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

На правах рукописи
УДК 534.222.2

Киверин Алексей Дмитриевич

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

Специальность 01.04.14 —
«Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Диссертация на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва — 2021

Оглавление

Стр.

Введение 5

Глава 1. Горение газообразных смесей в закрытых объемах 16
1.1 Дефлаграционное горение 17
1.2 Математическая модель нестационарного горения 18
1.3 Стационарное горение и нормальная скорость ламинарного пламени 21
1.4 Неустойчивость дефлаграционного пламени 24
1.5 Ускорение пламени в полуоткрытом канале 31
1.6 Пламя в полностью закрытом канале, термоакустическая неустойчивость, ячеистое пламя 35
1.7 Требования к выбору вычислительной методики при математическом моделировании нестационарного горения 44
1.8 Заключение к главе 46

Глава 2. Воспламенение и механизмы инициирования детонации газообразных смесей 57
2.1 Механизм нестационарного теплового взрыва в очаге 57
2.2 Классификация режимов инициирования волн горения и детонации 59
2.2.1 Классификация по Я.Б. Зельдовичу 59
2.2.2 Постановка задачи численного моделирования 61
2.2.3 Анализ динамики развития режимов нестационарного теплового взрыва, параметрическое исследование и уточненная классификация 62
2.3 Инициирование горения и детонации локализованным источником энергии 74
2.3.1 Постановка задачи численного моделирования 76
2.3.2 Параметрическое исследование и классификация режимов воспламенения в зависимости от параметров источника энергии 78
2.3.3 Оценка критической энергии инициирования детонации . . 89

Стр.

2.4 Заключение к главе 92

Глава 3. Воспламенение и детонация в ударных трубах. 94

3.1 Обзор режимов воспламенения газообразных смесей в ударных трубах. 95

3.2 Особенности постановки задачи численного моделирования. 102

3.3 Эволюция пограничного слоя в потоке за падающей ударной волной. 105

3.4 Инициирование горения за падающей ударной волной и формирование детонационной волны. 108

3.5 Многоочаговое воспламенение и детонация в смесях меньшей химической активности. 114

3.6 Структура потока и очаговое воспламенение за отраженной ударной волной. 115

3.7 Особенности регистрации режимов формирования детонации. . . . 119

3.8 Заключение к главе. 125

Глава 4. Горение и детонация дисперсных сред. 143

4.1 Воспламенение и горение газообразной среды, содержащей твердые микрочастицы. 144

4.2 Модель горения дисперсной газообразной среды. 146

4.3 Взаимодействие пламени с облаком взвешенных в газе микрочастиц. 149

4.4 Инициирование горения и детонации путем лучистого нагрева облака взвешенных частиц. 160

4.5 Заключение к главе. 171

Глава 5. Переход горения в детонацию 184

5.1 Обзор режимов сверхзвукового горения в каналах. 185

5.2 Ускорение потока в процессе распространения пламени и запертое пламя в гладком канале. 190

5.3 Переход горения в детонацию в высокоактивной и низкоактивной смесях. 198

Стр.

5.4 Расчет базовых критериев перехода горения в детонацию в газообразных смесях. 205
5.5 Переход горения в детонацию в загроможденном канале. 212
5.5.1 Механизм перехода к детонации в загроможденном канале. 212
5.5.2 Расчет пределов перехода к детонации в загроможденных каналах. 218
5.6 Переход горения в детонацию в результате внешнего ударно-волнового воздействия. 221
5.6.1 Постановка задачи. 221
5.6.2 Классификация режимов перехода к детонации. 225
5.6.3 Механизмы формирования детонации. 230
5.7 Переход горения в детонацию в закрытом объеме. 233
5.8 Переход горения в детонацию в открытом пространстве. 238
5.9 Заключение к главе. 243

Заключение 273

Список литературы 276

Введение

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 является важным 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 энергоэффективное 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. Также в работе исследованы механизмы воспламенения и инициирования детонации при объемном энерговыделении и при ударноволновом воздействии на реагирующую среды. 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.

Цель и задачи. Целью работы является определение 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.

Практическая значимость. Разработанные рекомендации к выбору вычислительных алгоритмов для математического моделирования нестационарных режимов горения в замкнутых объемах могут быть использованы для повы-

шения 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. Принципиальным для изучения кинетики горения и интерпретации специализированных экспериментов являются полученные в рамках диссертационного исследования данные о развитии потока в реакторе на основе ударной трубы и о механизмах неоднородного воспламенения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Механизмы развития пламени в замкнутых объемах, включая механизм ускорения пламени за счет взаимодействия с генерируемыми им волнами сжатия.
2. Механизмы формирования волн реакции, включая детонацию, при локализованном подводе энергии.
3. Критерий перехода к детонации при варьировании параметров источника энергии.
4. Газодинамический механизм формирования очагов воспламенения в ударных трубах.
5. Механизм формирования детонации в потоке за ударной волной.
6. Механизм многоочагового воспламенения за ударной волной, распространяющейся в канале.
7. Концепция локального инициирования теплового взрыва в реагирующей газообразной среде путем дистанционного нагрева облака микрочастиц от источника лучистой энергии.
8. Механизмы формирования волн горения и детонации в нагретых двухфазных облаках, в том числе многоочаговое воспламенение.

9. Классификация режимов распространения быстрых волн горения.
10. Механизм распространения быстрого пламени в режиме “запертого пламени”, включая структуру “запертого пламени” и условия его устойчивости.
11. Методика расчета критериев перехода к детонации в газообразных смесях, включая переход к детонации в загроможденных объемах.
12. Результаты расчетов критерия перехода к детонации в смесях на основе водорода и ацетилена.
13. Механизмы генерации сверхвысоких давлений при переходе в детонацию в замкнутых объемах.
14. Механизм перехода в детонацию в открытых объемах.

Достоверность Сделанные в работе выводы основаны на разностороннем 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. 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 модели-

ровании 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. Kassoy. 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), Забабахинские 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) и на Ученом Совете ОИВТ РАН (10.12.2018).

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

Публикации автора по теме диссертации

1. *Иванов*, *М. Ф.* Об одном способе ускорения перехода от дефлаграции к детонации в газообразных горючих смесях [текст] / М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин, В. А. Гальбурт // Вестник МГТУ им. Н.Э Баумана. — 2008. — т. 4. — с. 38—45.
2. *Иванов*, *М. Ф.* Численное моделирование ускорнеия пламени путем дополнительного энерговложения перед фронтом горения [текст] / М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин, В. А. Гальбурт // Хим. Физика. — 2009. — т. 28, № 5. — с. 35—39.
3. *Иванов*, *М. Ф.* Влияние состава горючей смеси на развитие неустойчивости фронта пламени [текст] / М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин // Хим. Физика. — 2010. — т. 29, № 2. — с. 48—54.
4. *Иванов*, *М. Ф.* Особенности распространения пламени в замкнутых объемах [текст] / М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин, Ю. В. Рыков // Вестник МГТУ им. Н.Э Баумана. — 2010. — т. 1. — с. 21—39.
5. Воздействие акустического поля на развитие пламени и переход в детонацию [текст] / В. В. Голуб [и др.] // ТВТ. — 2010. — т. 48, № 6. — с. 901—907.
6. *Ivanov*, *M. F.* The role of compression waves in flame acceleration and transition to detonation inside confined volumes [текст] / M. F. Ivanov, A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko // J. Phys.: Conf. Ser. — 2015. — Vol. 653. — P. 012062.
7. *Kiverin*, *A. D.* Modes of chocked flame instability defined by the peculiarities of combustion kinetics at rising pressure [текст] / A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko // J. Phys.: Conf. Ser. — 2015. — Vol. 653. — P. 012061.
8. *Kiverin*, *A. D.* On the structure and stability of supersonic hydrogen flames in channels [текст] / A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko, M. F. Ivanov // Int. J. Hydrogen Energy. — 2016. — Vol. 41. — P. 22465—22478.
9. Analysis of transient combustion with the use of contemporary CFD techniques [текст] / V. Bykov [et al.] // Comp. Fluids. — 2019. — Vol. 194. — P. 104310.

10. *Kiverin, A. D.* Evolution of wave patterns and temperature field in shock-tube flow [текст] / A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko // Physical Review Fluids. — 2018. — т. 3, № 5. — с. 053201.

11. *Kiverin, A.* On the mechanism of flow evolution in shock-tube experiments [текст] / A. Kiverin, I. Yakovenko // Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics. — 2018. — т. 382, № 5. — с. 309—314.

12. *Liberman, M.* On detonation initiation by a temperature gradient for a detailed chemical reaction models [текст] / M. Liberman, A. Kiverin, M. Ivanov // Physics Letters A. — 2011. — т. 375, вып. 17. — с. 1803—1808. — URL: http://doi.org/10.1016/j.physleta.2011.03.026.

13. *Liberman, M. A.* Regimes of chemical reaction waves initiated by nonuniform initial conditions for detailed chemical reaction models [текст] / M. A. Liberman, A. D. Kiverin, M. F. Ivanov // Physical Review E. — 2012. — т. 85, вып. 5. — с. 056312. — URL: http://doi.org/10.1103/physreve.85.056312.

14. Mechanisms of ignition by transient energy deposition: Regimes of combustion wave propagation [текст] / A. D. Kiverin [и др.] // Physical Review E. — 2013. — т. 87, вып. 3. — с. 033015. — URL: http://doi.org/10.1103/physreve.87.033015.

15. От горения и детонации к окислам азота [текст] / М. Ф. Иванов [и др.] // Усп. физ. наук. — 2014. — т. 184, № 3. — с. 247—264. — URL: https://ufn.ru/ru/articles/2014/3/d/.

16. *Kiverin, A.* Ignition and detonation onset behind incident shock wave in the shock tube [текст] / A. Kiverin, I. Yakovenko // Combust. Flame. — 2019. — т. 204. — с. 227—236. — URL: http://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.03.012.

17. *Kiverin, A.* Modes of mild ignition in shock tubes: origins and classification [текст] / A. Kiverin, K. Minaev, I. Yakovenko // Combustion and Flame. — 2020. — т. 221. — с. 420—428.

18. *Киверин, А.* Два механизма очагового воспламенения в ударных трубах [текст] / А. Киверин, К. Минаев, И. Яковенко // Химическая Физика. — 2020. — т. 39, № 8. — с. 16—20.

19. *Drakon*, *A.* Temperature perturbations evolution as a possible mechanism of exothermal reaction kernels formation in shock tubes [текст] / A. Drakon, A. Kiverin, I. Yakovenko //. т. 774. — IOP Publishing. 2016. — с. 012092.

20. Mechanisms of direct detonation initiation via thermal explosion of radiatively heated gas-particles layer [текст] / V. P. Efremov [et al.] // Results in Physics. — 2015. — Vol. 5. — P. 290—296.

21. *Иванов*, *М. Ф.* Влияние поглощения излучения микрочастицами на скорость пламени и режимы горения [текст] / М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин, М. А. Либерман // ЖЭТФ. — 2015. — т. 148, № 1. — с. 190—204.

22. *Ivanov*, *M. F.* Ignition of deflagration and detonation ahead of the flame due to radiative preheating of suspended micro particles [текст] / M. F. Ivanov, A. D. Kiverin, M. A. Liberman // Combustion and Flame. — 2015. — т. 162, № 10. — с. 3612—3621.

23. *Иванов*, *М. Ф.* Аномальное распространение пламени в горючих газовзвесях [текст] / М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин, С. Г. Пиневич // Вестник МГТУ им. Н.Э Баумана. — 2015. — т. 5. — с. 51—68.

24. Объемное инициирование газовой детонации путем лучистого нагрева взвешенных в газе микрочастиц [текст] / В. П. Ефремов [и др.] // Письма ЖТФ. — 2016. — т. 42, № 4. — с. 52—59.

25. *Ivanov*, *M.* On the formation of new ignition kernels in the chemically active dispersed mixtures [текст] / M. Ivanov, A. Kiverin //. т. 653. — IOP Publishing. 2015. — с. 012060.

26. Direct initiation of gaseous detonation via radiative heating of microparticles volumetrically suspended in the gas [текст] / V. P. Efremov [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. — 2015. — Vol. 653. — P. 012063.

27. *Kiverin*, *A. D.* Estimation of critical conditions for deflagration-to-detonation transition in obstructed channels filled with gaseous mixtures [текст] / A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko // Mathematical Modelling of Natural Phenomena. — 2018. — т. 13, № 6. — с. 54.

28. *Kiverin*, *A. D.* Regimes of High-Speed Hydrogen Flame Propagation in Channels: Classification and Criteria of Realization [текст] / A. D. Kiverin, I. S. Yakovenko // Combustion Science and Technology. — 2020. — т. 192, № 1. — с. 112—129.

29. *Киверин, А.* Высокоскоростные режимы распространения пламени в канале и переход к детонации [текст] / А. Киверин, И. Яковенко // Теплофизика высоких температур. — 2020. — т. 58, № 4. — с. 707—716.

30. *Киверин, А.* Классификация сценариев развития быстрых волн горения и перехода горения в детонацию в каналах [текст] / А. Киверин, А. Смыгалина, И. Яковенко // Химическая Физика. — 2020. — т. 39, № 8. — с. 9—15.

31. *Kiverin, A.* On the mechanisms and criteria of deflagration-to-detonation transition in gases [текст] / A. Kiverin, I. Yakovenko, M. Ivanov //. т. 754. — IOP Publishing. 2016. — с. 052002.

32. *Киверин, А. Д.* Режимы сверхзвукового распространения пламени в канале и критерии их реализаци [текст] / А. Д. Киверин, И. С. Яковенко, М. Ф. Иванов // Горение и взрыв. — 2017. — т. 10, № 4. — с. 17—22.

33. *Ivanov, M.* A computational study of the external shock-wave impact on the combustion regime [текст] / M. Ivanov, A. Kiverin, V. Galburt // Combustion science and technology. — 2010. — т. 182, № 11/12. — с. 1683—1692.

34. *Иванов, М. Ф.* О генерации высоких давлений при взаимодействии пламени с ударными волнами [текст] / М. Ф. Иванов, А. Д. Киверин // Теплофизика высоких температур. — 2015. — т. 53, № 5. — с. 703—712.

35. *Киверин, А.* Механизм формирования детонации при свободном распространении пламени в неограниченном пространстве [текст] / А. Киверин, И. Яковенко, В. Фортов // Доклады Академии наук. — 2019. — т. 489, № 5. — с. 461—464.

36. *Kiverin, A.* Mechanism of Transition to Detonation in Unconfined Volumes [текст] / A. Kiverin, I. Yakovenko // Acta Astronautica. — 2020. — т. 176. — с. 647—652.

37. *Киверин, А. Д.* Переход к детонации в свободно распространяющихся пламенах [текст] / А. Д. Киверин, И. С. Яковенко // Горение и взрыв. — 2020. — т. 13, № 1. — с. 47—54.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 300 страниц, включая 120 рисунков. Список литературы содержит 253 наименования.