

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора ИТПМ СО РАН



« _____ » 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации, Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН

на диссертационную работу Киверина Алексея Дмитриевича

«Нестационарные режимы горения и формирования детонации в газообразных и дисперсных средах» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

В диссертационном исследовании Киверина А.Д. методами математического моделирования изучены и систематизированы механизмы воспламенения, переходных режимов горения и формирования детонации в газообразных и дисперсных средах. В частности, в работе рассмотрены проблемы нестационарного развития волн горения в закрытых объемах, исследованы механизмы инициирования детонации водородных смесей, изучены вопросы воспламенения и детонации в ударных трубах, а также горение и детонация дисперсных сред и механизмы перехода горения в детонацию.

Актуальность исследований газовой детонации обусловлена как вопросами взрыво- и пожаробезопасности, так и возможностью использования явления детонации в новых поколениях энергоустановок и двигателей. Более глубокое понимание фундаментальных физических механизмов исследованных в диссертации явлений, связанных с газовой детонацией, поможет, с одной стороны, разработке мер по предотвращению взрывов горючих газов при их транспортировке, хранении и использовании в производстве. С другой стороны такое понимание позволит управлять детонацией в технических устройствах.

Научная новизна работы выражена в получении более полной картины развития очагов воспламенения и детонации при локальном подводе энергии реагирующей среде, а также детальном описании эволюции потока в ударной трубе и формирования очагов воспламенения на неоднородностях течения. Кроме того, предложен новый подход к инициированию детонационной волны в газовой среде путем лучистого нагрева инертных микрочастиц, взвешенных в объеме. В работе впервые изучена структура так называемого «запертого пламени», развивающегося на стадии ускорения пламени и предшествующей переходу в детонацию. Проведена систематизация и классификация возможных режимов развития высокоскоростного пламени в ограниченном объеме, предложена методика расчета пределов перехода к детонации в газообразных смесях. Впервые методами математического моделирования воспроизведен процесс перехода к детонации в свободном пространстве и предложен механизм перехода к детонации при распространении пламени в газообразной среде.

Теоретическая значимость работы обусловлена выявлением новых возможных режимов перехода горения в детонацию. Исследования, выполненные диссертантом, помогут фундаментально обоснованию пределов горения и детонации, а также корректной интерпретации экспериментальных исследований в этой области знаний.

В диссертации Киверина А.Д. в качестве рабочей среды рассмотрены водород-кислородные и водородовоздушные смеси. В последнее время изучение водорода как альтернативного носителя энергии привлекло внимание многих исследователей по всему миру. Низкие выбросы, высокая плотность энергии и широкий диапазон пределов воспламеняемости - уникальные характеристики этого топлива. Однако из-за высокой детонационной способности глубокое понимание процессов перехода горения в детонацию в водородных горючих смесях имеет большое значение. Предотвращение случайных взрывов и смягчение их последствий в процессе производства, хранения, обработки и использования чувствительных энергетических материалов, таких как водородные смеси, является наиболее практическим применением явления перехода горения в детонацию. Другой аспект этой проблемы – это контроль и оптимизация инициирования детонации в современных авиационных двигателях (т.е. импульсных детонационных двигателях), основанных на использовании этого явления.

Переход дефлаграции в детонацию является одним из наиболее вероятных типов начала детонации. При этом начальное ламинарное пламя ускоряется из-за взаимодействия с окружающей средой и устанавливается обратная связь по потоку непрореагировавшего газа, что приводит к формированию детонационной волны. Ламинарное пламя может ускориться до детонации из-за термодиффузионной неустойчивости или неустойчивости Ландау-Дарье, которые приводят к искривлению фронта и формированию трехмерного течения с ячеистой структурой. Таким образом, **практически** результаты работы могут быть использованы, как в организациях занимающихся вопросами взрыво-и пожаробезопасности и использования водорода в качестве альтернативного источника энергии, так и в исследовательских группах институтов Академии наук, изучающих явление детонации.

Проблемы горения и взрыва газовых сред изучаются уже более сто лет. Во **введении** автор диссертации выделяет три этапа развития науки в данном направлении от экспериментального выявления базовых сценариев развития горения и детонации до совместного экспериментального и численного моделирования данных явлений. Причем в последнее время с развитием вычислительной техники при моделировании появилась возможность использования высокоразрешающих численных схем и детальных кинетических механизмов химических реакций. Кроме того, во введении содержатся все формальные разделы, необходимые для представления диссертации. Следует отметить, что автор начинает каждую главу диссертации с литературного обзора по конкретной задаче текущего раздела.

Основной материал диссертации изложен в пяти главах. В **первой главе** диссертации автор рассматривает физические механизмы, ответственные за нестационарное развитие горения водород-кислородных и водородовоздушных смесей в замкнутых объемах. Представлена математическая модель нестационарного горения, используемая в дальнейших расчетах. Выполнено сравнение расчётов и экспериментов по зависимости нормальной скорости ламинарного пламени от концентрации водорода в смеси для плоского и сферического случаев. Исследовано развитие неустойчивости дефлаграционного пламени и показано различие сценариев ускорения пламени в водородовоздушной и водород-кислородной смесях. Изучено распространение пламени в полукрытом и закрытом канале. На основе анализа расчетных данных показано, что одну из ведущих ролей в развитии пламени в замкнутом объеме играют формируемые в

ходе горения акустические поля. Воздействие акустического поля на пламя приводит к интенсификации развития гидродинамической неустойчивости его фронта. Выявлен механизм передачи среде энергии и импульса волнами сжатия, что, в свою очередь, влияет на динамику фронта пламени, включая его ускорение. На основе полученных результатов рекомендовано для математического моделирования нестационарных режимов горения в замкнутых объемах использовать низкодиссипативные расчетные схемы типа схемы КАБАРЕ.

Во **второй главе** проведено моделирование задачи инициирования волн горения и детонации в газовой водородовоздушной и водород-кислородной смеси под действием градиента температуры и с помощью локального подвода энергии. В начале главы сделан экскурс в историю вопроса и дана классификация режимов инициирования волн горения и детонации по Я.Б. Зельдовичу. Далее решена задача спонтанного горения на градиенте температуры с учетом детального механизма протекания химических реакций. На основе анализа и параметрического исследования динамики развития режимов нестационарного теплового взрыва построена уточненная классификация режимов инициирования волн горения. Во второй части главы исследовано инициирование горения и детонации локализованным источником энергии различной длительности и интенсивности. Сформулированы базовые механизмы формирования волн реакции, включая детонацию, при локализованном подводе энергии, а также критерий перехода к детонации при варьировании параметров источника энергии.

Третья глава посвящена изучению воспламенения подготовленных газовых смесей в ударных трубах и представляет выносимые автором на защиту механизмы формирования очагов воспламенения через нестационарное развитие пограничного слоя за падающей ударной волной и формирования детонации в результате развития волны реакции при очаговом воспламенении. Основное внимание уделено режимам «мягкого воспламенения» за отраженными ударными волнами, которое реализуется при невысоких интенсивностях волн и недостаточно высоких температурах смеси.

В начале главы выполнен обзор работ по воспламенению газовых смесей в ректорах на основе ударной трубы. Отмечено, что экспериментальные и расчетные данные различных авторов хорошо согласуются в областях параметров с высокими температурами и высокими скоростями горения, однако при низких температурах воспламенения наблюдаются существенные расхождения между теорией и экспериментами, что диссертант связывает с влиянием газодинамических процессов на процесс воспламенения. Качественно описаны постановки задач и картина течений в ударной трубе. Далее с целью выяснения механизмов формирования локальных очагов воспламенения выполнена серия трехмерных расчетов распространения ударной волны по нереагирующей смеси вдоль плоской пластины и в каналах двух различных конфигураций. Показано, что в течении газа за ударной волной вблизи стенок образуется пограничный слой, в котором формируются «роликовые» вихри с характерным размером 2 мм. В следующие моменты времени эти вихри отрываются от поверхности и трансформируются в сложные многомерные структуры, свидетельствующие о переходе к турбулентности. Кроме качественного анализа структуры течения построена количественная диаграмма зависимостей волновых чисел от числа Рейнольдса потока. Показано, что волновые числа вихревых структур лежат внутри области неустойчивости, определенной классической теорией.

Представлены результаты численного моделирования течений в ударной трубе с учетом химических реакций в одно- и двумерной постановках. На основе анализа результатов одномерных расчетов детально описаны этапы процесса воспламенения и перехода волны горения в детонацию, которые согласуются с механизмами, описанными

другими авторами. Проведено сопоставление данных, полученных в одно- и двумерных постановках. Численно изучена роль гидродинамической неустойчивости на процесс воспламенения подготовленной стехиометрической водород-кислородная смесь, разбавленной аргоном при нормальных атмосферных условиях. Показано, что вихревые структуры внутри пограничного слоя отвечают за формирование множественных локальных очагов воспламенения, которые способствуют формированию волны экзотермической химической реакции, распространяющейся по смеси. В зависимости от интенсивности реакций волна реакции переходит в детонацию или вырождается в дефлаграционную волну. Исследовано воспламенение и переход в детонацию в подготовленных водород-кислородных смесях, разбавленных азотом. Отмечено, что процесс воспламенения в таких смесях отличается от того, что наблюдается в разбавленных аргоном смесях. Автор связывает этот факт с наличием более крупных вихревых структур, что приводит к разнесенным в пространстве очагам воспламенения. Отмечается, что в отличие от случая разбавлений аргоном смеси, формирующаяся детонационная волна имеет искривленный фронт.

В разделе 3.6 исследовано очаговое воспламенение за ударной волной, отраженной от закрытого торца ударной трубы. Изучена эволюция нереагирующего течения в круглой трубе. Показано, что роликовые вихри, формирующиеся на некотором расстоянии за фронтом отраженной ударной волны, обуславливают существенную неравномерность температурного поля. При этом характерный размер «горячих» точек меньше размера роликовых вихрей.

В разделе 3.7 обсуждается процедура регистрации режима перехода к детонации на основе совместного анализа данных эксперимента и расчета. Поскольку экспериментальные данные получены в нескольких датчиках, расположенных на конечном расстоянии друг от друга, они не позволяют зафиксировать моменты начала роста давления, ответственные за различные этапы воспламенения смеси и перехода к детонации. Полученные диссертантом детальные картины течения в ударной трубе на различные моменты времени позволили корректно интерпретировать данные эксперимента и выявить особенности формирования детонационной волны.

Четвертая глава посвящена анализу влияния лучистого нагрева частиц на воспламенение, распространение пламени и переходе волны горения в детонацию в реагирующей газовой среде с взвешенными инертными частицами. Приведена модель горения дисперсной газообразной среды с учетом лучистого механизма теплопередачи. Проанализированы основные уравнения, описывающие процессы, даны качественные оценки факторов, влияющих на тепловую динамику газа и частиц. Даны асимптотические оценки вклада теплового излучения в динамике нагрева частиц как разреженной газовой смеси, так и при больших массовых (конечных объемных) концентрациях. Перечислены сценарии развития процессов воспламенения и горения газовой смеси в присутствии частиц, а также развития процесса перехода к детонации. Получены критерии реализации различных сценариев формирования детонации. Получены и проанализированы интересные структуры волн горения в многослойных системах. Выявлены физические механизмы воспламенения газовой смеси при неоднородном распределении частиц в пространстве.

Полученные на основе оценочного анализа и численных расчетов выводы представляются достаточно убедительными и логически оправданными. Внимания заслуживает также концепция прямого инициирования детонации в газовой среде при локальном подводе лучистой энергии к взвешенным в ней инертным частицам.

Пятая глава посвящена анализу явления перехода горения в детонацию в газовых смесях. Рассмотрены различные смеси от низкоактивных до высокоактивных. Проведен

анализ факторов, обуславливающих рост возмущений, повышение давления и ускорение фронта горения. Перечислены сценарии развития процесса при различных условиях. Рассмотрен ряд задач распространения горения в гладких и загроможденных каналах, при внешнем ударно-волновом воздействии, в закрытых объемах и открытом пространстве. Проведена классификация режимов горения, переходных процессов и детонационных режимов. На основе феноменологических рассуждений и качественного анализа процессов определены условия и сформулированы некоторые критерии реализации различных режимов перехода горения в детонацию.

Заслуживают внимания общая классификация режимов распространения фронта горения и сценариев перехода горения в детонацию и сформулированные физически обоснованные условия их реализации.

Однако к изложению материала имеется ряд **замечаний и вопросов**.

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

двумерные расчеты, по всей видимости, выполнены для условия «холодной» стенки и моделируют развитие пограничного слоя, что, как отмечено в данной главе, оказывает существенное влияние на воспламенение. Но ни тот, ни другой фактор не могут быть учтены в одномерных расчетах, однако кривые на рис. 3.9, соответствующие разным постановкам, качественно соответствуют друг другу, что говорит о том, что механизмы воспламенения и в том, и в другом случае одинаковые.

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

Указанные замечания, однако, не снижают общей положительной оценки, которую заслуживает диссертационная работа Киверина А.Д. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

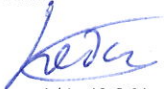
Результаты диссертации опубликованы в более чем в тридцати статьях в ведущих российских и зарубежных журналах (в том числе в нескольких авторитетных журналах из первого квартеля в своем научном направлении), а также большом числе трудов российских и международных конференций, где настоящая работа проходила апробацию. Во введении и в каждой главе диссертации автор отдельно останавливается и разъясняет свой личный вклад в представленные в диссертации результаты. Постановка всех задач, анализ результатов и выводы были сделаны непосредственно автором работы.

Диссертация обсуждена и одобрена на Общеинститутском семинаре ИТПМ СО РАН «Теоретическая и прикладная механика» под председательством чл.-корр. РАН Шиплюка А.Н. и академика РАН Фомина В.М. (Протокол № 73 от 18.06.2021)

С учетом всего вышесказанного, считаем, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Киверин Алексей Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв составили:

заведующий лабораторией №12 «Волновых процессов в ультрадисперсных средах»
ИТПМ СО РАН к.ф.-м.н.



Бедарев Игорь Александрович

630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1 (383) 330-85-38, bedarev@itam.nsc.ru

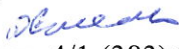
ведущий научный сотрудник лаборатории №12
ИТПМ СО РАН д.ф.-м.н., проф.



Федорова Наталья Николаевна

630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1 (383) 330-85-38, nfed@itam.nsc.ru

ведущий научный сотрудник лаборатории №12
ИТПМ СО РАН д.ф.-м.н.



Хрущева Татьяна Алексеевна

630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1 (383) 330-85-38, khrushcheva@itam.nsc.ru

И.о. ученого секретаря ИТПМ СО РАН
К.ф.-м.н.



Бузиоркин Андрей Евгеньевич

630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1 (383) 330-42-79, adm@itam.nsc.ru

