

## ОТЗЫВ

официального оппонента

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

Диссертационная работа Киверина А.Д. посвящена вопросам нестационарного горения и формирования детонации в газообразных средах, в том числе газах, содержащих взвешенные микрочастицы. Работа выполнена методами численного моделирования с использованием современных вычислительных методик, разрабатываемых Кивериным А.Д. и его соавторами в лаборатории Вычислительной физики ОИВТ РАН. В диссертации рассмотрен широкий класс задач, таких как: эволюция волны горения в канале, воспламенение и формирование детонации при локальном подводе энергии, очаговое воспламенение и формирование детонации при ударном сжатии, генерация детонации путем лучистого нагрева взвешенных в реагирующем газе микрочастиц, переход горения в детонацию в каналах и свободном пространстве. На основе проведенного численного анализа особенностей развития нестационарного горения и с учетом известных экспериментальных данных в диссертационной работе сформулированы механизмы, определяющие реализацию разнообразных режимов горения, включая детонационное, в зависимости от накладываемых условий. В ходе исследований Киверин А.Д. сформулировал рекомендации к выбору вычислительных алгоритмов для математического моделирования нестационарных режимов горения в замкнутых объемах. Эти рекомендации, как и полученные в работе результаты, являются новыми и имеют научную и практическую ценность для развития технологий на основе процессов горения и детонации газообразных и дисперсных сред.

**Объём и структура работы.** Диссертационная работа изложена на 284 страницах, состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа содержит 121 рисунок и 249 библиографических ссылок.

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

Первая глава посвящена вопросам нестационарного горения в каналах, заполненных реагирующим газом, и методам численного анализа этого процесса. Автор вводит предмет исследования – дефлаграционное горение, сообщая об особенностях его нестационарного развития в замкнутых объемах, и представляет традиционную модель газодинамики реагирующего газа. Автором последовательно рассмотрены вопросы стационарного горения, развития неустойчивости фронта пламени, ускорения пламени в канале от закрытого конца, взаимодействия фронта пламени с акустическими возмущениями, отраженными от стенок канала. Особое внимание автор уделяет именно эволюции акустических полей, показывая, что они играют одну из ведущих ролей в развитии пламени в замкнутом объеме, в том числе приводя к интенсификации развития гидродинамической неустойчивости фронта пламени.

Представленные в работе результаты вычислительного эксперимента с частичным поглощением энергии акустических волн на стенках канала позволили заключить, что развитие пламени напрямую связано с эволюцией акустического поля внутри замкнутого объема. В виду этого, в качестве рекомендации к выбору вычислительного алгоритма для численного моделирования нестационарных режимов горения в замкнутых объемах автор предлагает использовать современные “бездиссипативные” методики второго порядка точности, приводя расчеты по методу КАБАРЕ с указанием преимуществ над традиционными разностными методами, включая алгоритмы с высокой степенью аппроксимации.

Во второй главе решается задача о воспламенении газовой смеси и инициировании детонации локализованными источниками энергии. Автор приводит подробное описание основных особенностей развития теплового взрыва на фоне неоднородного распределения температуры (градиента температуры) в горючей смеси на основе водорода, горение которой описывается на основе детального кинетического механизма. С учетом новых расчетных данных автор предложил расширенную классификацию возможных режимов инициирования волн горения и детонации по сравнению с опубликованной ранее классификацией Я.Б. Зельдовича. Представленный анализ расчетов воспламенения от локализованных источников с различной энергетикой, мощностью и длительностью импульса, демонстрирует, что независимо от конкретных условий базовым является механизм формирования волны горения в результате спонтанного воспламенения на фоне градиента температуры (механизм Зельдовича Я.Б.). При этом параметры градиента температуры определяются газодинамическими процессами, развивающимися на масштабах зоны подвода энергии при конкретных параметрах источника энергии. Отдельно рассмотрены режимы инициирования детонации околокритическими источниками энергии, отмечен критерий реализации так называемого SWACER механизма формирования детонации, в соответствии с которым скорость формируемой волны горения должна превышать скорость звука в продуктах горения.

В третьей главе решается задача о механизме, так называемого, «мягкого» воспламенения в ударных трубах, реализуемого, как правило, при умеренной температуре газа за ударной волной. На основе численного анализа автор формулирует механизм возникновения очагов воспламенения, связанный с развитием неустойчивости пограничного слоя за прошедшей ударной волной. Как следует из результатов расчетов, источником очагов устойчивого воспламенения являются роликовые вихри, формируемые на масштабах пограничного слоя. При этом очаговый характер воспламенения определяется диссипацией кинетической энергии потока в роликовых вихрях и дополнительным разогревом газа, что ведет к локальному снижению времени задержки воспламенения. В дальнейшем волна горения развивается на фоне неоднородного распределения температуры, и становится возможным формирование различных режимов горения, включая детонационное. Отдельно автор отмечает режимы с многоочаговым воспламенением, предлагая интерпретацию известным экспериментам. Также автором отдельно проанализированы возможные сценарии формирования детонации в зависимости от положения очага воспламенения относительно закрытого торца ударной трубы.

В четвертой главе автор представляет концепцию инициирования детонации путем лучистого нагрева взвешенных в реагирующем газе твердых микрочастиц. Задача решается в континуальном приближении с использованием одномерной двухтемпературной двухскоростной модели с учетом лучистого переноса в диффузионном приближении. Приведена классификация режимов горения при взаимодействии пламени с облаком взвешенных в газе микрочастиц. Продемонстрированы возможные сценарии развития горения, включая независимое самовоспламенение перед фронтом пламени за счет лучистого нагрева микрочастиц от продуктов горения в случае удаленного расположения облака частиц относительно источника горения. Показано, что в результате самовоспламенения может быть сформирована детонационная волна. Этот сценарий и положен в основу предлагаемой автором концепции, работоспособность которой продемонстрирована на основе представленных в диссертации расчетов. Проведен параметрический анализ, указывающий на особенности развития процесса воспламенения и генерации детонации в зависимости от пространственного распределения микрочастиц, их размера и объемной концентрации, а также от состава горючей смеси.

Пятая глава диссертации посвящена процессу перехода горения в детонацию (ПГД). Автором решен широкий круг задач, включая задачи о ПГД в гладких и загроможденных каналах, задачу о ПГД в результате взаимодействия пламени с ударными волнами, задачи о ПГД в закрытом канале и ПГД в открытом пространстве. Детальный анализ представленных расчетных результатов и опубликованных ранее экспериментальных данных позволил автору выявить особенности развития горения на финальной стадии перед ПГД и предложить классификацию возможных сценариев, реализуемых в результате ускорения пламени. На основе представленной классификации автором предложена система критериев, соответствующих различным сценариям, включая установление квазистационарных сверхзвуковых режимов горения и несколько возможных сценариев развития ПГД, на фронте пламени и в результате независимого самовоспламенения перед фронтом. Расчет критериев для ряда смесей, таких как водород-воздух, водород-кислород, ацетилен-воздух и ацетилен-кислород, показал удовлетворительное согласие с доступными экспериментальными данными. Численный анализ ПГД в ограниченном пространстве при взаимодействии пламени с ударными волнами показал дополнительные возможные пути ускорения пламени и ПГД, в том числе в результате усиления волн сжатия при взаимодействии с зоной горения. Схожий сценарий выявлен автором для случая свободного распространения пламени в открытом пространстве, где, как показывают результаты представленных автором расчетов, волны сжатия являются прямым следствием развития неустойчивости расходящегося пламени, а многомерность постановки задачи обеспечивает их взаимодействие с фронтом горения. Механизм ПГД в свободном пространстве представлен впервые и согласно заключениям автора реализуется исключительно в высокоактивных горючих смесях (как то водород-кислородная смесь при повышенном давлении).

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В ходе рассмотрения текста диссертации возникли следующие замечания:

1) В формуле (1.16), по-видимому, присутствует опечатка:  $X_s$  должны быть не молярными долями, а молярными плотностями. Образование массы компонента в

единице объема пропорционально плотности газа для реакций второго порядка. Еще опечатка: во фразе «... реакции не обратимы» частичка не лишняя.

2) В описании рисунка 1.16 сказано о серой линии, в то время как в манускрипте она красная.

3) Для рисунка 1.17 не сказано, через какие интервалы времени проводились выдачи с соответствующим рисованием кривых.

5) Рисунки 3.20 и 3.21: не хватает описания моментов вывода, соответствующих различного цвета кривым.

6) Рисунок 3.23: скорость волны стремится к скорости Чемпена-Жуге 1500 м/с, что характерно скорее для смеси водород-воздух, а не водород-кислород.

7) Рисунок 4.15: ошибка в подписи 2 раза написано «сплошная линия», хотя там одна линия сплошная, другая пунктирная.

8) Рисунок 5.8: Немонотонность зависимости времени задержки от давления при указанной начальной температуре проявляется лишь в некоторых конкретных детальном механизмах для водород-кислородной смеси. Во многих механизмах, в том числе самых современных, зависимость монотонная. Экспериментальных данных недостаточно для надежной идентификации этого «горба». Желательно указать, для какого механизма получены данные.

9) В списке литературы не выдерживается единый стиль ссылок: некоторые ссылки даны в формате, при котором название на первом месте, а затем фамилии авторов. Другие же ссылки даны в формате, при котором на первом месте стоят фамилии авторов.

10) К сожалению, в диссертации я не нашел информации о том, какие расчетные сетки используются при моделировании.

Сделанные замечания не меняют общей положительной оценки диссертации. Диссертация содержит новые результаты, имеющие практическую и научную значимость для решения широкого класса актуальных задач.

**Актуальность работы.** Физика горения и взрыва является основой для широкого класса актуальных направлений современной энергетики. При этом первостепенными являются вопросы повышения энергоэффективности и обеспечения пожаро- и взрывобезопасности при работе энергетических систем. Здесь следует отдельно выделить сценарии с нестационарным развитием горения, включая сценарии с формированием ударных и детонационных волн, представляющих основной объект исследования настоящей диссертации. Нестационарность горения, в частности, определяет развитие неустойчивых режимов в камерах сгорания энергетических систем, что сопровождается потерей в энергоэффективности. Развитие же сценариев с нештатным формированием ударных и детонационных волн определяет риски, связанные с выходом из строя оборудования и возникновения пожароопасных ситуаций. К пожаро- и взрывоопасным также следует отнести сценарии с аварийным выбросом горючих газов в атмосферу и последующим развитием горения в свободном или ограниченном пространстве. С другой стороны, организация управляемых режимов нестационарного горения и детонации может служить основой для создания принципиально новых технических устройств. Важно отметить, что для развития всех выше обозначенных актуальных направлений необходима корректная

интерпретация процессов горения и взрыва, реализуемых в заданных условиях. Выявление особенностей развития горения, ведущих механизмов, определяющих реализацию того или иного режима, определение возможных сценариев, условий их реализации и классификация являются неотъемлемой частью научно-исследовательского процесса. Диссертация Киверина А.Д. посвящена детальному анализу широкого класса явлений нестационарного развития горения от воспламенения до формирования высокоскоростного пламени и детонационных волн, что актуально для решения прикладных задач в области энергетики и взрывобезопасности.

**Научная новизна** диссертационной работы определяется новыми данными о ключевых механизмах, определяющих развитие нестационарного горения и формирование детонации в газообразных средах и газах, содержащих твердые микрочастицы. На основе опыта численного анализа нестационарного горения газообразных и дисперсных сред автором предложены новые рекомендации к выбору вычислительных алгоритмов. Впервые представлена детализация процесса и описаны ключевые механизмы, определяющие эволюцию очагов воспламенения и детонации при локальном подводе энергии в реагирующей среде, горение которой описывается согласно детальному кинетическому механизму. Впервые предложен газодинамический механизм формирования очагов воспламенения в ударной трубе и механизм формирования детонации при очаговом воспламенении. Предложена новая концепция инициирования волн горения и детонации в газовой среде посредством лучистого нагрева взвешенных в объеме микрочастиц. Впервые на основе детального анализа и определения структуры фронта пламени на финальной стадии его ускорения в канале проведена систематизация и классификация возможных режимов развития высокоскоростного пламени в ограниченном объеме и предложена методика расчета пределов перехода к детонации в газообразных смесях. Впервые предложен механизм перехода к детонации при свободном распространении пламени в газообразной среде, показано, что переход к детонации в свободном пространстве свойственен лишь высокоактивным смесям.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Результаты, полученные Кивериным А.Д. и представленные в тексте диссертации, существенно расширяют представления об особенностях развития нестационарного горения и конкретных физических механизмах, определяющих такие явления как ускорение пламени и переход горения в детонацию. Эти новые знания имеют большую теоретическую и практическую значимость. В частности, полученные данные о роли неустойчивости пламени и акустических полей в эволюции горения внутри ограниченного объема позволяет выработать рекомендации к выбору вычислительных методик, обеспечивающих наибольшую точность воспроизведения процессов горения при численном моделировании. Полученная информация о механизмах воспламенения при локализованном подводе энергии может быть использована для создания перспективных методов управления зажиганием, в том числе с целью инициирования конкретного режима горения. В частности, как об этом указывается в диссертации, доступна возможность инициирования детонации в результате дистанционного нагрева дисперсной среды от источника лучистой энергии. Новая информация о механизмах очагового воспламенения в ударных трубах позволяет с большей точностью интерпретировать измерения задержек воспламенения, представляющих первостепенную

значимость для исследований в области кинетики горения. Предложенная автором методика оценки пределов реализации режимов с переходом к детонации имеет практическую значимость для разработки систем взрывобезопасности. Новые результаты, представленные автором в диссертации, могут быть использованы для широкого круга исследований, проводимых в таких научных центрах как ОИВТ РАН, ФИЦ ХФ им. Н.Н. Семенова РАН, ИПХФ РАН, ИСМАН, ИБРАЭ РАН, ИТПМ СО РАН, Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, НИЦ Курчатовский институт, РФЯЦ ВНИИТФ и др.

**Апробация результатов.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на ведущих Российских и Международных конференциях, а также на семинарах профильных научных организаций.

**Публикации.** Результаты работы изложены в 39 научных работах, в том числе 37 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК. Публикации достаточно полно отражают материалы диссертации.

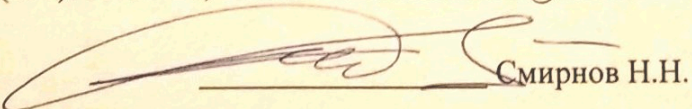
**Автореферат** полностью соответствует содержанию диссертации.

**Личный вклад автора** корректно и полно отражён в диссертации и автореферате.


Диссертация Киверина А.Д. «Нестационарные режимы горения и формирования детонации в газообразных и дисперсных средах» 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 составил заведующий лабораторией Волновых процессов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», д.ф.-м.н., профессор Смирнов Николай Николаевич.

119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, тел.: (495)939-37-54, e-mail: mech.math.msu@inbox.ru

 Смирнов Н.Н.

Подпись Смирнова Н.Н. и сведения заверяю

И.о.декана механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ им. М.В. Ломоносова), профессор  А.О.Иванов

119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, тел(495)939-12-44, e-mail: office@mech.math.msu.su

