений перед фронтом пламени способствует дополнительному ускорению процесса сгорания смеси, а следовательно, и более интенсивному нарастанию давления, равно как и к росту интенсивности ударных волн. В результате становится возможным формирование детонации от очередного очага воспламенения,

В п. 5.5.2 представлена методика расчета критериев перехода к детонации в загроможденном канале на основании методики, предложенной в пп. 5.2-5.4 и модифицированной с учетом результатов, освещенных в п. 5.5.1. Критерии, оцененные согласно сформулированной выше методике изображены на рисунке 9 на фоне экспериментальных данных для водородно-воздушных смесей. Из анализа представленных данных можно явно видеть, что оцениваемые по предложенной методике критические условия находятся в хорошем согласии с доступными экспериментальными данными. Это может трактоваться как подтверждение корректности предложенной методики. Без сомнения, имеют место погрешности экспериментальных постановок и измерений, равно как и погрешности в моделях химической кинетики, используемых при параметрическом исследовании. Однако, предсказания находятся в весьма хорошем согласии с экспериментальными данными, и, следовательно, можно сделать вывод, что основные особенности развития потока и пламени описаны с хорошей степенью точности.

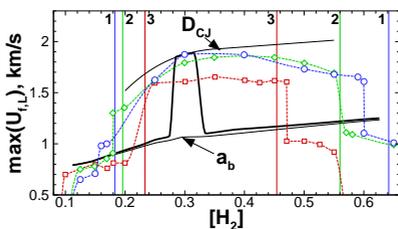


Рис. 9 — Диаграмма высокоскоростных режимов горения водородно-воздушных смесей. Значки, соединенные тонкими штриховыми линиями — экспериментальные данные из работы [13]. Жирная сплошная линия — максимальные скорости распространения горения, оцененные на основе предложенных выше химических критериев. Тонкие линии — расчетные данные по скорости звука в продуктах горения (a_b) и скорости самоподдерживаемой детонации ($D_{C,J}$). Вертикальные линии показывают совместное применение химического и геометрического критериев: 1, 2 и 3, рассчитанных для различных геометрий загроможденного канала. 1 — диаметр трубы $D_0 = 30$ см, $BR = 0.43$; 2 — $D_0 = 15$ см, $BR = 0.39$; 3 — $D_0 = 5$ см, $BR = 0.43$.

В п. 5.6 исследуется процесс взаимодействия пламени с ударными волнами, сгенерированными сторонними источниками. Показано, что воздействие

ударных волн различной интенсивности на фронт горения в замкнутом объеме (канале) ведет к качественно различным сценариям дальнейшего развития горения. Особо выделены ситуации, когда развитие процесса приводит к генерации достаточно высоких давлений, во много раз превышающих давления в падающей ударной волне. Максимально высокие давления в этом случае возникают в результате перехода горения в детонацию. Детальный анализ динамики перехода горения в детонацию, развивающегося по различным сценариям, показал, что наиболее общим механизмом перехода является локализация пика давления в зоне реакции. Сценарий перехода к детонации по механизму формирования “горячих точек” перед фронтом пламени наблюдается в относительно узком диапазоне начальных условий. Развитие детонации в таком режиме ведет к генерации еще более высоких давлений, превышающих давление в переходе горения в детонацию на фронте, а вероятность реализации такого сценария растет с переходом к менее активным смесям.

В п. 5.7 представлены результаты исследования процесса ускорения пламени и перехода горения в детонацию в закрытом объеме. Полученные результаты позволяют ввести классификацию импульсных нагрузок на поверхность, ограничивающую заполненный горючей смесью объем, при развитии горения в этом объеме. Механизмы формирования сверхзвуковых нестационарных режимов горения, включая переход к детонации, определяются характером распространения волн сжатия и слабых ударных волн, обеспечиваемым геометрией объема и ограничивающей его поверхности. В случае простейшей геометрии объема — плоского канала наиболее опасными режимами являются режимы перехода к детонации в непосредственной близости к нагружаемой поверхности (переднему торцу канала), что так же отмечалось в п. 5.6, посвященном задаче о генерации сверхвысоких давлений при взаимодействии пламени со стороны ударной волной. Это может быть достижимо при прямом переходе к детонации вблизи переднего торца или при формировании детонации в результате многократного ударно-волнового воздействия на фронт горения. Наименее опасными представляются режимы, в которых геометрически становятся возможными условия формирования стационарной волны детонации на расстоянии от нагружаемой поверхности.

П. 5.8 посвящен решению задачи о развитии свободно расходящегося пламени с последующим переходом горения в детонацию (ПГД) в высокоактивной горючей смеси. В отличие от случая горения в ограниченных объемах (каналах и трубах), где переход в детонацию воспроизводится на лабораторных масштабах для большого разнообразия горючих смесей, экспериментальных наблюдений перехода в детонацию при свободном распространении пламени практически нет, за исключением редких работ, таких как [14]. В результате анализа процесса развития пламени в водородо-кислородной смеси при повышенном давлении (10 атм) в постановке [14] сформулирован механизм формирования детонации в условиях развития свободно расходящегося пламени в высокоактивной

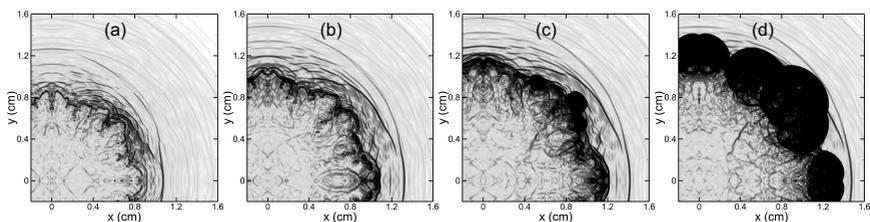


Рис. 10 — Волновая картина в окрестности фронта пламени на различные моменты времени: 37 мкс (а), 40 мкс (b), 41.5 мкс (c), 43.5 мкс (d). Показано поле модуля градиента плотности, белый цвет соответствует нулевому градиенту плотности, черный — максимальному.

газообразной смеси. Детонация в расходящемся пламени формируется в результате локальных особенностей развития возмущений на поверхности фронта пламени на линейной стадии за счет механизма гидродинамической неустойчивости. При этом во многом возможность ПГД определяется особенностями развития пламени, в частности частотой формирования на поверхности расширяющегося пламени возмущений с критической длиной волны, определяющей в свою очередь частоту генерации ударных волн (характерная картина течения в окрестности фронта пламени показана на рисунке 10). Согласно полученным в настоящей работе результатам следует ожидать, что ПГД в свободных пламенах может реализоваться лишь в крайне высокоактивных смесях.

В **п. 5.9** содержатся заключение и выводы к Главе 5.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. 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 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.
2. 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.

3. Определены основные газодинамические механизмы, определяющие формирование очагов воспламенения и возникновение детонации в реагирующей смеси в условиях одно- и двухкратного 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 роликовые 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.
4. 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 от локального воспламенения нагретого облака микрочастиц.
5. 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.
6. 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.
7. 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 много режима, апробированные с использованием доступных в литературе экспериментальных данных по сценариям и критериям перехода к детонации.
8. 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.
 9. Сформулирован механизм перехода горения в детонацию в свободном пространстве.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях из списка ВАК РФ

- I. *Иванов, М. Ф.* Об одном способе ускорения перехода от дефлаграции к детонации в газообразных горючих смесях / М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин, В. А. Гальбурт // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2008. — Т. 4. — С. 38—45.
- II. *Иванов, М. Ф.* Численное моделирование ускорения пламени путем дополнительного энерговложения перед фронтом горения / М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин, В. А. Гальбурт // Хим. Физика. — 2009. — Т. 28, № 5. — С. 35—39.
- III. *Иванов, М. Ф.* Влияние состава горючей смеси на развитие неустойчивости фронта пламени / М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин // Хим. Физика. — 2010. — Т. 29, № 2. — С. 48—54.
- IV. *Иванов, М. Ф.* Особенности распространения пламени в замкнутых объемах / М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин, Ю. В. Рыков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2010. — Т. 1. — С. 21—39.
- V. Воздействие акустического поля на развитие пламени и переход в детонацию / В. В. Голуб, Д. И. Бакланов, С. В. Головастов, К. В. Иванов, М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин, В. В. Володин // Теплофизика высоких температур. — 2010. — Т. 48, № 6. — С. 901—907.
- VI. *Ivanov, M. F.* The role of compression waves in flame acceleration and transition to detonation inside confined volumes / M. F. Ivanov, A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko // J. Phys.: Conf. Ser. — 2015. — Vol. 653. — P. 012062.
- VII. *Kiverin, A. D.* Modes of choked flame instability defined by the peculiarities of combustion kinetics at rising pressure / A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko // J. Phys.: Conf. Ser. — 2015. — Vol. 653. — P. 012061.
- VIII. *Kiverin, A. D.* On the structure and stability of supersonic hydrogen flames in channels / A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko, M. F. Ivanov // Int. J. Hydrogen Energy. — 2016. — Vol. 41. — P. 22465—22478.

- IX.** Analysis of transient combustion with the use of contemporary CFD techniques / V. Bykov, A. Kiverin, A. Koksharov, I. Yakovenko // *Comp. Fluids*. — 2019. — Vol. 194. — P. 104310.
- X.** *Lieberman, M.* On detonation initiation by a temperature gradient for a detailed chemical reaction models / M. Liberman, A. Kiverin, M. Ivanov // *Physics Letters A*. — 2011. — Vol. 375, issue 17. — P. 1803—1808.
- XI.** *Lieberman, M. A.* Regimes of chemical reaction waves initiated by nonuniform initial conditions for detailed chemical reaction models / M. A. Liberman, A. D. Kiverin, M. F. Ivanov // *Physical Review E*. — 2012. — Vol. 85, issue 5. — P. 056312.
- XII.** Mechanisms of ignition by transient energy deposition: Regimes of combustion wave propagation / A. D. Kiverin, D. R. Kassoy, M. Ivanov, M. A. Liberman // *Physical Review E*. — 2013. — Vol. 87, issue 3. — P. 033015.
- XIII.** От горения и детонации к окислам азота / М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин, Б. А. Клумов, В. Е. Фортгов // *Усп. физ. наук*. — 2014. — Т. 184, № 3. — С. 247—264.
- XIV.** *Kiverin, A. D.* Evolution of wave patterns and temperature field in shock-tube flow / A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko // *Physical Review Fluids*. — 2018. — Vol. 3, no. 5. — P. 053201.
- XV.** *Kiverin, A.* On the mechanism of flow evolution in shock-tube experiments / A. Kiverin, I. Yakovenko // *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*. — 2018. — Vol. 382, no. 5. — P. 309—314.
- XVI.** *Kiverin, A.* Ignition and detonation onset behind incident shock wave in the shock tube / A. Kiverin, I. Yakovenko // *Combust. Flame*. — 2019. — Vol. 204. — P. 227—236.
- XVII.** *Kiverin, A.* Modes of mild ignition in shock tubes: origins and classification / A. Kiverin, K. Minaev, I. Yakovenko // *Combustion and Flame*. — 2020. — Vol. 221. — P. 420—428.
- XVIII.** *Киверин, А.* Два механизма очагового воспламенения в ударных трубах / А. Киверин, К. Минаев, И. Яковенко // *Химическая Физика*. — 2020. — Т. 39, № 8. — С. 16—20.
- XIX.** *Drakon, A.* Temperature perturbations evolution as a possible mechanism of exothermal reaction kernels formation in shock tubes / A. Drakon, A. Kiverin, I. Yakovenko // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2016. — Vol. 774, no. 1. — P. 012092.
- XX.** *Иванов, М. Ф.* Влияние поглощения излучения микрочастицами на скорость пламени и режимы горения / М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин, М. А. Либерман // *ЖЭТФ*. — 2015. — Т. 148, № 1. — С. 190—204.

- XXI.** *Ivanov, M. F.* Ignition of deflagration and detonation ahead of the flame due to radiative preheating of suspended micro particles / M. F. Ivanov, A. D. Kiverin, M. A. Liberman // *Combustion and Flame*. — 2015. — Vol. 162, no. 10. — P. 3612–3621.
- XXII.** *Иванов, М. Ф.* Аномальное распространение пламени в горючих газозвесах / М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин, С. Г. Пиневиц // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. — 2015. — Т. 5. — С. 51–68.
- XXIII.** Mechanisms of direct detonation initiation via thermal explosion of radiatively heated gas-particles layer / V. P. Efremov, M. F. Ivanov, A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko // *Results in Physics*. — 2015. — Vol. 5. — P. 290–296.
- XXIV.** Объемное инициирование газовой детонации путем лучистого нагрева взвешенных в газе микрочастиц / В. П. Ефремов, М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин, И. С. Яковенко // *Письма ЖТФ*. — 2016. — Т. 42, № 4. — С. 52–59.
- XXV.** *Ivanov, M.* On the formation of new ignition kernels in the chemically active dispersed mixtures / M. Ivanov, A. Kiverin // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2015. — Vol. 653, no. 1. — P. 012060.
- XXVI.** Direct initiation of gaseous detonation via radiative heating of microparticles volumetrically suspended in the gas / V. P. Efremov, M. F. Ivanov, A. D. Kiverin, I. Yakovenko // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2015. — Vol. 653. — P. 012063.
- XXVII.** *Kiverin, A. D.* Estimation of critical conditions for deflagration-to-detonation transition in obstructed channels filled with gaseous mixtures / A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko // *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*. — 2018. — Vol. 13, no. 6. — P. 54.
- XXVIII.** *Kiverin, A. D.* Regimes of High-Speed Hydrogen Flame Propagation in Channels: Classification and Criteria of Realization / A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko // *Combustion Science and Technology*. — 2020. — Vol. 192, no. 1. — P. 112–129.
- XXIX.** *Киверин, А.* Высокоскоростные режимы распространения пламени в канале и переход к детонации / А. Киверин, И. Яковенко // *Теплофизика высоких температур*. — 2020. — Т. 58, № 4. — С. 707–716.
- XXX.** *Киверин, А.* Классификация сценариев развития быстрых волн горения и перехода горения в детонацию в каналах / А. Киверин, А. Смыгина, И. Яковенко // *Химическая Физика*. — 2020. — Т. 39, № 8. — С. 9–15.
- XXXI.** *Kiverin, A. D.* On the mechanisms and criteria of deflagration-to-detonation transition in gases / A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko, M. F. Ivanov // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2016. — Vol. 754, no. 5. — P. 052002.

- XXXII.** *Киверин, А. Д.* Режимы сверхзвукового распространения пламени в канале и критерии их реализации / А. Д. Киверин, И. С. Яковенко, М. Ф. Иванов // Горение и взрыв. — 2017. — Т. 10, № 4. — С. 17—22.
- XXXIII.** *Ivanov, M. F.* A computational study of the external shock-wave impact on the combustion regime / M. F. Ivanov, A. D. Kiverin, V. A. Galburt // Combustion science and technology. — 2010. — Vol. 182, no. 11/12. — P. 1683—1692.
- XXXIV.** *Иванов, М. Ф.* О генерации высоких давлений при взаимодействии пламени с ударными волнами / М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин // Теплофизика высоких температур. — 2015. — Т. 53, № 5. — С. 703—712.
- XXXV.** *Киверин, А.* Механизм формирования детонации при свободном распространении пламени в неограниченном пространстве / А. Киверин, И. Яковенко, В. Фортов // Доклады Академии наук. — 2019. — Т. 489, № 5. — С. 461—464.
- XXXVI.** *Kiverin, A.* Mechanism of Transition to Detonation in Unconfined Volumes / A. Kiverin, I. Yakovenko // Acta Astronautica. — 2020. — Vol. 176. — P. 647—652.
- XXXVII.** *Киверин, А. Д.* Переход к детонации в свободно распространяющихся пламенах / А. Д. Киверин, И. С. Яковенко // Горение и взрыв. — 2020. — Т. 13, № 1. — С. 47—54.

Список литературы

1. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. — М. : Наука, 1980. — 478 с.
2. *Zeldovich, Y. B.* Regime classification of an exothermic reaction with nonuniform initial conditions / Y. B. Zeldovich // Combustion and Flame. — 1980. — Vol. 39, no. 2. — P. 211—214.
3. *Troshin, Y.* The generalized Hugoniot adiabetic curve / Y. Troshin // Symposium (International) on Combustion. — 1958. — Vol. 7, no. 1. — P. 789—798.
4. *Zeldovich, Y.* Flame propagation in a substance reacting at initial temperature / Y. Zeldovich // Combust. Flame. — 1980. — Vol. 39, no. 3. — P. 219—224.
5. *Ng, H. D.* Direct initiation of detonation with a multi-step reaction scheme / H. D. Ng, J. H. Lee // Journal of Fluid Mechanics. — 2003. — Vol. 476. — P. 179—211.

6. Magnetic Field Influence on the Gas Detonation Induced by Spark Discharge / V. S. Aksenov, D. I. Baklanov, S. V. Golovastov, V. V. Golub, V. P. Efremov, A. S. Saveliev, V. V. Volodin // *Flow, turbulence and combustion*. — 2010. — Vol. 84, no. 4. — P. 607—616.
7. *Bazhenova, T.* Gas ignition behind shock waves / T. Bazhenova, R. Soloukhin // *7th Symposium (International) on Combustion*. — Butterworths, London : Combustion Institute, 1959. — P. 866—875.
8. *Edwards, D. H.* Initiation of detonation by steady planar incident shock waves / D. H. Edwards, G. O. Thomas, T. L. Williams // *Combust. Flame*. — 1981. — Vol. 43, no. 1. — P. 187—198.
9. Механизм ускорения пламени и переход в детонация в водородно-кислородной смеси в канале / М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин, М. А. Либберман, В. Е. Фортов // *Доклады Академии Наук*. — 2010. — Т. 434, № 6. — С. 1—4.
10. Flame acceleration and DDT run-up distance for smooth and obstacles filled tubes / M. Silvestrini, B. Genova, G. Parisi, F. Leon Trujillo // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2008. — Vol. 21, no. 5. — P. 555—562.
11. *Kellenberger, M.* Propagation mechanisms of supersonic combustion waves / M. Kellenberger, G. Ciccarelli // *Proc. Combust. Inst.* — 2015. — Vol. 35, no. 2. — P. 2109—2116.
12. On critical conditions for detonation initiation by shock reflection from obstacles / G. Thomas, S. Ward, R. Williams, R. Bambrey // *Shock Waves*. — 2002. — Vol. 12, no. 2. — P. 111—119.
13. *Peraldi, O.* Criteria for transition to detonation in tubes / O. Peraldi, R. Knystautas, J. Lee // *Proc. Combust. Inst.* — 1988. — Vol. 21, no. 1. — P. 1629—1637.
14. *Зельдович, Я. Б.* Об условиях возникновения неустойчивости нормального горения / Я. Б. Зельдович, А. И. Розловский // *ДАН СССР*. — 1947. — Т. 57, № 4. — С. 365—368.

Киверин Алексей Дмитриевич

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ В
ГАЗООБРАЗНЫХ И ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ

Автореф. дис. на соискание ученой степени д.ф.-м.н.

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 2. Тираж 100 экз.

Типография _____