

ОТЗЫВ

на диссертационную работу Киверина Алексея Дмитриевича
"Нестационарные режимы горения и формирования детонации в
газообразных и дисперсных средах", представленную на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук по специальности
01.04.14 –Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертация Киверина Алексея Дмитриевича посвящена важной в практическом отношении проблеме — численному моделированию нестационарных процессов горения и механизмам формирования детонации в газовых смесях и дисперсных средах. Полученные научные данные о структуре волн дефлаграции, зонах реакций и газодинамики течения во время переходных процессов дефлаграции в детонацию, данные о структуре детонационных волн в ограниченных пространствах, процессы инициирования детонации, в том числе и в дисперсных средах, способствуют решению задач взрывобезопасности и созданию новых экологически чистых и эффективных технологий сжигания водорода и углеводородных топлив для энергетики будущего. Учитывая современную тенденцию к использованию водородных смесей в энергетике, как перспективных экологически приемлемых топлив, задачи безопасности использования таких смесей и предотвращения детонации, несомненно, являются **актуальными**, а их решение способствует повышению эффективности использования энергоресурсов.

В теоретических работах, составляющих диссертацию А.Д.Киверина, был выполнен анализ вычислительных методик решения пространственно неоднородных волн горения с учетом не одностадийной кинетики химических реакций, процессов переноса и численно решены задачи инициирования и нестационарного распространения волн горения с учетом быстропротекающих процессов с образованием ударных волн в каналах с различной геометрией. Результаты исследований позволили численно

описать развитие газодинамических потоков, возникновение неоднородностей температуры, давления и плотности газа с химическими реакциями в ударных трубах, каналах различной конфигурации, закрытых сосудах и свободном пространстве. Эти работы, выполненные на основе комплекса современных вычислительных методов решения задач реакционно-диффузионных систем с движением сжимаемой среды и дисперсных систем, состоящих из микрочастиц в реакционной горючей смеси, безусловно, отличаются **новизной**.

Следует отметить, новизну постановки и результаты, полученные при анализе воспламенения и инициирования детонации в газовой фазе с твердыми инертными микрочастицами, которые нагреваются внешним излучением. Эти работы, несомненно, будут стимулировать разработку новых моделей зажигания и нестационарного поведения волн горения в дисперсных системах, ставящих целью рассмотреть различные аспекты динамического поведения дисперсных систем с внешними источниками излучения.

Диссертация написана достаточно доходчиво, грамотно и аккуратно оформлена. Полученные результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Следует отметить практическую направленность исследований и стремление автора к разработке допустимо упрощенных описаний сложных физических процессов.

Диссертация изложена на 284 страницах, состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа содержит 121 рисунок и 249 библиографических ссылок.

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

В первой главе рассматриваются вопросы нестационарного горения газообразных смесей. Автор выделяет ведущие физические процессы и

механизмы, определяющие развитие горения в условиях ограниченного пространства. При этом из числа всех рассмотренных процессов автор особо выделяет фактор акустических возмущений, демонстрируя их роль в эволюции пламени на разных стадиях. На основе проведенных исследований автор формулирует рекомендации к выбору вычислительной методики для математического моделирования нестационарного горения газов.

Вторая глава посвящена задаче воспламенения газовой смеси в результате локализованного подвода энергии. Автор показывает, что классификация возможных сценариев развития воспламенения существенно зависит от выбора модели химической кинетики. При этом сценарии развития волн реакции на фоне неоднородного температурного профиля могут отличаться от предсказываемых согласно классическим представлениям и расчетам с использованием упрощенных одноступенчатых механизмов кинетики горения. На основе серии расчетов инициирования горения источниками различной интенсивности автором продемонстрированы сценарии с формированием различных неоднородностей поля температуры и, как следствие, формированием различных режимов горения, включая детонационное.

В третьей главе рассматриваются механизмы формирования неоднородного распределения температуры при распространении ударной волны в канале (в ударной трубе). Этот сценарий автором рассматривается как ведущий при воспламенении газообразной смеси при умеренных степенях сжатия. Двух- и трехмерные расчеты, проведенные автором, позволяют выделить особенности течения, определяющих генерацию вихревых структур и связанных с ними неоднородностей температуры, являющихся очагами воспламенения. В зависимости от положения очага (очагов) автор выделяет различные сценарии формирования волн детонации.

В четвертой главе решена оригинальная задача о воспламенении и инициировании детонации в газовой фазе с твердыми инертными микрочастицами, которые нагреваются внешним излучением. На основе

серии расчетов автор выделяет ведущие сценарии формирования горения и детонации, а также указывает на особенности воспламенения при нагреве частиц от внешнего источника в зависимости от размера частиц, их распределения в объеме и состава газообразной смеси.

В пятой главе подробно разобраны аспекты перехода горения в детонацию в ограниченном и неограниченном пространстве. На основе проведенных расчетов продемонстрированы особенности развития горения на финальной стадии ускорения пламени, предшествующей переходу в детонацию. Это позволило автору сформулировать ряд критериев, определяющих условия для перехода горения в детонацию в гладких и загроможденных каналах. Представленные автором расчеты критериев удовлетворительно описывают имеющиеся экспериментальные данные. Отдельно рассмотрены сценарии перехода к детонации при взаимодействии пламени с ударными волнами, сопровождаемые генерацией сверхвысоких давлений. Впервые представлен механизм перехода к детонации при свободном распространении пламени в открытом пространстве.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

К достоинствам диссертации относится исчерпывающий обзор существующих моделей перехода горения в детонацию и методов численного моделирования таких систем.

Представляемые работы А.Д. Киверина докладывались на российских и международных конференциях, опубликованы в трудах конференций и периодических изданиях и вызвали большой интерес у специалистов, занимающихся проблемами, затронутыми в диссертации. Работа А.Д. Киверина представляет собой законченное научное исследование на актуальную тему, в котором получены оригинальные, полезные результаты. Результаты работ обсуждались на различных конференциях и семинарах, в том числе международных, и большая часть из них опубликованы в рейтинговых специализированных научных журналах, после прохождения

независимой экспертизы специалистов в данной области, что свидетельствует о **правильности** полученных результатов.

Полученные результаты могут быть рекомендованы к использованию в ИХКиГ СО РАН, ИТПМ СО РАН, ИГиЛ СО РАН, ИШ ДВФУ, ИТМО НАНБ и других научных учреждениях, а также при решении практических задач взрывобезопасности, связанных со взрывами горючих смесей газов и дисперсных систем и возможностью детонации.

По содержанию диссертации имеются следующие замечания.

1) На рисунке 1.17. приведены расчеты эволюции пламени, выполненные методом крупных частиц и на основе современного бездиссипативного метода КАБАРЕ. Показаны сильно различающиеся сценарии и форма пламени. Какие аргументы говорят в пользу более высокой точности метода КАБАРЕ? Имеются ли какие-либо экспериментальные наблюдения, которые указывают на сценарий развития ячеистого пламени с сильно несимметричной формой, предсказываемой численным расчетом?

2) В разделах, касающихся методики численных расчетов, желательно указывать, каким методом проверялась сходимость схемы и как выбирался шаг расчетной сетки.

3) При описании самоускорения сферического пламени приведены ссылки на работы [29]-[31], посвященные моделированию расходящегося цилиндрического пламени, в рамках модели Сивашинского. Эта модель предполагает малость коэффициента расширения газа, и поэтому описание самоускорения пламени носит качественный характер.

Опечатки.

1) Опечатка в слове “длиной” десятая строка от нижней границы текста на стр. 44.

Данные замечания не снижают ценность полученных результатов.

Считаю, что диссертация Киверина А.Д. представляет собой научное исследование на актуальную тему, в котором получены оригинальные, полезные результаты. Автореферат отражает основные результаты,

изложенные в диссертации. Работа отвечает требованиям ВАК РФ и заслуживает положительной оценки, а квалификация ее автора — присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 –Теплофизика и теоретическая теплотехника.

19 августа 2021 г.

Главный научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Института прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИПМ ДВО РАН),

д. ф.-м. н.,



Минаев Сергей Сергеевич

E-mail: minaevss@yahoo.com Тел.: +7 914 68 68 958

Почтовый адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7

Ученый секретарь федерального государственного бюджетного учреждения науки Института прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИПМ ДВО РАН),



Черныш Елена Валерьевна

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИПМ ДВО РАН)

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7, Тел./Факс:(423) 231-18-56

Сайт:<http://www.iam.dvo.ru>, E-mail:admin@iam.dvo.ru