



Глушков Дмитрий Олегович

**ЗАЖИГАНИЕ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ
(МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫЕ СМЕСЕВЫЕ, ГЕЛЕОБРАЗНЫЕ
И ДИСПЕРГИРОВАННЫЕ ТОПЛИВА)
КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ И ПОЛИМЕРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРЕВЕ**

01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на кафедре автоматизации теплоэнергетических процессов.

Научный консультант:

Кузнецов Гений Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Бабук Валерий Александрович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии ракетно-артиллерийских наук, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова (г. Санкт-Петербург), кафедра «Космические аппараты и двигатели», заведующий кафедрой

Коробейничев Олег Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск), лаборатория кинетики процессов горения, главный научный сотрудник

Хасанов Ирек Равильевич, доктор технических наук, академик Национальной академии наук пожарной безопасности, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны (г. Балашиха, Московская область), главный научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики Российской академии наук (г. Черноголовка, Московская область)

Защита состоится 27 декабря 2016 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2803/worklist>.

Автореферат разослан 27 октября 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Матвеев Александр Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и текущее состояние проблемы. В последние годы перспективы освоения ближнего и дальнего космоса влияют на развитие ракетно-космической отрасли в России, США, Китае, Индии, Японии и некоторых других странах. Одним из приоритетных направлений успешной реализации такой программы является разработка новых рецептур топлив (например, твердых, гелеобразных), которые кроме ракетных двигателей, разгонных ускорителей, газогенераторов, катапультирующих систем широко применяются в инженерных боеприпасах, системах активной брони, подушках безопасности и т.д. Также перспективным направлением развития ракетно-космической техники является создание энергоэффективных воспламенительных устройств топливных зарядов, принцип действия которых может быть основан, например, на локальном кондуктивном подводе энергии к конденсированному веществу (КВ) небольшой совокупностью локальных источников ограниченного теплосодержания с размерами, не превышающими нескольких миллиметров.

Основы теории зажигания взрывчатых КВ разогретыми до высоких температур телами конечных размеров были сформулированы еще в 80-х годах XX века. В результате экспериментальных исследований У. И. Гольдшлегером и В. В. Барзыкиным с соавторами разработана математическая модель твердофазного зажигания топлива горячей частицей, установлено влияние основных параметров источника на определяющую характеристику процесса – время задержки зажигания. В настоящее время область применения таких моделей на практике для достоверного прогноза закономерностей и характеристик индукционного процесса ограничена. Это связано как с расширением номенклатуры составов смесевых твердых топлив (в основном за счет добавок порошков металлов), так и с созданием перспективных топлив, например, гелеобразных, суспензионных и других.

Экспериментальное исследование характеристик воспламенения КВ при разработке оптимальной рецептуры или изготовлении новых составов представляет достаточно сложную задачу. Метрологическое обеспечение на высоком уровне экспериментов по изучению теплопереноса в топливе и источнике ограниченной энергоемкости, фазовых переходов или термического разложения в прогретой области приповерхностного слоя КВ, тепломассопереноса в газовой среде во многих случаях нереализуемо на практике, например, вследствие относительно малых значений характерных времен физико-химических процессов, протекающих в течение индукционного периода.

Теоретическое исследование условий и характеристик инициирования горения перспективных топлив (гелеобразных, суспензионных, полимерных) не всегда возможно в рамках известных моделей твердофазного зажигания из-за существенного отличия закономерностей физико-химических процессов, в первую очередь обусловленных локализацией реакций окисления продуктов испарения (термического разложения) в газовой среде. Также немаловажной проблемой является повышение достоверности прогноза характеристик зажигания структурно-неоднородных КВ. Как правило, гетерогенность структуры топлива обуславливает или какой-либо дополнительный дисперсный компонент, предназначенный для повышения энергетических характеристик процесса горения, или фазовый переход, например, плавление в окрестности зоны подвода теплоты от внешнего источника, или заполненные воздухом поры горючего вещества. Эти факторы могут оказывать достаточно существенное влияние на условия теплопередачи и интенсивность процесса инициирования горения КВ, особенно при локальном нагреве источником ограниченной энергоемкости.

Как правило, физико-химические процессы, протекающие в гетерогенных системах, моделируют (работы В. А. Бабука, Ю. А. Гостеева, П. С. Гринчука, А. Н. Золотко, А. М. Липанова, О. С. Рабиновича, С. А. Рашковского, А. В. Фёдорова, В. Г. Шевчука, Д. А. Ягодникова, D. Bedeaux, A. L. Berlad, J. Buckmaster, L. T. De Luca, J. M. Deutch, S. Goroshin, A. J. Higgins, T. L. Jackson, A. R. Kerstein, C. K. Law, M. J. Saxton, K. Seshadri, A. Umemura и других) в рамках математического аппарата статистического подхода, который имеет ограничения, связанные с необходимостью выполнения целого ряда условий (например, отсутствия испарения или термического разложения материала, достоверных данных о большом количестве эмпирических коэффициентов и т.д.), что при формулировке конкретной задачи не всегда позволяет выполнить количественный анализ проблемы зажигания.

Представляется перспективной разработка нового подхода в рамках моделей механики сплошной среды к теоретическому описанию процессов тепломассопереноса с химическим реагированием, протекающих при инициировании горения структурно-неоднородных конденсированных веществ и полимерных материалов (ПМ) в результате взаимодействия с разогретыми до высоких температур металлическими и неметаллическими частицами малых размеров, отличающегося от известных учетом в явном виде гетерогенной структуры топлива и системы «КВ – локальный источник нагрева».

Целью работы является создание основных элементов теории зажигания структурно-неоднородных (металлизированные смесевые, гелеобразные и диспергированные топлива) конденсированных веществ и полимерных материалов при локальном нагреве источниками ограниченной энергоемкости в рамках математического аппарата механики сплошной среды, отличающихся от известных описанием пространственно-временной неоднородности процессов тепломассопереноса, термического разложения, фазовых превращений и химического реагирования.

Цель достигается в диссертации путем решения следующих задач:

1. Создание нового подхода к теоретическому описанию процессов тепломассопереноса и химического реагирования, протекающих при инициировании горения структурно-неоднородных КВ и ПМ в результате локального нагрева источниками ограниченной энергоемкости, отличающегося от известных учетом в явном виде гетерогенной структуры топлив, конфигурации и размеров источника нагрева.

2. Разработка физических и математических моделей зажигания металлизированных смесевых, гелеобразных и диспергированных топлив, полимерных материалов нагретыми до высоких температур частицами, учитывающих взаимосвязанные процессы кондуктивного теплопереноса, термического разложения (или плавления и испарения) веществ и материалов, диффузии летучих компонентов, формирования горючей газовой смеси, свободно-конвективного и радиационного теплоотвода от источника нагрева, химического реагирования.

3. Адаптация методов численного решения дифференциальных уравнений в частных производных для программной реализации сингулярно возмущенных краевых задач.

4. Разработка и программная реализация алгоритмов решения систем нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими краевыми условиями.

5. Установление предельных условий устойчивого инициирования горения структурно-неоднородных конденсированных веществ и полимерных материалов при локальном нагреве источниками ограниченной энергоемкости, а также выявление характерных режимов зажигания.

6. Анализ влияния группы значимых факторов (начальная температура, размеры, форма, теплофизические свойства и количество локальных источников нагрева, их частичное или полное внедрение в приповерхностный слой КВ, отсутствие иде-

ального теплового контакта на границе «горячая частица – конденсированное вещество», зависимость теплофизических свойств веществ и материалов от температуры, выгорание приповерхностного слоя КВ, конвективный и радиационный теплоотвод от источника нагрева и другие) на характеристики индукционного периода.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложен новый подход к теоретическому описанию физико-химических процессов, протекающих при зажигании структурно-неоднородных (металлизированные смесевые, гелеобразные и диспергированные топлива) КВ и ПМ разогретыми до высоких температур частицами, отличающийся от известных учетом в явном виде гетерогенности структуры топлива и взаимосвязанных процессов кондуктивного теплопереноса, термического разложения (или плавления и испарения) веществ и материалов, диффузии летучих компонентов, формирования горючей газовой смеси, свободно-конвективного и радиационного теплоотвода от источника нагрева, химического реагирования.

2. Впервые сформулирована и решена группа задач твердофазного зажигания металлизированных смесевых топлив нагретыми до высоких температур частицами малых размеров при учете структурной неоднородности высокоэнергетического материала, обусловленной мелкодисперсными частицами металла. Установлено, что такой подход даже в рамках равномерного распределения монодисперсных компонентов металла и окислителя значительно повышает достоверность результатов определения характеристик индукционного процесса (в отличие от метода усреднения по объему металлизированного твердого топлива теплофизических свойств всех компонентов), в частности времен задержки и предельной температуры зажигания, что подтверждается хорошей корреляцией результатов теоретического исследования и известных экспериментальных данных.

3. Впервые разработаны математические модели и численно решены соответствующие краевые задачи газофазного зажигания одиночными горячими частицами гелеобразного топлива при близких к криогенным начальных температурах. При постановке задач учитывалась структурная неоднородность КВ, обусловленная фазовым превращением (плавление) в окрестности границы контакта с локальным источником нагрева в течение индукционного периода за счет кондуктивной теплопередачи от горячей частицы. Установлено влияние эндотермических фазовых пре-

вращений (плавление в прогретой области приповерхностного слоя топлива и испарение на границе с газовой средой) на характеристики процесса зажигания.

4. Впервые сформулирована и решена группа задач газофазного зажигания слоя измельченного натурального твердого топлива широко распространенными локальными источниками энергии при учете пористости диспергированного угля; его термического разложения; фильтрации и выхода летучих компонентов; формирования, прогрева и инициирования горения газовой смеси. Установлено, что структурная неоднородность влияет на условия теплопередачи в приповерхностный слой натурального твердого топлива вследствие неидеального теплового контакта на границе «горячая частица – измельченный уголь».

5. Впервые разработаны математические модели и решены соответствующие краевые задачи газофазного зажигания типичных термопластичных ПМ локальными источниками ограниченной энергоемкости. При постановке задач учтены сопряженные процессы теплопереноса в конденсированной фазе и тепломассопереноса в газовой среде, а также формирование горючей смеси продуктов термического разложения с окислителем. Выделены три характерных режима зажигания полимера, обусловленные начальной температурой горячей частицы, длительностью индукционного периода и положением зоны зажигания в окрестности локального источника нагрева.

6. Методы численного решения дифференциальных уравнений в частных производных адаптированы для программной реализации сформулированных сингулярно возмущенных краевых задач. Алгоритмы решения систем нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных с начальными и граничными условиями разработаны с применением неравномерных пространственных разностных сеток и процедуры проверки консервативности используемых разностных схем на каждом шаге по времени.

7. Выполненные теоретические исследования впервые позволили установить влияние на условия и характеристики зажигания металлизированных смесевых, гелеобразных и диспергированных топлив, а также полимерных материалов группы значимых факторов (неоднородность структуры вещества, начальная температура, размеры, форма, теплофизические свойства и количество локальных источников нагрева, их частичное или полное внедрение в приповерхностный слой вещества, отсутствие идеального теплового контакта на границе «горячая частица – конденсированное вещество», зависимость теплофизических свойств веществ и материалов

от температуры, выгорание приповерхностного слоя КВ, конвективный и радиационный теплоотвод от источника нагрева).

Теоретическая значимость. Впервые разработаны основные положения теории зажигания структурно-неоднородных (металлизированные смесевые, гелеобразные и диспергированные топлива) КВ и ПМ источниками ограниченной энергоемкости в условиях пространственно-временной неоднородности физико-химических процессов. Новый подход к теоретическому анализу закономерностей процессов, протекающих при инициировании горения в условиях локального нагрева, отличается от известных учетом в явном виде гетерогенной структуры топлива, а также взаимосвязанных процессов в конденсированной фазе и газовой среде: кондуктивный теплоперенос, термическое разложение (или плавление и испарение), диффузия летучих веществ, свободно-конвективный и радиационный теплоотвод, химическое реагирование.

В результате проведенных широкомасштабных исследований обоснована возможность прогностического моделирования инициирования процессов горения КВ с неоднородной структурой (при существенном отличии теплофизических характеристик дисперсных компонентов) в условиях локального нагрева источниками ограниченной энергоемкости. Сформулированное положение представляет интерес для разработки теоретических основ перспективной технологии зажигания новых видов ракетных топлив, а также предупреждения нерегламентированных возгораний полимеров и твердых натуральных топлив.

Разработаны не имеющие аналогов математические модели зажигания структурно-неоднородных конденсированных веществ и полимерных материалов, а также соответствующие алгоритмы численного решения сформулированных сингулярно возмущенных краевых задач.

Впервые установлены предельные условия зажигания локальными источниками энергии металлизированных смесевых, гелеобразных и диспергированных топлив, а также полимеров при влиянии наиболее значимых факторов (начальная температура, размеры, форма, теплофизические свойства и количество локальных источников нагрева, их частичное или полное внедрение в приповерхностный слой вещества, отсутствие идеального теплового контакта на границе «горячая частица – конденсированное вещество», зависимость теплофизических свойств веществ и материалов от температуры, выгорание приповерхностного слоя КВ, конвективный и радиационный теплоотвод от источника нагрева).

Практическая значимость. Разработанные математические модели в сочетании с адаптированными к новым задачам зажигания методами численного решения применимы для создания энергоэффективной технологии инициирования горения структурно-неоднородных высокоэнергетических материалов локальными источниками энергии в специальных установках. Также результаты теоретических и экспериментальных исследований в виде предельных условий и основных характеристик зажигания могут быть использованы для оценки пожарной опасности процессов взаимодействия малокалорийных источников энергии с горючими конденсированными веществами. Для прогностического моделирования условий и характеристик зажигания структурно-неоднородных топлив и полимерных материалов разработаны соответствующие программные коды для электронных вычислительных машин (выдано 17 свидетельств о государственной регистрации).

Методы исследования. При проведении численного моделирования процессов тепломассопереноса с фазовыми превращениями и химическим реагированием использованы методы решения дифференциальных уравнений в частных производных (конечных разностей, локально-одномерный, переменных направлений, прогонки, итераций), адаптированные для программной реализации сформулированных сингулярно возмущенных краевых задач. Алгоритмы решения систем нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных с начальными и граничными условиями реализованы с использованием неравномерных пространственных разностных сеток и процедуры проверки выполнения закона сохранения энергии в области решения задачи на каждом шаге по времени. Программная реализация алгоритмов численного решения краевых задач выполнена в пакете математического моделирования MATLAB с использованием разработанных оригинальных программных кодов.

Экспериментальные исследования выполнены с применением средств программно-аппаратного комплекса видеофиксации быстропротекающих процессов, включающего высокоскоростные монохромную и цветную видеокамеры Phantom Miro M310 и Phantom V411, программное обеспечение Tema Automotive, а также метода цифровой трассерной визуализации потоков Particle Image Velocimetry, основанного на использовании твердотельного импульсного Nd:YAG лазера, кросскорреляционной видеокамеры Imperx Bobcat IGV-B2020M и программного обеспечения Actual Flow для диагностики полей скорости.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новый подход к теоретическому описанию процессов тепломассопереноса и химического реагирования, протекающих при инициировании горения большой группы топлив (смесевые, гелеобразные, суспензионные, натуральные) и термопластичных полимеров в результате локального нагрева источниками ограниченной энергоемкости, отличающийся от известных учетом в явном виде гетерогенной структуры конденсированных веществ, конфигурации и размеров горячих частиц.

2. Математические модели зажигания смесевых, гелеобразных, твердых натуральных топлив и термопластичных полимеров, описывающие взаимосвязанные процессы кондуктивного теплопереноса, термического разложения (плавления, испарения) веществ и материалов, диффузии летучих компонентов, формирования горючей газовой смеси, свободно-конвективного и радиационного теплоотвода от источника нагрева, химического реагирования.

3. Инициирование горения смесевых, гелеобразных, суспензионных, диспергированных натуральных топлив и полимерных материалов в условиях взаимодействия с локальными источниками ограниченной энергоемкости является устойчивым (зажигание переходит в стационарное горение) при выполнении соответствующих необходимых (критерий зажигания) и достаточных (глубина прогрева, глубина «активного пиролиза» приповерхностного слоя) условий.

4. Учет структурной неоднородности конденсированных веществ влияет на достоверность прогноза условий и характеристик их зажигания. В отличие от моделей гомогенной структуры топлива с усредненными теплофизическими характеристиками моделирование гетерогенной структуры вещества в явном виде даже при равномерном распределении монодисперсных компонентов с существенно отличающимися теплофизическими свойствами позволяет повысить достоверность результатов теоретического исследования и прогнозировать характеристики индукционного процесса в пределах погрешностей экспериментальных методов определения их значений.

5. Влияние значимых факторов (начальная температура, размеры, форма, теплофизические свойства и количество локальных источников нагрева, их частичное или полное внедрение в приповерхностный слой конденсированного вещества, условия теплопередачи на границе «горячая частица – топливо») на характеристики инициирования процесса горения структурно-неоднородных топлив и термопластичных полимеров максимально при близких к предельным условиям зажигания.

Выгорание приповерхностного слоя топлива, конвективный и радиационный теплоотвод от источника нагрева в окружающую среду оказывают менее существенное влияние на характеристики зажигания.

6. Процесс инициирования горения гелеобразного топлива при близких к криогенным температурам в условиях локального нагрева имеет схожие закономерности с зажиганием типичных твердых и жидких конденсированных веществ, но существенно отличается от последних характеристиками и условиями индукционного периода.

Достоверность результатов. Численное моделирование физико-химических процессов выполнено при установленных оптимальных значениях параметров разностной сетки и шага интегрирования по времени. Оценка достоверности результатов работы проводилась тестированием на примере задач теплопереноса и химической кинетики использовавшихся численных методов и элементов разработанных алгоритмов решения краевых задач зажигания, проверкой консервативности разностных схем, сопоставлением с известными экспериментальными данными, в предельных случаях – с результатами математического моделирования других исследователей.

При проведении экспериментальных исследований использовались современные методы обработки полученных данных с применением метрологически аттестованной контрольно-измерительной аппаратуры.

Личный вклад автора состоит в выборе и обосновании крупной научной проблемы как темы диссертации, формулировке цели исследования и задач для разработки теоретических положений, создании нового подхода для проведения исследований, формулировке группы задач для изучения физико-химических процессов и соответствующих математических моделей, проведении исследований, верификации, анализе и обобщении результатов, разработке совокупности теоретических положений, их апробации на всероссийских и международных конференциях, а также подготовке публикаций и регистрации программ для ЭВМ в рамках выполненной работы.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационная работа выполнена на стыке двух направлений научной деятельности Национального исследовательского Томского политехнического университета «Разработка методов и средств повышения надежности и эффективности эксплуатации энергетических объектов» и «Развитие теоретических основ и разработка технологий производства энергии и энергоресурсосбережения в различных отраслях». Основные результаты исследования в виде теоретических следствий, алгоритмов численного решения за-

дач химической физики и программных кодов используются в Национальном исследовательском Томском политехническом университете при подготовке магистров техники и технологии по направлениям «Физика», «Теплоэнергетика и теплотехника», «Энергетическое машиностроение», а также кандидатов наук по специальностям 01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества, 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (Указ Президента Российской Федерации от 07.07.2011 № 899): «Безопасность и противодействие терроризму», «Перспективные вооружения, военной и специальной техники», «Транспортные и космические системы», «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика».

Исследования проведены при поддержке Совета по грантам Президента РФ (проекты № МК-2391.2014.8, МК-6491.2016.8), Российского научного фонда (проекты № 14-39-00003, 15-19-10003), Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 12-08-33002 мол_а_вед, 14-03-31304 мол_а, 14-38-50003 мол_нр), Некоммерческого партнерства «Глобальная энергия» (проект № МГ-2014/04/3).

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на The 5th and 7th International Symposium on Non-Equilibrium Processes, Plasma, Combustion, and Atmospheric Phenomena (Sochi, 2012, 2016), VI и X Международных конференциях «Высокоэнергетические материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение» (Бийск, 2012, 2014), 10 и 11 Международных научных конференциях «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Алушта, Украина, 2012, 2013), VIII Всероссийской конференции «Горение твердого топлива» (Новосибирск, 2012), Восьмой Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2013), Третьей конференции по фильтрационному горению (Черноголовка, 2013), Международной конференции «Восьмые окуневские чтения» (Санкт-Петербург, 2013), International Conference «Mathematical and Informational Technologies» (Vrnjacka Banja, Serbia; Budva, Montenegro, 2013), Седьмой Международной научной конференции «Полимерные материалы пониженной

горючести» (Таганрог, 2013), III и IV Минских международных коллоквиумах по физике ударных волн, горения и детонации (Минск, Беларусь, 2013, 2015), Национальном конгрессе по энергетике (Казань, 2014), International Conference on Environmental Protection and Sustainable Ecological Development (Wuhan, China, 2014), Международной научно-технической конференции «Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК» (Иваново, 2014), Шестой российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2014), Третьей международной конференции по горению и детонации «Мемориал Я. Б. Зельдовича» (Москва, 2014), Всероссийской конференции «XXXI Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2014), The 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (Naples, Italy, 2015), The IV International Conference on Particle-Based Methods (Barcelona, Spain, 2015), IX Всероссийской конференции «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2015), XV Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, Беларусь, 2016), The 3rd International Congress on Water, Waste and Energy Management (Rome, Italy, 2016).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 94 научных работы общим объемом 55 печатных листов, в том числе 40 статей в изданиях, которые включены в перечень рецензируемых научных журналов для опубликования основных результатов диссертаций: «Химическая физика» (переводная версия «Russian Journal of Physical Chemistry B»), «Физика горения и взрыва» (переводная версия «Combustion, Explosion and Shock Waves»), «Химия твердого топлива» (переводная версия «Solid Fuel Chemistry»), «Химическая физика и мезоскопия», «Химическое и нефтегазовое машиностроение» (переводная версия «Chemical and Petroleum Engineering»), «Доклады Академии наук» (переводная версия «Doklady Physics»), «Теплоэнергетика» (переводная версия «Thermal Engineering»), «Тепловые процессы в технике», «Energy and Fuels», «Applied Thermal Engineering», «Fuel Processing Technology», «Thermal Science», «Journal of Engineering Thermophysics», «Mathematical Problems in Engineering», «Пожаровзрывобезопасность», «Пожарная безопасность», «Безопасность труда в промышленности», «Известия ЮФУ. Технические науки», «Известия высших учебных заведений. Физика», «Бутлеровские сообщения». Выдано 17 свидетельств на программы для электронных вычислительных машин. Опубликовано 37 работ в прочих журналах, материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 370 наименований; содержит 385 страниц, 125 рисунков, 27 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, методы их решения, отражены проблемы и основные результаты изучения процессов зажигания конденсированных веществ, полученные ранее в областях ракетостроения и пожарной опасности. Обоснована необходимость разработки нового подхода к теоретическому описанию процессов тепломассопереноса и химического реагирования при инициировании горения структурно-неоднородных твердых, гелеобразных и диспергированных КВ в условиях локального нагрева. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость установленных результатов. Перечислены научные мероприятия и публикации, в рамках которых апробированы результаты диссертационных исследований.

Глава 1 отражает современное состояние теоретических и экспериментальных исследований процессов инициирования и непосредственного горения структурно-неоднородных конденсированных веществ, а также зажигания топлив источниками ограниченного теплосодержания. Установлено, что при теоретическом изучении процессов горения в гетерогенных системах широко применяется статистический подход к моделированию неоднородной структуры топлива. Этот подход основан на достаточно сложном математическом аппарате, модели которого, как правило, содержат большое количество эмпирических коэффициентов, что при формулировке конкретных задач не всегда позволяет выполнить количественный анализ проблемы зажигания. Представляется перспективным разработка нового подхода к прогнозированию характеристик зажигания металлизированных смесевых, гелеобразных, диспергированных твердых натуральных топлив и полимерных материалов локальными источниками нагрева в рамках математического аппарата механики сплошной среды, основанного на уравнениях Навье-Стокса в сочетании с уравнениями переноса теплоты и массы, отличающегося от известных учетом в явном виде гетерогенной структуры КВ, а также локальности подвода энергии.

В главе 2 приведены результаты исследования зажигания металлизированного смесового твердого топлива (СТТ) источником с ограниченным теплосодержанием (рис. 1). Обосновано, что при учете в явном виде гетерогенной структуры КВ, обусловленной мелкодисперсными частицами металла, и пространственно-временной неоднородности физико-химических процессов в условиях локального нагрева теоретически установленные характеристики индукционного периода (времена задержки зажигания) коррелируют с известными экспериментальными данными в пределах погрешностей методов измерения.

При постановке группы задач предполагалось, что в начальный момент времени горячая частица инерционно осаждается на поверхность типичного металлизированного СТТ (перхлорат аммония + бутилкаучук + порошок металла). Его приповерхностный слой прогревается за счет кондуктивной теплопередачи от локального источника. С ростом температуры в этой зоне интенсифицируется экзотермическое взаимодействие полимерного горючего и окислителя. Условия зажигания СТТ соответствуют классическим критериям В. Н. Виллюнова, Я. Б. Зельдовича, А. А. Ковальского, Д. А. Франк-Каменецкого:

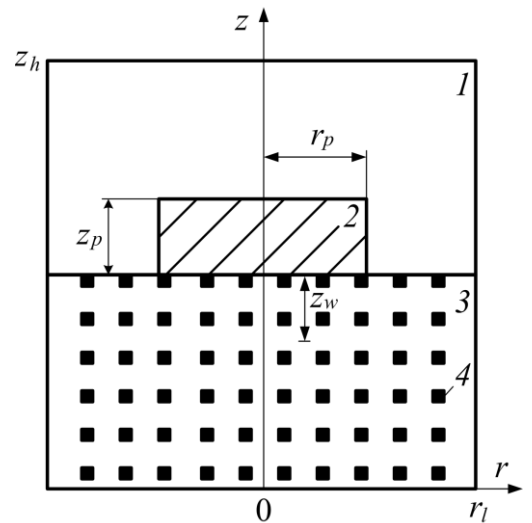


Рис. 1. Схема области решения задачи зажигания: 1 – инертный газ, 2 – локальный источник энергии, 3 – полимерная матрица (горючее и окислитель), 4 – частица металла

1. Теплоприход в системе (рис. 1) за счет экзотермической реакции в прогретой области приповерхностного слоя топлива превышает теплоотвод от горячей частицы в конденсированную фазу.

2. Температура в зоне ведущей реакции окисления превышает начальную температуру локального источника энергии.

Возможны несколько подходов к моделированию структурной неоднородности (рис. 1) металлизированного СТТ. Самой простой при численной реализации является модель, в основе которой лежит предположение о возможности интерпретации КВ как среды с «эффективными» (усредненными) теплофизическими характеристиками.

Как правило, плотности и удельные теплоемкости дисперсных компонентов в смеси имеют близкие значения ($\rho_d / \rho_c \approx 1-5$; $C_d / C_c \approx 1-5$), поэтому эффективные

параметры, рассчитанные по формулам на основе свойства аддитивности Неймана-Коппа, достаточно хорошо коррелируют с экспериментальными данными:

$$\rho_e = \rho_c \Phi_c + \rho_d \Phi_d; \quad (1)$$

$$C_e = C_c \mu_c + C_d \mu_d, \quad (2)$$

где индексы e, c, d – смесь, исходное вещество, дисперсный компонент, Φ – объемная концентрация, μ – массовая концентрация.

Теплопроводности же компонентов смеси, например, полимерной матрицы и частиц металла могут различаться более существенно (отношение λ_d / λ_c достигает несколько десятков и даже сотен). В работах (E. Behrens, D. A. G. Bruggeman, S. C. Cheng, J. J. Hermans, J. C. Maxwell, R. E. Meredith, L. E. Nielsen, J. M. Peterson, G. T. Tsao, R. I. Vachon и других) приведены выражения для расчета теплопроводности двухкомпонентных смесей. К таким составам можно условно отнести металлизированные СТТ, если представлять структуру топлива в виде полимерной матрицы с включениями частиц металла:

$$\lambda_e = \lambda_c \mu_c + \lambda_d \mu_d; \quad (3)$$

$$\lambda_e = \lambda_c \Phi_c + \lambda_d \Phi_d; \quad (4)$$

$$\frac{1}{\lambda_e} = \frac{\Phi_c}{\lambda_c} + \frac{\Phi_d}{\lambda_d}; \quad (5)$$

$$\lambda_e = \lambda_c \left[\frac{(\lambda_d / \lambda_c + 2) + 2(\lambda_d / \lambda_c - 1)\Phi_d}{(\lambda_d / \lambda_c + 2) - (\lambda_d / \lambda_c - 1)\Phi_d} \right]; \quad (6)$$

$$\lambda_e = \frac{1}{4} \left[\gamma + \sqrt{\gamma^2 + 8\lambda_c \lambda_d} \right], \quad \gamma = (3\Phi_d - 1)\lambda_d + (3\Phi_c - 1)\lambda_c; \quad (7)$$

$$\lambda_e = \lambda_c \frac{(2 + 2\gamma\Phi_d)(2 + (2\gamma - 1)\Phi_d)}{(2 - \gamma\Phi_d)(2 - (\gamma + 1)\Phi_d)}, \quad \gamma = \frac{\lambda_d - \lambda_c}{2\lambda_c + \lambda_d}; \quad (8)$$

$$\frac{1}{\lambda_e} = \frac{1 - B}{\lambda_c} + \frac{1}{B' \sqrt{CC'}} \ln \left[\frac{B' + B \sqrt{CC'}/2}{B' - B \sqrt{CC'}/2} \right], \quad (9)$$

$$B = \sqrt{3\Phi_d/2}, \quad C = 4\sqrt{2/3\Phi_d}, \quad B' = \sqrt{\lambda_c + B(\lambda_d - \lambda_c)}, \quad C' = \sqrt{\lambda_d - \lambda_c};$$

$$\lambda_e = \lambda_c \left[1 + 3\gamma\Phi_d + 3\gamma^2 \left(1 + \frac{\gamma}{4} + \frac{\gamma^2}{256} + \dots \right) \Phi_d^2 \right], \quad \gamma = \frac{\lambda_d - \lambda_c}{2\lambda_c + \lambda_d}; \quad (10)$$

$$\lambda_e = \lambda_c \left[\frac{1 + AB\Phi_d}{1 - B\psi\Phi_d} \right], \quad A = 1 - k_e, \quad \psi = 1 + \frac{1 - \Phi_{d\max}}{\Phi_{d\max}^2} \Phi_d, \quad B = \frac{(\lambda_d / \lambda_c - 1)}{(\lambda_d / \lambda_c + A)}. \quad (11)$$

Другой подход заключается в учете реальной неоднородности СТТ. За последние несколько лет достигнут большой прогресс (работы В. А. Бабука, П. С. Гринчука, А. М. Липанова, О. С. Рабиновича, V. Baranau, M. W. Beckstead, I. L. Davis, K. W. Desmond, T. L. Jackson, L. Massa, Y. Shi, U. Tallarek, M. D. Webb, E. R. Weeks, Y. Zhang и других) в моделировании гетерогенной структуры топлив. Решение этой проблемы представляет самостоятельную достаточно сложную задачу. Поэтому в данной работе в качестве первого приближения принято равномерное распределение монодисперсных компонентов (частицы окислителя и металла размерами около 80 мкм) в структуре топлива, пространство между которыми заполнено полимерным связующим, что несколько не противоречит современным требованиям о максимально однородном распределении дисперсных компонентов в твердотопливных составах для обеспечения расчетных режимов функционирования, например, двигательной установки.

Математическая модель для группы задач зажигания металлизированного СТТ в условиях свободно-конвективного теплоотвода от источника нагрева в газовую среду сформулирована в безразмерных переменных «функция тока – вихрь скорости». Для горячих частиц в форме диска постановка задач выполнена в цилиндрической системе координат.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = -R\Omega. \quad (12)$$

Уравнение движения газа:

$$\frac{1}{Sh} \frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Omega}{\partial R} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Z} - U \frac{\Omega}{R} = \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Omega}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Z^2} - \frac{\Omega}{R^2} \right) + \frac{\partial \Theta_1}{\partial R}. \quad (13)$$

Уравнение теплопроводности для газа:

$$\frac{1}{Sh} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} + V \frac{\partial \Theta_1}{\partial Z} = \frac{1}{\sqrt{Ra Pr}} \left(\frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial Z^2} \right). \quad (14)$$

Уравнение теплопроводности для частицы – локального источника нагрева:

$$\frac{1}{Fo_2} \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_2}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial Z^2}. \quad (15)$$

Уравнение теплопроводности для полимерной матрицы СТТ:

$$\frac{1}{Fo_3} \frac{\partial \Theta_3}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_3}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial Z^2} + Sr. \quad (16)$$

Уравнение теплопроводности для частиц металла СТТ:

$$\frac{1}{Fo_4} \frac{\partial \Theta_4}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_4}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_4}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_4}{\partial Z^2}. \quad (17)$$

Безразмерные комплексы:

$$Fo = \frac{\lambda t_m}{\rho C r_l^2}, \quad Pr = \frac{\nu \rho C}{\lambda}, \quad Ra = \frac{\beta g \Delta T r_l^3 C \rho}{\lambda \nu}, \quad Sh = \frac{\nu_m t_m}{r_l}, \quad Sr = \frac{Q_3 W_3 r_l^2}{\Delta T \lambda_3}.$$

Массовая скорость экзотермической реакции:

$$W_3 = \rho_3 k_3^0 \exp\left(-\frac{E_3}{R_t T_3}\right).$$

При переходе к безразмерным переменным использованы соотношения:

$$R = \frac{r}{r_l}, \quad Z = \frac{z}{z_h}, \quad \tau = \frac{t}{t_m}, \quad U = \frac{u}{v_m}, \quad V = \frac{v}{v_m}, \quad \Theta = \frac{T - T_0}{\Delta T}, \quad \Delta T = T_m - T_0,$$

$$\Psi = \frac{\psi}{\psi_m}, \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_m}, \quad v_m = \sqrt{g \beta \Delta T r_l}, \quad \psi_m = v_m r_l^2, \quad \omega_m = \frac{v_m}{r_l},$$

где $u = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}$, $v = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}$, $\omega = \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{\partial u}{\partial z}$.

Значения масштабных величин при переходе к безразмерным переменным:

$$t_m = 1 \text{ с}, \quad x_l = z_h = 10 \text{ мм}, \quad T_m = 1100 \text{ К}.$$

Начальные и граничные условия для системы уравнений (12)–(17):

- при $\tau = 0$: $\Theta_1 = \Theta_3 = \Theta_4 = \Theta_0$, $\Theta_2 = \Theta_p$, $\Psi = \Omega = 0$;

- для уравнений теплопроводности на границах веществ с отличающимися теплофизическими характеристиками (полимерная матрица, частицы алюминия, инертный газ, источник энергии): $\frac{\partial \Theta_b}{\partial \bar{n}} = \frac{\lambda_c}{\lambda_b} \frac{\partial \Theta_c}{\partial \bar{n}}$, $\Theta_b = \Theta_c$, на внешних границах области решения задачи: $\partial \Theta_b / \partial \bar{n} = 0$;

- для уравнения неразрывности на внутренних границах раздела сред: $\partial \Psi / \partial \bar{n} = 0$, $\Psi = 0$, на внешних границах области решения в газовой среде: $\partial \Psi / \partial \bar{n} = 0$;

- для уравнения движения газа при формулировании граничных условий использована формула Вудса второго порядка: $\Omega_{i,0} = \frac{7\Psi_{i,0} - 8\Psi_{i,1} + \Psi_{i,2}}{2R_i \Delta Z^2} + \frac{3}{R_i \Delta Z} \frac{\partial \Psi}{\partial Z} \Big|_{i,0}$,

- для уравнения движения газа при формулировании граничных условий использована формула Вудса второго порядка: $\Omega_{0,j} = \frac{7\Psi_{0,j} - 8\Psi_{1,j} + \Psi_{2,j}}{2R_0 \Delta R^2} + \left(\frac{3}{R_0 \Delta R} + \frac{1}{R_0^2} \right) \frac{\partial \Psi}{\partial R} \Big|_{0,j}$.

Приняты обозначения: t – время, с (τ – безразмерный аналог); r, z – координаты цилиндрической системы, м (R, Z – безразмерные аналоги); $\Delta r, \Delta z$ – шаги по пространственным координатам, м ($\Delta R, \Delta Z$ – безразмерные аналоги); r_l, z_h – размеры области решения, м; T – температура, К (Θ – безразмерный аналог); T_0 – начальная температура газа и СТТ, К; T_p – начальная температура горячей частицы, К; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); ρ – плотность, кг/м³; C – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); Q_3 – тепловой эффект экзотермической реакции в прогретой области приповерхностного слоя СТТ, Дж/кг; W_3 – массовая скорость экзотермической реакции, кг/(м³·с); k_3^0 – предэкспоненциальный множитель, 1/с; E_3 – энергия активации, Дж/моль; R_t – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); g – ускорение свободного падения, м/с²; u, v – составляющие скорости газа в проекции на оси r, z , м/с (U, V – безразмерные аналоги); ψ – функция тока, м³/с (Ψ – безразмерный аналог); ω – вихрь скорости, 1/с (Ω – безразмерный аналог); ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; β – коэффициент термического расширения, 1/К; $\bar{n}$ – вектор нормали к границе. Индексы: 1 – инертный газ; 2 – горячая частица; 3 – полимерная матрица; 4 – частицы алюминия; b, c – компоненты области решения задачи (рис. 1); i, j – номера шагов по координатам r и z , соответственно; m – масштабный коэффициент.

Система дифференциальных уравнений (12)–(17) с соответствующими начальными и граничными условиями решена методом конечных разностей. При решении уравнений эллиптического типа (12) и (13) использован метод переменных направлений. Применялась схема «с разностями против потока». Для решения разностных аналогов дифференциальных уравнений использован локально-одномерный метод. Система одномерных нелинейных разностных уравнений решена методом итераций с применением метода прогонки на каждой итерации при использовании неявной четырехточечной разностной схемы. Пространственная сетка сгущалась в окрестности области интенсивного прогрева приповерхностного слоя СТТ.

Верификация сформулированной математической модели и оценка достоверности результатов теоретического исследования выполнена проверкой консервативности используемой разностной схемы. Погрешность выполнения закона сохранения энергии в области решения задачи зажигания (рис. 1) не превышала 1,5 %. Также проведено тестирование примененных численных методов и элементов разработанного алгоритма решения системы дифференциальных уравнений на примере группы задач теории теплопроводности и химической кинетики.

Моделирование выполнено при значениях параметров: начальная температура топлива и газа $T_0 = 300$ К, источника энергии $T_p = 700$ – 1500 К; размеры горячей частицы $r_p = 4$ мм, $z_p = 2$ мм; размеры частиц алюминия $r_{met} = z_{met} = 0,08$ мм; размеры области решения $r_l = z_h = 10$ мм. Теплофизические характеристики веществ (рис. 1): $\lambda_1 = 0,026$ Вт/(м·К); $\rho_1 = 1,161$ кг/м³; $C_1 = 1190$ Дж/(кг·К); $\lambda_2 = 36$ Вт/(м·К); $\rho_2 = 8100$ кг/м³; $C_2 = 545$ Дж/(кг·К); $\lambda_3 = 0,472$ Вт/(м·К); $\rho_3 = 1776$ кг/м³; $C_3 = 1260$ Дж/(кг·К); $\lambda_4 = 343$ Вт/(м·К); $\rho_4 = 2700$ кг/м³; $C_4 = 930$ Дж/(кг·К). Кинетические параметры экзотермического реагирования полимерного горючего и окислителя: $E_3 = 50 \cdot 10^3$ Дж/моль, $Q_3 k_3^0 = 1,9 \cdot 10^9$ Дж/(кг·с). Коэффициенты кинематической вязкости $\nu = 1,3 \cdot 10^{-3}$ м²/с и термического расширения $\beta = 3,67 \cdot 10^{-3}$ 1/К. Теоретические исследования выполнены для составов СТТ с различным содержанием (5–25 % масс.) мелкодисперсного металла. Далее представлены результаты изучения процесса зажигания типичного состава смесового топлива: перхлорат аммония + 15 % масс. бутилкаучук + 5 % масс. порошок металла. Варьирование концентрации последнего компонента от 5 до 25 % при постановке задач в рамках разработанной математической модели влияет на расстояние между «соседними» частицами, которое изменяется в диапазоне $(2,1–0,8)r_{met}$ соответственно. Установлено, что даже небольшая концентрация (5 %) металла в СТТ достаточно существенно влияет на характеристики зажигания топлива по сравнению с инициированием горения безметалльного состава при аналогичных условиях. В случае бóльших концентраций порошка металла в составе СТТ его влияние на характеристики исследуемого процесса еще более масштабно.

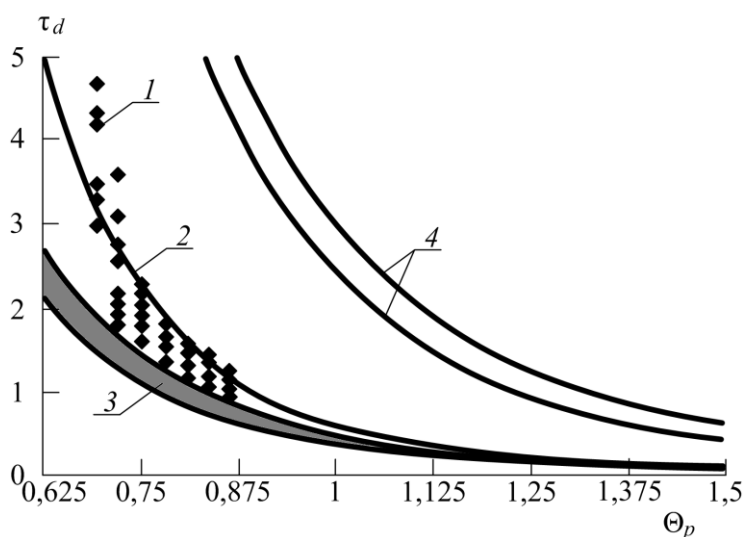


Рис. 2. Времена задержки зажигания СТТ в зависимости от начальной температуры стальной частицы: 1 — экспериментальные данные (А. В. Захаревич), 2–4 — результаты математического моделирования (2 — при учете структурной неоднородности СТТ, 3 — при усреднении теплопроводности топлива по формулам (5)–(11), 4 — по формулам (3) и (4))

При варьировании начальной температуры Θ_p источника энергии в широком диапазоне отклонение времен задержки зажигания τ_d (кривая 2 на рис. 2), установленных в рамках модели, учитывающей явно структурную неоднородность СТТ (частицы алюминия), относительно усредненных значений экспериментальных данных (А. В. Захаревич) не превышает 7 %. Применение модели гомогенной структуры топлива с усредненными теплофизическими свойствами (область 3 на рис. 2) обосновано.

вано при относительно высоких Θ_p (более 1,2), причем прогнозирование эффективной теплопроводности возможно с использованием любого из выражений (5)–(11). При близких к предельным условиям инициирования горения ($\Theta_p \approx 0,625$) отличия времен задержки и минимальных температур зажигания (кривая 2 и область 3 на рис. 2) составляют 75 % и 15 %, соответственно.

Анализ кривых (рис. 3) иллюстрирует масштабы влияния одного из основных рассматриваемых в диссертационной работе факторов – локальности теплового воздействия. При зажигании горючего вещества пластиной или дисперсным потоком «частицы – горячий газ» (аналогично работам У. И. Гольдшлегера и В. В. Барзыкина) индукционный процесс может продолжаться как в течение достаточно короткого промежутка вре-

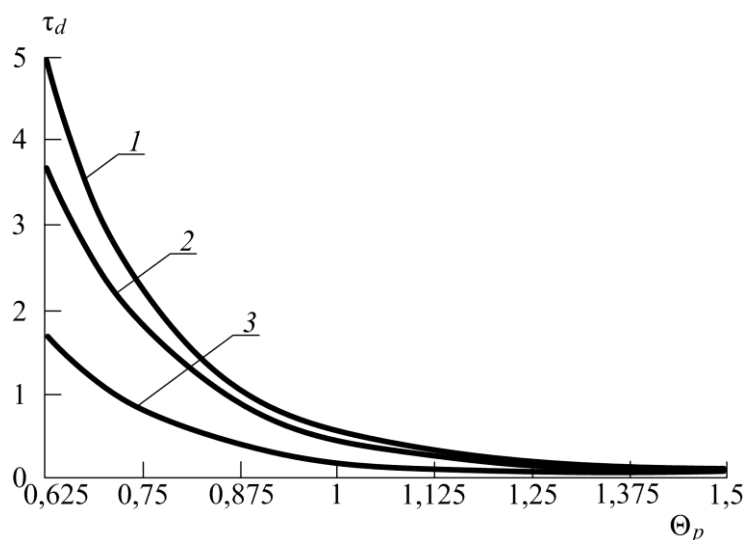


Рис. 3. Времена задержки зажигания металлизированного СТТ в зависимости от начальной температуры источника нагрева: 1 – одиночная частица, 2 – частица в потоке разогретого газа, 3 – пластина

мени при высоких тепловых потоках, так и при длительных временах воздействия менее мощных источников. В случае же нагрева КВ горячими частицами малых (несколько миллиметров) размеров зажигание возможно лишь в определенном интервале начальных температур источника в течение короткого (до нескольких секунд) промежутка времени, когда величина теплового потока в зону зажигания достаточна для прогрева вещества и инициирования горения. Очевидно, что при зажигании КВ одиночной горячей частицей малых размеров процесс остывания локального источника является определяющим для характеристик индукционного периода, особенно при близких к предельным условиям зажигания.

На рис. 4 приведена область устойчивого зажигания СТТ в координатах «амплитуда теплового потока – время задержки зажигания». Границы области определены предельными значениями анализируемых характерных размеров горячей частицы: правая верхняя – $r_p = 1$ мм, левая нижняя – $r_p = 8$ мм. В качестве критерия устойчивости переходного процесса принято условие превышения глубины прогретого приповерхностного слоя (z_w на рис. 1) в момент зажигания топлива установленной теоретически аналогичной характеристики (десятки микрометров) при его стационарном горении.

Установленная область устойчивого зажигания качественно хорошо коррелирует с результатами теоретического исследования, полученными Л. К. Гусаченко, В. Е. Зарко и А. Д. Рычковым при воспламенении КВ световым импульсом. Видно (рис. 4), что при

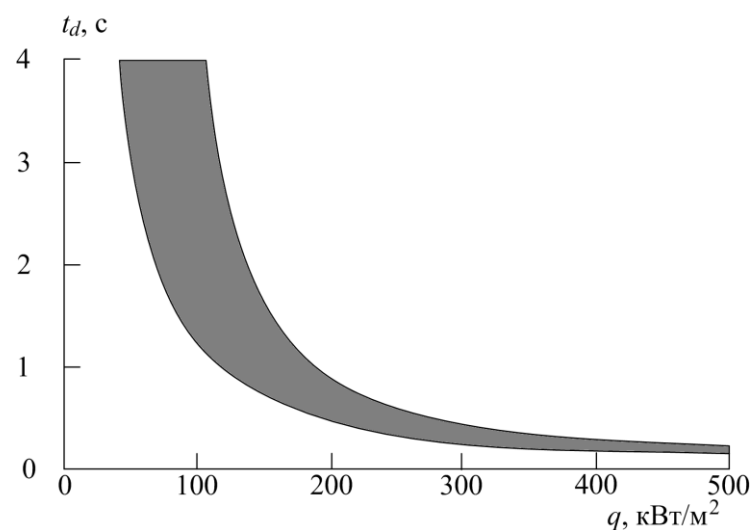


Рис. 4. Область (выделена цветом) устойчивости зажигания СТТ одиночной горячей частицей

изменении теплосодержания частицы (за счет T_p и r_p) можно выделить предельный тепловой поток, ниже которого устойчивое зажигание не реализуется при любой сколь угодно длительной стадии инертного прогрева. В области же относительно высоких значений теплового потока изменение теплосодержания горячей частицы оказывает менее существенное влияние на времена задержки зажигания.

Варьирование характеристик процесса инициирования горения СТТ возможно не только при изменении начальной температуры и размера (формы), но и в результате выбора материала локального источника нагрева. При идентичных значениях первых двух параметров теплосодержание частиц располагается в убывающей последовательности для типичных материалов источников зажигания: сталь, керамика, алюминий, углерод. Для источников нагрева с большой теплоаккумулирующей способностью (сталь) харак-

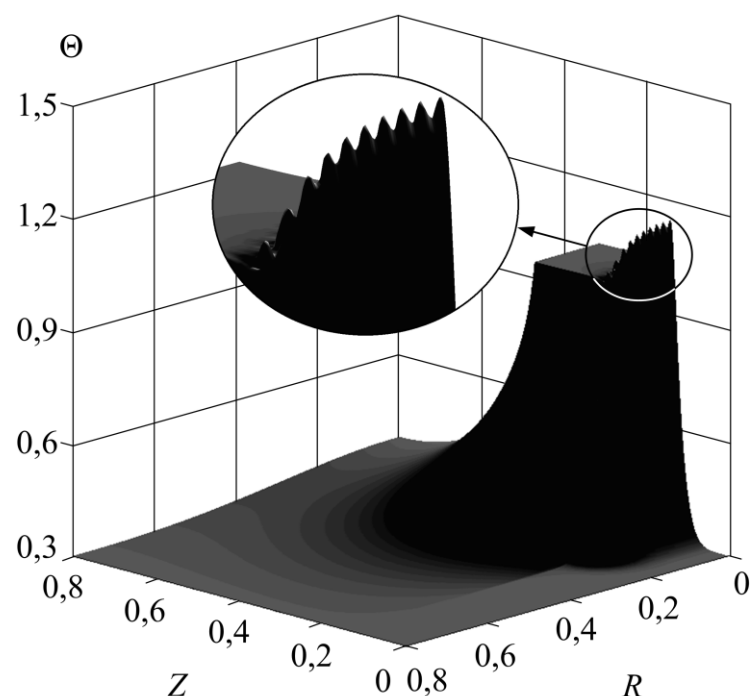


Рис. 5. Температурное поле в момент ($\tau_d = 0,358$) зажигания СТТ при $\Theta_p = 1,2$

терны меньшие (до 60 %) времена задержки зажигания металлизированного топлива и начальные температуры (на 150–200 К), необходимые для инициирования процесса горения, по сравнению с углеродистыми частицами, материал которых имеет минимальную теплоаккумулирующую способность среди рассмотренных.

Независимо от материала источника зона локализации ведущей экзотермической реакции (рис. 5) формируется на оси симметрии ча-

стицы в окрестности прогретой области приповерхностного слоя топлива. В этом сечении теплоотвод от источника нагрева в окружающую среду в поперечном направлении минимален и, соответственно, температура максимальна в каждой точке по сравнению с другими сечениями горячей частицы.

Совокупность представленных во второй главе результатов можно классифицировать как обоснование необходимости описания процессов зажигания гетерогенных КВ горячими частицами в рамках математических моделей, учитывающих как структурную неоднородность состава, так и пространственно-временную неоднородность протекающих физико-химических процессов.

В главе 3 приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований зажигания перспективных в ракетной технике и промышленной теплоэнергетике гелеобразных и суспензионных топлив в условиях кондуктивного (горячие частицы, пластины) и конвективного (поток разогретого воздуха) нагрева.

Численное моделирование зажигания гелеобразного КВ (гидразин + 38 % сжиженный кислород + 5 % соли высокомолекулярных органических кислот) выполнено на примере системы «горячая частица – гелеобразное топливо – газ». Начальная температура топлива близка к криогенной (около 90 К). В качестве локальных источников энергии приняты одиночные разогретые до высоких (более 1000 К) температур частицы малых размеров ($r_p = z_p = 3$ мм) в форме диска.

Разработанная модель газофазного зажигания учитывает взаимосвязанные процессы в конденсированной фазе и газовой среде: кондуктивный нагрев топлива за счет энергии локального источника, кристаллизацию материала разогретой (в начальный момент времени) до температуры плавления металлической частицы, последовательную реализацию двух эндотермических фазовых переходов – плавление в зоне интенсивного прогрева приповерхностного слоя топлива и испарение горючего компонента и окислителя на границе «топливо – газ», формирование в результате диффузионно-конвективного тепломассопереноса в окрестности источника энергии горючей парогазовой смеси, ее прогрев при движении вдоль боковых граней горячей частицы и экзотермическое реагирование компонентов (гидразин и кислород). Предполагалась реализация одной эффективной химической реакции. Критерии зажигания аналогичны условиям инициирования горения металлизированного СТТ при учете протекания ведущей реакции окисления в газовой среде.

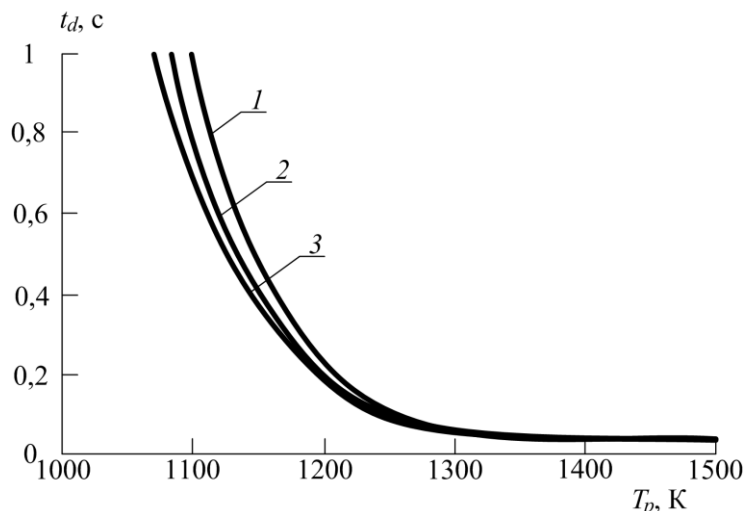


Рис. 6. Времена задержки зажигания гелеобразного топлива в зависимости от начальной температуры горячей стальной частицы при различных начальных температурах KB и газа: 1 – $T_0 = 100$ K, 2 – $T_0 = 90$ K, 3 – $T_0 = 80$ K

чение индукционного периода в результате инертного прогрева KB, начальная температура которого близка к криогенной, а также эндотермических фазовых превращений при плавлении и испарении компонентов топлива. В условиях относительно невысоких начальных температур источника его энергии может быть недостаточно для инициирования горения формирующейся парогазовой смеси.

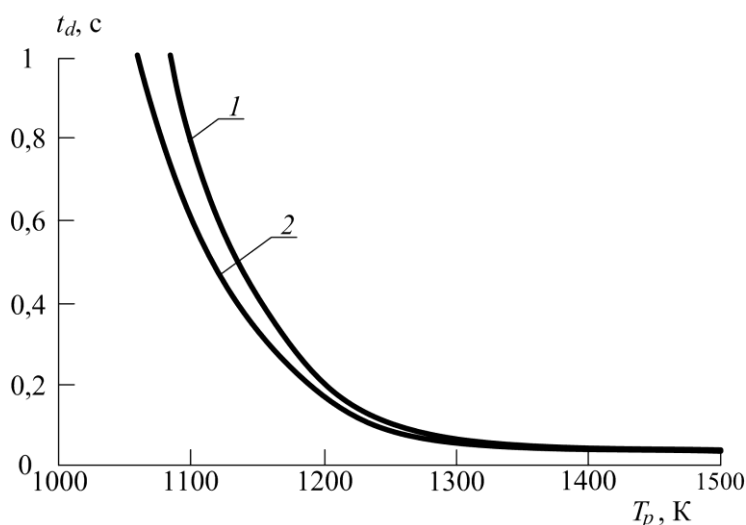


Рис. 7. Времена задержки зажигания гелеобразного топлива в зависимости от начальной температуры горячей стальной частицы, установленные в рамках моделей, учитывающих теплоотвод от локального источника за счет: 1 – теплопроводности, излучения и конвекции, 2 – теплопроводности и излучения

модели конвективного теплоотвода (кривая 1 на рис. 7) и модели без учета этого фактора (кривая 2 на рис. 7), составляет около 23 % в области относительно невысоких начальных температур источника ($T_p \approx 1100$ K), близких к предельным условиям зажигания. При увеличении интенсивности процессов теплопереноса с ростом

Установлено (рис. 6), что минимальные начальные температуры T_p горячих частиц (более 1100 K), необходимые для зажигания гелеобразных KB, существенно превосходят аналогичный параметр (менее 900 K) при инициировании горения твердых (рис. 2, 3) и жидких (Г. В. Кузнецов и П. А. Стрижак) топлив. Высокие значения T_p обусловлены интенсивным отводом теплоты локального источника в конденсированную фазу в те-

В отличие от модели твердофазного зажигания СТТ, где свободно-конвективный теплоотвод от горячей частицы в окружающую среду характеризует интенсивность ее остывания, для модели инициирования горения гелеобразного топлива условия теплопереноса в газовой среде могут более существенно влиять на закономерности формирования горючей смеси. Максимальное отличие значений основной характеристики процесса, установленной в рамках

T_p времена задержки зажигания существенно уменьшаются, влияние конвективного теплоотвода на характеристики исследуемого процесса ослабевает.

Для гелеобразных КВ выявлено, что при локальном нагреве источником ограниченной энергоемкости зона зажигания формируется в малой окрестности основания частицы (рис. 8). В результате уменьшения теплосодержания источника (даже до предельных условий) или его внедрения в приповерхностный слой топлива эта зона смещается от поверхности КВ в направлении движения парогазовой смеси (вдоль оси z) несущественно.

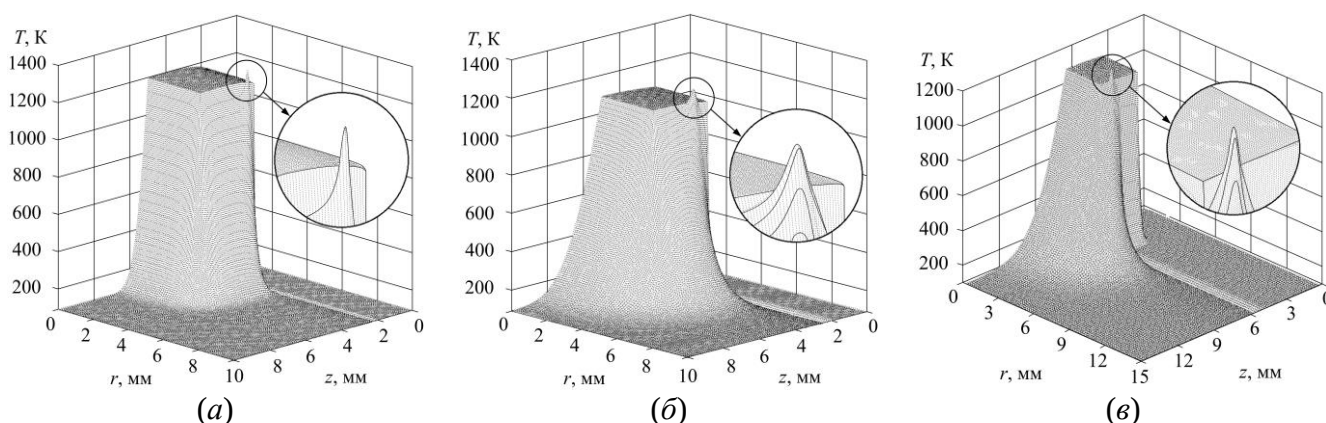


Рис. 8. Температурные поля в момент зажигания гелеобразного топлива при начальных температурах горячей стальной частицы, расположенной на поверхности $T_p = 1300$ К (а), $T_p = 1100$ К (б) и внедренной (на половину характерного размера) в приповерхностный слой $T_p = 1100$ К (в)

Установленный режим зажигания обусловлен тем, что вследствие диффузионно-конвективного тепломассопереноса в окрестности горячей частицы происходит интенсивное формирование горючей смеси и рост скорости экзотермического процесса, что наряду с высокой реакционной способностью компонентов гелеобразного топлива (гидразин – сжиженный кислород) характеризует малую длительность индукционного периода.

Процесс зажигания органоводоугольного топлива (ОВУТ), состоящего из измельченного угля (в том числе низкосортного или отхода углеобогащения), воды и горючего нефтепродукта (например, отработанного масла или отходов нефтепереработки), с одной стороны, имеет достаточно схожие закономерности с инициированием горения гелеобразного топлива (например, стадии инертного прогрева, испарения жидкого горючего компонента, формирования парогазовой смеси), с другой стороны, отличается некоторыми особенностями, например, присутствием частиц конденсированной фазы (диспергированного угля) в суспензии.

Экспериментальные исследования процесса зажигания выполнены для типичного состава ОВУТ: 85 % масс. КЕК каменного угля марки Г (табл. 1) + 15 % масс.

отработанное автомобильное моторное масло (табл. 2). Содержание влаги в КЕКе не превышало 35 %. Диаметр поверхности и толщина слоя образцов топлива составляли около 50 и 10 мм, соответственно. В качестве источников зажигания использовались стальные частицы в форме диска размерами: $r_p = 5$ мм, $z_p = 4$ мм; $r_p = 5$ мм, $z_p = 6$ мм; $r_p = 6$ мм, $z_p = 5$ мм; $r_p = 6$ мм, $z_p = 8$ мм. Начальная температура частиц T_p варьировалась в диапазоне 1223–1373 К.

Таблица 1. Результаты технического и элементного анализа высушенного КЕКа

A^d , %	V^{daf} , %	Q_s^r , МДж/кг	C^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S^{daf} , %	O^{daf} , %
33,82	43,11	22,16	75,12	4,64	0,02	0,23	19,98

A^d – зольность сухой массы, %;

V^{daf} – выход летучих веществ, %;

Q_s^r – теплота сгорания низшей рабочей массы, МДж/кг;

C^{daf} , H^{daf} , N^{daf} , S^{daf} , O^{daf} – содержание углерода, водорода, азота, серы, кислорода, %.

Таблица 2. Характеристики отработанного автомобильного моторного масла

Показатель	Значение
Плотность при 293 К, кг/м ³	871
Влажность, % масс	0,28
Зольность, % масс	0,78
Температура вспышки, К	405
Температура воспламенения, К	491
Теплота сгорания, МДж/кг	43,98

при помощи программного обеспечения Tema Automotive. Значение t_d соответствовало промежутку времени от момента контакта локального источника нагрева с поверхностью ОВУТ до появления пламени в окрестности металлической частицы. Для оценки

Основная характеристика исследуемого процесса (время задержки зажигания t_d) определялась по результатам анализа видеозаписей высокоскоростной камеры Phantom V411 (скорость съемки 4 200 кадров в секунду при полном разрешении 1280 x 800)

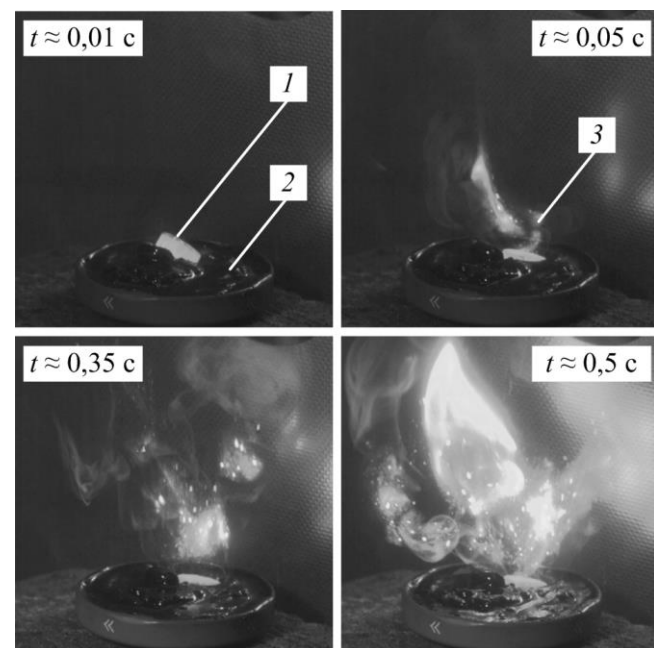


Рис. 9. Видеogramмы зажигания ОВУТ стальной частицей при $T_p \approx 1300$ К, $r_p = 6$ мм, $z_p = 8$ мм: 1 – частица, 2 – топливо, 3 – пламя

случайных погрешностей результатов измерений t_d проводилось не менее 5 повторений эксперимента при идентичных условиях. Систематические погрешности измерения T_p и t_d , обусловленные погрешностями используемых средств измерений, составляли не более 2 %. Случайные ошибки определения значений t_d не превышали 15–20 %.

На рис. 9 видно, что в начальный момент взаимодействия локального источника энергии с ОВУТ происходит интенсивный прогрев приповерхностного слоя, сопровождающийся испарением жидкого

горючего компонента и термическим разложением органической части угля. В окрестности разогретой частицы формируется горючая парогазовая смесь. Последняя при движении в результате диффузионно-конвективного тепломассопереноса вдоль боковых граней частицы прогревается до температуры зажигания, происходит воспламенение. При интенсификации испарения горючей жидкости в результате прогрева приповерхностного слоя топлива частицы угля уносятся потоком газа и зажигаются при прохождении зоны пламенного горения парогазовой смеси.

Установлено (рис. 10), что зависимости $t_d = f(T_p)$ имеют нелинейный характер. В соответствии с теорией зажигания КВ интенсивность переходного процесса возрастает с увеличением теплосодержания (за счет размеров и начальной температуры) источника. При увеличении же T_p влияние размеров частицы на t_d становится менее существенным.

Также выполнены экспериментальные исследования процессов зажигания одиночных капель ОВУТ при взаимодействии с потоком разогретого воздуха и поверхностью горячей пластины (рис. 11). Закономерности и характеристики индукционного периода в условиях конвективного и кондуктивного нагрева прогнозируемо отличаются от параметров воспламенения ОВУТ горячей частицей. Анализ экспериментальных данных впервые позволил установить масштаб этих отличий.

Совокупность полученных в третьей главе результатов можно классифицировать как теоретическое и экспериментальное обоснование возможности энергоэффективного зажигания перспективных в ракетной технике и промышленной теплоэнергетике гелеобразных и суспензионных топлив в условиях локального нагрева источниками ограниченного теплосодержания.

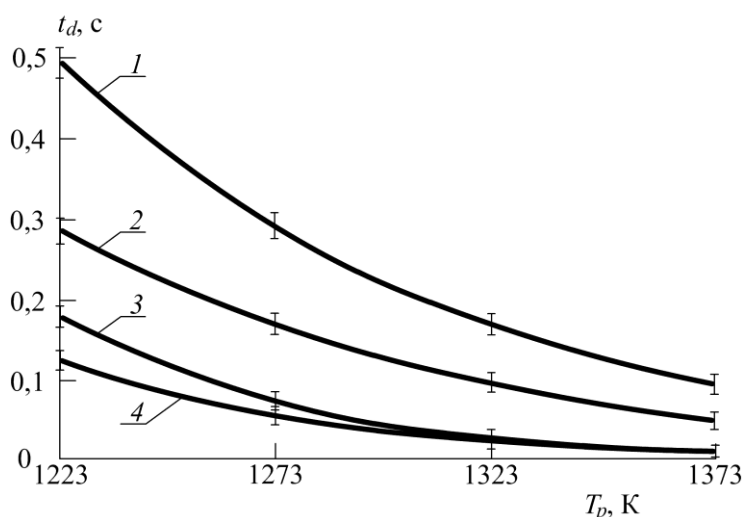


Рис. 10. Времена задержки зажигания ОВУТ в зависимости от начальной температуры стальной частицы: 1 — $r_p = 5$ мм, $z_p = 4$ мм; 2 — $r_p = 5$ мм, $z_p = 6$ мм; 3 — $r_p = 6$ мм, $z_p = 5$ мм; 4 — $r_p = 6$ мм, $z_p = 8$ мм

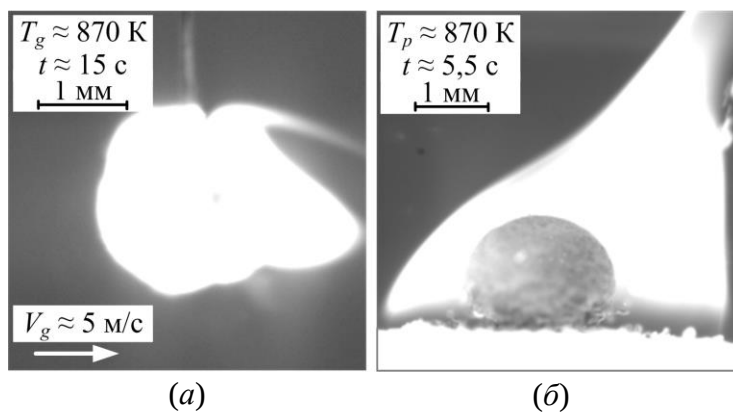


Рис. 11. Видеограммы зажигания одиночных капель ОВУТ в потоке (а) разогретого воздуха, на поверхности (б) горячей пластины

В главе 4 приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований зажигания диспергированного угля в условиях кондуктивного (частицы, пластины) и конвективного (поток воздуха) подвода теплоты. Неконтролируемые процессы нагрева угля представляют высокую пожарную опасность при его использовании в качестве твердого горючего или сырья для производства жидких газообразных топлив, пористых углеродных и строительных материалов.

Математическое моделирование физико-химических процессов, протекающих при локальном нагреве диспергированного твердого топлива, выполнено в системе «горячая частица – измельченный уголь – воздух». Рассматривались наиболее пожароопасные условия взаимодействия высушенного угля с одиночными частицами (размер $r_p = z_p = 3$ мм) в форме диска, разогретыми до температур более 1000 К.

Разработанная модель газозафазного зажигания слоя диспергированного угля учитывает кондуктивный нагрев твердого топлива за счет теплоты локального источника, термическое разложение органической части угля в прогретой (до температур 500–600 К) области приповерхностного слоя, выход летучих веществ, формирование в результате диффузионного массопереноса в окрестности источника газовой смеси, ее прогрев при движении вдоль боковых граней горячей частицы и экзотермическое реагирование в среде окислителя (воздух). При постановке группы задач учитывалась неидеальность теплового контакта на границе «горячая частица – измельченный уголь», обусловленная неоднородностью слоя твердого топлива из-за заполненных воздухом пор. Приняты критерии зажигания, аналогичные условиям инициирования горения гелеобразного топлива.

Теоретическое исследование выполнено для диспергированного угля марки 2Б Шивэ-Овооского бурогоугольного месторождения Монголии (табл. 3), который по теплотехническим свойствам схож с широко распространенными энергетическими углями марок 2Б и 3Б Канско-Ачинского бассейна (Березовское и Ирша-Бородинское месторождения), Азейского месторождения Иркутского бассейна, а также Баганурского месторождения Монголии.

Таблица 3. Результаты технического и элементного анализа бурого угля марки 2Б

W^a , %	A^d , %	V^{daf} , %	Q_s^r , МДж/кг	C^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S^{daf} , %	O^{daf} , %
28	12,3	51,54	14,82	73,27	4,63	0,88	0,93	20,3

W^a – влажность, %;

остальные обозначения аналогичны принятым в табл. 1.

Как правило, насыпной слой диспергированного твердого натурального топлива имеет рыхлую структуру, поэтому при осаждении на его поверхность металлических частиц малых (несколько миллиметров) размеров даже с высоты 0,1–0,15 м возможно внедрение последних в приповерхностный слой измельченного угля. Рассмотрены три наиболее характерные варианта: горячая частица находится на поверхности слоя, частично (на глубину χ) или полностью внедрена в приповерхностный слой угля.

Установлено (рис. 12), что внедрение горячей частицы в слой измельченного угля и увеличение χ при прочих равных условиях ведет к росту времени задержки зажигания t_d и предельной начальной температуры источника T_p , необходимой для инициирования процесса горения. Выявленная закономерность более масштабно проявляется при относительно невысоких значениях T_p (менее 1300 К).

Для случаев $\chi = 0$ и $\chi \rightarrow z_p$ максимальное отличие времен задержки зажигания составляет не менее 55 %. При этом предельное для зажигания значение начальной температуры стальной частицы возрастает с 1050 К (кривая 3 на рис. 12) до 1150 К (кривая 1 на рис. 12). При относительно высоких T_p (более 1300 К) в условиях $t_d < 0,5$ с глубина внедрения существенно меньше влияет на длительность индукционного периода.

Также в результате теоретических исследований установлено, что неоднородность слоя диспергированного твердого топлива влияет на условия теплового контакта с локальным источником нагрева. Заполненные воздухом поры снижают интенсивность теплопередачи на границе «горячая частица – измельченный уголь». Даже в условиях кондуктивного и лучистого подвода теплоты времена задержки зажигания могут возрастать до 20 % по сравнению со случаем идеального теплового контакта, когда приповерхностный слой диспергированного угля прогревается только за счет теплопроводности. Влияние данного фактора на характеристики зажигания, в частности t_d , снижается с ростом начальной температуры локального источника и уменьшением дисперсности частиц угля.

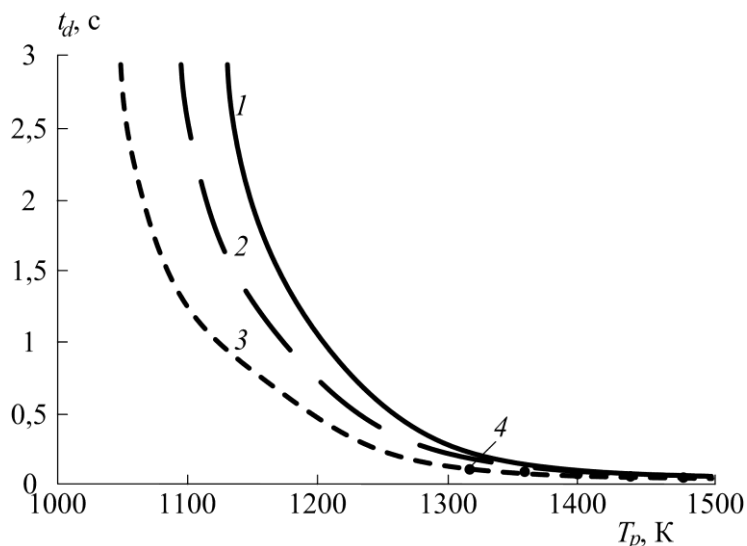


Рис. 12. Зависимость времени задержки зажигания измельченного угля от начальной температуры частицы: 1 – при $\chi \rightarrow z_p$, 2 – при $\chi = 0,5z_p$, 3 – при $\chi = 0$, 4 – экспериментальные данные (А. В. Захаревич)

Выполненные экспериментальные исследования позволили расширить представления о закономерностях процессов зажигания одиночных частиц твердого натурального топлива при кондуктивном и конвективном нагреве. Наиболее интенсивно физико-химические процессы протекают при взаимодействии частицы угля с разогретой до высоких температур металлической пластиной (рис. 13).

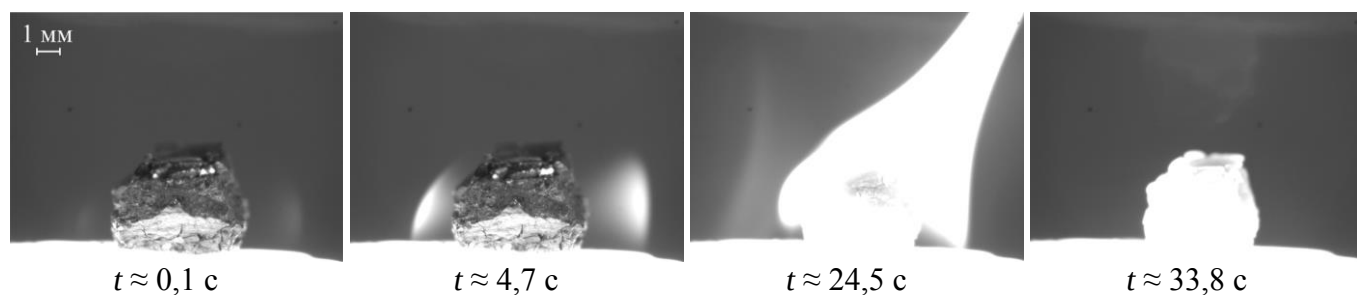


Рис. 13. Видеogramмы зажигания частицы бурого угля марки 2Б на поверхности стальной пластины при $T_p \approx 820$ К

Для каменного угля марки Д Канско-Ачинского угольного бассейна установлено три режима зажигания одиночных частиц (табл. 4) при кондуктивном нагреве на поверхности горячей пластины, характеризующихся размерами частиц и температурой источника. Выявлено (табл. 4), что с увеличением размеров частицы угля выделенные условно границы по температуре источника нагрева для различных режимов индукционного процесса смещаются в направлении больших T_p .

Таблица 4. Характерные времена взаимодействия частиц каменного угля марки Д с разогретой пластиной в режимах термического разложения (1), тления (2), зажигания (3)

Температура пластины / Размер частицы	750 К	800 К	850 К	900 К	950 К	1000 К
4 мм	(1) $t > 20$ с	(2) 18,63 с	(3) 8,51 с	(3) 4,07 с	(3) 2,02 с	(3) 1,04 с
5 мм	(1) $t > 20$ с	(1) $t > 20$ с	(2) 14,21 с	(3) 7,37 с	(3) 3,96 с	(3) 2,96 с
6 мм	(1) $t > 20$ с	(1) $t > 20$ с	(1) $t > 20$ с	(2) 15,06 с	(3) 6,84 с	(3) 3,24 с

Размер частиц твердого натурального топлива является одним из наиболее важных факторов, влияющих на характеристики переходного процесса при кондуктивном и конвективном нагреве. Установлено, что при идентичных условиях подвода теплоты как на поверхности горячей пластиной, так и в потоке разогретого воздуха времена задержки зажигания мелкодисперсных и относительно крупных частиц угля отличаются в десятки и даже сотни раз.

Характерной особенностью инициирования и развития горения относительно крупных частиц угля при конвективном нагреве является зарождение локальной зоны зажигания (рис. 14) в окрестности области взаимодействия частицы с набегающим потоком разогретого воздуха. Результаты проведенных экспериментов с частицами наиболее характерных форм (неправильный многогранник, сфера, эллипсоид) в рамках метода цифровой трассерной визуализации потоков Particle Image Velocimetry позволили установить, что конфигурация их поверхности довольно существенно (10–25 %) влияет на длительность индукционного периода.

При прогреве частицы инициируется испарение влаги и термическое разложение угля. Наиболее интенсивно эти процессы протекают на фронтальной стороне частицы, менее интенсивно – на тыльной стороне в области меньших скоростей потока воздуха (рис. 15). В результате испарения влаги и выхода летучих веществ в малой зоне на поверхности частицы с фронтальной стороны достигаются условия зажигания углеродистого остатка (рис. 14). Фронт горения распространяется

по поверхности частицы в направлении движения потока воздуха. Выделяющиеся летучие компоненты частично уносятся потоком, при этом максимальная концентрация горючей газовой смеси достигается в области формирования вихрей на тыльной стороне частицы (рис. 15), где регистрировалось пламенное горение (рис. 14).

Для частиц неправильной формы установлены меньшие времена задержки зажигания, что объясняется более интенсивным прогревом отдельных выступов. В отличие от частиц с гладкой поверхностью такие выступы являются зонами локализации процесса инициирования горения. Длительность прогрева отдельного выступа до выполнения условий зажигания углеродистого остатка существенно меньше дли-

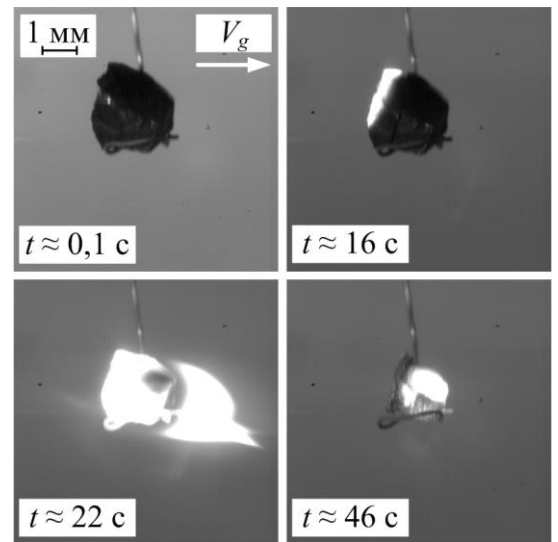


Рис. 14. Видеограммы зажигания частицы бурого угля марки 2Б в потоке разогретого воздуха при $T_g \approx 800$ К, $V_g \approx 5$ м/с

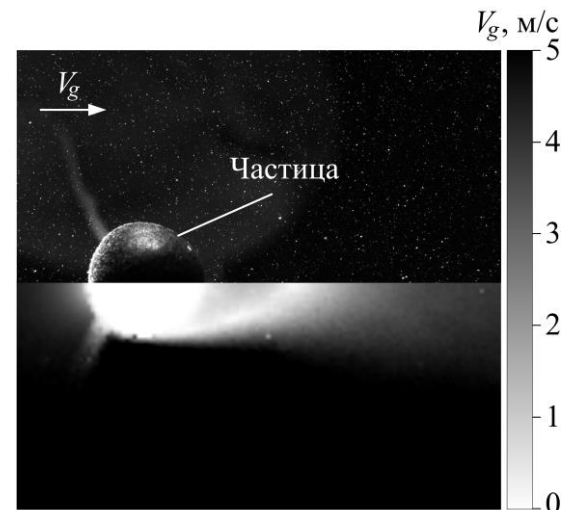


Рис. 15. Внешний вид частицы угля (верхняя часть) и распределение скорости потока воздуха (нижняя часть) в ее окрестности

тельности индукционного периода при формировании локальной зоны зажигания частиц в форме сферы и эллипсоида. Полученный результат объясняется тем, что для последних в отличие от частиц с шероховатой поверхностью характерен интенсивный сток теплоты из зоны прогрева приповерхностного слоя вглубь частицы, что ведет к росту длительности стадии инертного прогрева.

Приведенные в четвертой главе теоретические следствия являются основанием для вывода о возможном использовании разработанной математической модели, установленных характеристик и предельных условий для прогноза пожарной опасности процессов кондуктивного и конвективного нагрева измельченного угля.

Глава 5 содержит результаты численного моделирования процессов инициирования горения типичных термопластичных полимерных материалов (полистирол, полиметилметакрилат) источниками ограниченной энергоемкости. Теоретические основы таких процессов с одной стороны создают предпосылки для разработки технологий зажигания новых видов топлив, например, для гибридных ракетных двигателей, с другой стороны позволяют организовывать мероприятия для эффективного предупреждения нерегламентированных возгораний широко распространенных конструкционных полимерных материалов.

Предполагалось, что в начальный момент времени локальный источник, разогретый до температуры T_p , существенно превышающей начальную температуру полимера T_0 , находится на его поверхности в условиях идеального теплового контакта. В результате кондуктивной теплопередачи происходит прогрев тонкого приповерхностного слоя ПМ за счет теплоты горячей частицы, ускоряются процессы термического разложения горючего материала, выделяются летучие компоненты, которые вдуваются в окружающую среду в малой окрестности основания локального источника энергии. Путем диффузионно-конвективного массопереноса газообразные продукты пиролиза перемешиваются с окислителем (воздух). Дополнительный прогрев газовой смеси происходит при ее движении вдоль боковых граней горячей частицы. В результате достижения условий воспламенения инициируется газофазное зажигание. В качестве критериев зажигания приняты условия, аналогичные моделям газофазного инициирования горения гелеобразного топлива и диспергированного угля.

Математическая модель для группы задач сопряженного тепломассопереноса с химическим реагированием, описывающая взаимосвязанные процессы теплопередачи и термического разложения в конденсированной фазе, а также тепломассопереноса и

окисления в газовой среде, сформулирована в виде системы нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных. Для разогретых частиц в форме параллелепипеда постановка задач выполнена в декартовой системе координат.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega. \quad (18)$$

Уравнение движения газовой смеси:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = v \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) + g\beta \frac{\partial T_1}{\partial x}. \quad (19)$$

Уравнение теплопроводности для газовой смеси:

$$\rho_1 C_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial t} + u \frac{\partial T_1}{\partial x} + v \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right) + Q_1 W_1. \quad (20)$$

Уравнение диффузии продуктов термического разложения:

$$\rho_1 \left(\frac{\partial \mu_f}{\partial t} + u \frac{\partial \mu_f}{\partial x} + v \frac{\partial \mu_f}{\partial y} \right) = \rho_1 D_1 \left(\frac{\partial^2 \mu_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mu_f}{\partial y^2} \right) - W_1. \quad (21)$$

Уравнение баланса компонентов газовой смеси:

$$\mu_f + \mu_o = 1. \quad (22)$$

Уравнение теплопроводности для горячей частицы:

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right). \quad (23)$$

Уравнение теплопроводности для ПМ:

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right) - Q_3 W_3. \quad (24)$$

Уравнение химической кинетики для ПМ:

$$\frac{\partial \eta_3}{\partial t} = (1 - \eta_3) k_3^0 \exp \left(-\frac{E_3}{R_t T_3} \right). \quad (25)$$

Массовые скорости реакций окисления и термического разложения:

$$W_1 = \rho_1 \mu_f \mu_o k_1^0 \exp \left(-\frac{E_1}{R_t T_1} \right), \quad W_3 = (1 - \eta_3) \rho_3 k_3^0 \exp \left(-\frac{E_3}{R_t T_3} \right).$$

Коэффициент диффузии продуктов термического разложения ПМ в воздухе:

$$D_1 = D_0 \left(\frac{T_1}{273} \right)^{1,7}.$$

Теплофизические характеристики газовой смеси вычислялись с учетом объемных концентраций компонентов:

$$\rho_1 = \rho_f \varphi_f + \rho_o \varphi_o, \quad C_1 = C_f \varphi_f + C_o \varphi_o, \quad \lambda_1 = \lambda_f \varphi_f + \lambda_o \varphi_o,$$

где $\varphi_f = \frac{\mu_f / \rho_f}{\mu_f / \rho_f + \mu_o / \rho_o}, \quad \varphi_f + \varphi_o = 1.$

Начальные и граничные условия аналогичны краевым условиям, сформулированным для разработанной модели твердофазного зажигания металлизированного СТТ. На границе «полимер – воздух» учитывался вдув продуктов термического разложения ПМ в среду окислителя:

$$-\rho_1 D_1 \frac{\partial \mu_f}{\partial y} = \int_{y=0}^{y=y_1} W_3 dy, \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = u, \quad -\frac{\partial \psi}{\partial x} = v.$$

Алгоритм решения системы уравнений (18)–(25) с соответствующими начальными и граничными условиями аналогичен алгоритму, разработанному в главе 2.

Оценка достоверности результатов численного моделирования выполнена проверкой консервативности используемой разностной схемы. Погрешность выполнения закона сохранения энергии в области решения задачи зажигания не превышала 2,5 %. Также проведено тестирование используемых методов и элементов разработанного алгоритма решения на примере группы задач конвективного теплопереноса и кондуктивной теплопроводности с термическим разложением вещества.

Моделирование выполнено при значениях параметров: начальная температура полиметилметакрилата (ПММА) и воздуха $T_0 = 300$ К, источника энергии $T_p = 960$ – 1150 К; размеры горячей частицы $x_p = y_p = 2$ мм; размеры области решения $x_l = y_h = 20$ мм. Теплофизические характеристики веществ: $\lambda_o = 0,026$ Вт/(м·К); $\rho_o = 1,161$ кг/м³; $C_o = 1190$ Дж/(кг·К); $\lambda_2 = 36$ Вт/(м·К); $\rho_2 = 8100$ кг/м³; $C_2 = 545$ Дж/(кг·К); $\lambda_3 = 0,2$ Вт/(м·К); $\rho_3 = 1200$ кг/м³; $C_3 = 1500$ Дж/(кг·К); $\lambda_f = 0,059$ Вт/(м·К); $\rho_f = 0,5$ кг/м³; $C_f = 1100$ Дж/(кг·К). Кинетические параметры реакций окисления и термического разложения: $E_1 = 96,8 \cdot 10^3$ Дж/моль, $Q_1 k_1^0 = 17,6 \cdot 10^{13}$ Дж/(кг·с); $E_3 = 188 \cdot 10^3$ Дж/моль, $Q_3 k_3^0 = 5,8 \cdot 10^{13}$ Дж/(кг·с). Коэффициенты диффузии $D_0 = 0,142 \cdot 10^{-4}$ м²/с, кинематической вязкости $\nu = 1,4 \cdot 10^{-5}$ м²/с и термического расширения $\beta = 0,9 \cdot 10^{-3}$ 1/К.

Специфика многих полимеров (особенно термопластичных) заключается в том, что при нагреве они размягчаются (аморфные) или расплавляются (кристаллические). Поэтому теплофизические свойства таких материалов в течение индукционного периода могут достаточно существенно изменяться, что в условиях нагрева источником ограниченной энергоемкости может оказывать влияние на условия и характеристики зажигания.

Установлено (рис. 16), что учет фактора изменения теплофизических характеристик ПММА ведет к увеличению времен задержки зажигания на 15–25 % по сравнению с условием постоянства ρ_3 , C_3 и λ_3 . Отличие значений t_d максимально при начальных температурах локального источника, близких к предельным условиям зажигания. Полученный результат можно объяснить влиянием повышения теплоак-

кумуляционной способности ($Q_3^0 = \rho_3 C_3 V_3 (T_3 - T_3^0)$) прогретого слоя ПММА с увеличением теплоемкости. Также рост теплопроводности полимера при прогреве до температуры стеклования интенсифицирует теплоотвод из прогретой области в глубинные слои ПМ.

Менее существенное (не более 5 %) влияние на увеличение времени задержки зажигания оказывает учет фактора выгорания прогретой области приповерхностного слоя полимера в окрестности границы контакта с локальным источником нагрева. При близких к предельным условиям инициирования горения длительность индукционного периода превышает 3 с. В течение такого промежутка времени приповерхностный слой полимера прогревается до температуры интенсивного термического разложения на глубину около 0,5 мм. В таких условиях относительная часть выгоревшего вещества (глубина превращения) в результате выделения летучих продуктов пиролиза даже не достигает 15 % в сечении, соответствующем максимальному тепловому потоку от горячей частицы.

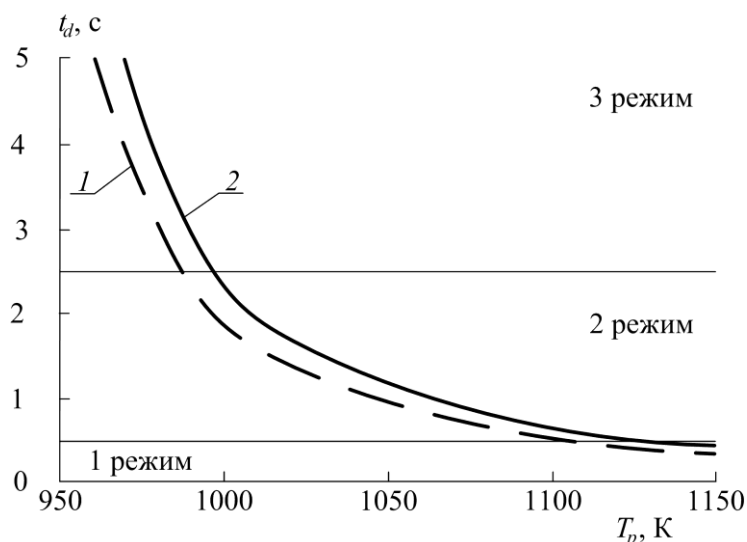


Рис. 16. Зависимости времен задержки зажигания ПММА от начальной температуры частицы: 1 – при постоянных теплофизических характеристиках, 2 – при учете связи теплофизических характеристик с температурой

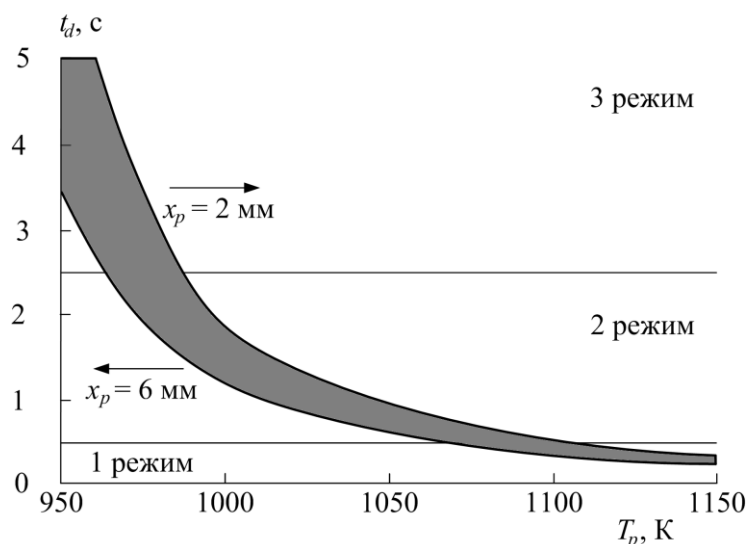


Рис. 17. Времена задержки зажигания ПММА стальной частицей в форме параллелепипеда при варьировании x_p от 2 до 6 мм

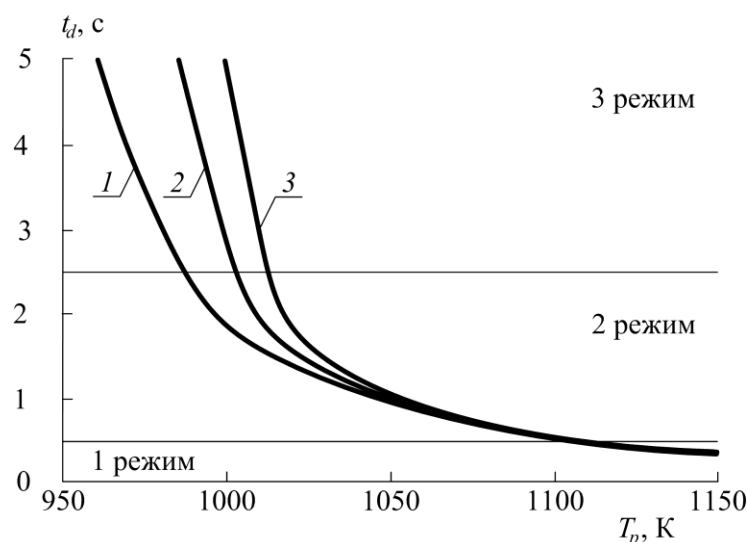


Рис. 18. Времена задержки зажигания ПММА стальной частицей (размер 2 мм) в форме: 1 – параллелепипеда, 2 – многогранника, 3 – диска

Теплоаккумулирующая способность локального источника нагрева зависит не только от его начальной температуры, но и от конфигурации частицы, варьирование параметров которой при изменении размеров (рис. 17) и формы (рис. 18) может достаточно существенно влиять на характеристики и условия зажигания ПМ. Среди всего разнообразия форм горячих частиц можно выделить три наиболее характерные, теплосодержание которых при прочих равных условиях возрастает в последовательности: диск, многогранник, параллелепипед.

Полученные результаты (рис. 17, 18) можно объяснить в рамках анализа установленных трех режимов зажигания, характеризующихся взаимосвязанными параметрами локального источника энергии (начальная температура) и процесса зажигания (время задержки, распо-

ложение зоны воспламенения (рис. 19) в окрестности частицы). Выделенные на рис. 16–18 режимы зажигания справедливы для разных конфигураций горячих частиц. Отличие заключается лишь в предельных значениях диапазонов начальных температур локальных источников энергии. Например, при изменении x_p от 2 до 6 мм происходит уменьшение предельных температур для всех режимов зажигания на 20–40 К (рис. 17).

Для первого режима зажигания при $T_p > 1100$ К и $t_d < 0,5$ с в течение малого интервала времени тонкий приповерхностный слой ПМ прогревается до температуры интенсивного термического разложения. Условия инициирования горения достига-

ются вследствие достаточно высокой концентрации и температуры летучих веществ у основания горячей частицы (рис. 19, а).

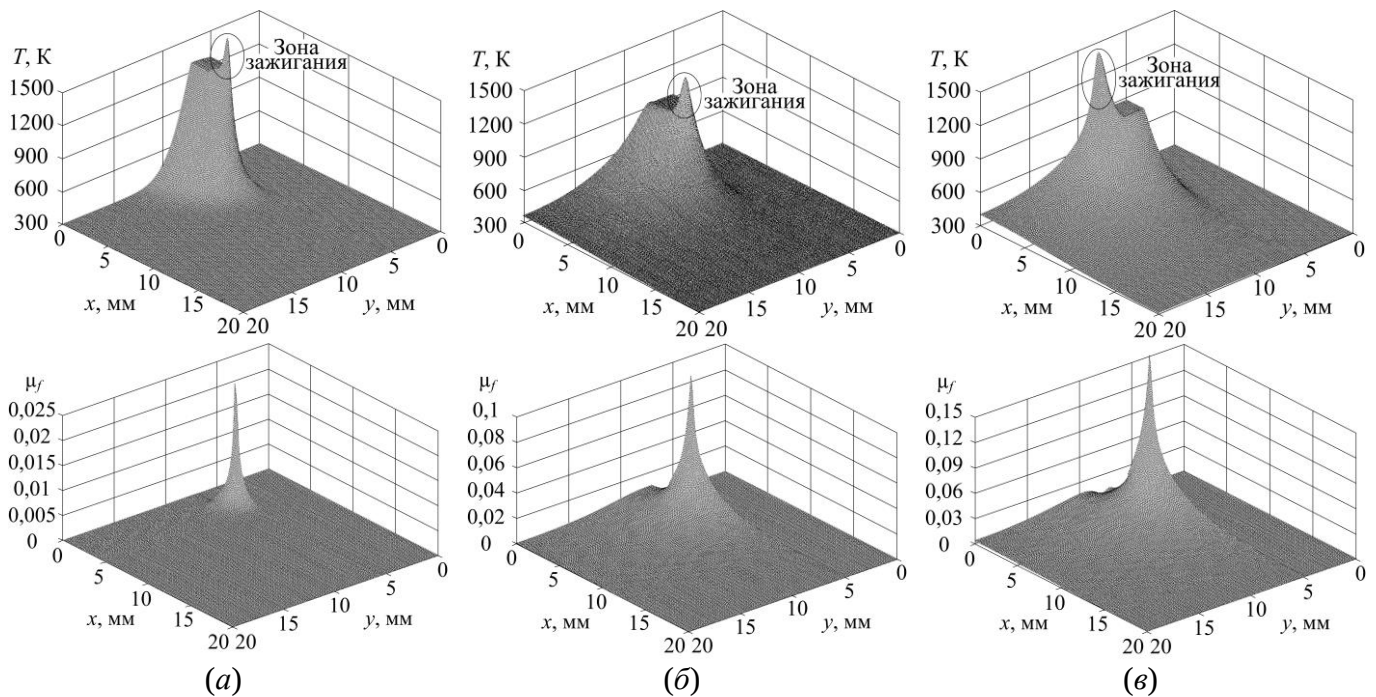


Рис. 19. Температурное поле в области решения задачи (T) и поле концентрации продуктов термического разложения ПМ (μ_f) в момент зажигания частиц в форме параллелепипеда $x_p = y_p = 2$ мм: (а) $t_d = 0,394$ с при $T_p = 1125$ К, (б) $t_d = 1,927$ с при $T_p = 1000$ К, (в) $t_d = 3,104$ с при $T_p = 975$ К

В условиях второго режима при $980 < T_p < 1100$ К, $0,5 < t_d < 2,5$ с зона зажигания расположена в окрестности боковой грани горячей частицы (рис. 19, б). С уменьшением начальной температуры локального источника энергии влияние теплопереноса в приповерхностном слое ПМ и тепломассопереноса в газовой среде на характеристики зажигания возрастает, что ведет к увеличению времени задержки и смещению положения зоны зажигания в направлении движения газовой смеси. При реализации третьего режима зажигания ($T_p < 980$ К, $t_d > 2,5$ с) температура локального источника близка к значениям, соответствующим минимальным условиям реализации термического разложения ПМ. Относительно невысокая температура частицы является причиной длительного прогрева приповерхностного слоя полимера до выполнения условий интенсивного термического разложения и длительного прогрева газовой смеси до зажигания летучих веществ. В этом случае даже при невысокой теплопроводности ПММА происходит существенный отвод теплоты от локального источника энергии в глубинные слои ПМ. Прогрев газовой смеси реализуется при движении вдоль боковых граней источника, а условия зажигания достигаются уже над частицей (рис. 19, в).

Также в результате теоретического исследования зажигания ПМ несколькими нагретыми до высоких температур частицами выделены диапазоны изменения параметров (начальная температура и расстояние между источниками), в которых анализ закономерностей и характеристик инициирования горения можно выполнять в рамках более простой математической модели «одионочная горячая частица – ПМ – воздух». В условиях же относительно невысокой начальной температуры локальных источников нагрева при расстоянии между ними, не превышающем характерного размера частицы, применение этой модели может привести к достаточно большим (не менее 10–15 %) погрешностям прогноза характеристик исследуемого процесса.

Представленные в пятой главе результаты можно классифицировать как основные элементы теории зажигания полимерных горючих локальными источниками ограниченной энергоемкости, применимой для разработки энергоэффективных технологий инициирования горения новых топлив и предупреждения пожароопасного взаимодействия малокалорийных источников с конструкционными полимерами.

В заключении подведены основные итоги диссертационного исследования и сформулированы соответствующие выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

1. Впервые в рамках математического аппарата механики сплошной среды разработаны основные положения теории зажигания структурно-неоднородных (металлизированные смесевые, гелеобразные и диспергированные топлива) конденсированных веществ и полимерных материалов при локальном нагреве источниками ограниченной энергоемкости.

2. Разработан новый подход к теоретическому описанию процессов тепломассопереноса с химическим реагированием, протекающих при инициировании горения структурно-неоднородных конденсированных веществ и полимерных материалов в результате взаимодействия с разогретыми до высоких температур металлическими и неметаллическими частицами малых размеров, отличающийся от известных учетом в явном виде гетерогенной структуры топлив и системы «КВ – локальный источник нагрева».

3. Впервые сформулированы физические и математические модели зажигания конденсированных веществ для наиболее типичных систем: «одионочная горячая частица – металлизированное смесевое твердое топливо – инертный газ», «группа горячих частиц – металлизированное смесевое твердое топливо – инертный газ», «го-

рячая частица – гелеобразное топливо – инертный газ», «одиночная горячая частица – измельченный уголь – воздух», «группа горячих частиц – измельченный уголь – воздух», «одиночная горячая частица – полимерный материал – воздух», «группа горячих частиц – полимерный материал – воздух».

4. Обоснована целесообразность описания процессов зажигания гелеобразных топлив в рамках математической модели, существенно отличающейся от известных математических моделей зажигания твердых и жидких конденсированных веществ.

5. Разработаны и программно реализованы алгоритмы решения сингулярно возмущенных краевых задач в виде систем нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями для большой группы систем «КВ – локальный источник нагрева».

6. Впервые установлены предельные условия и наиболее характерные режимы зажигания широко распространенных металлизированных смесевых топлив, термопластичных полимеров, диспергированных твердых натуральных топлив, а также перспективных гелеобразных и суспензионных топлив при локальном нагреве источниками ограниченной энергоемкости. Теоретически и экспериментально обоснована устойчивость переходных процессов при выполнении соответствующих необходимых (критерий зажигания) и достаточных (глубина прогрева, глубина «активного пиролиза» приповерхностного слоя) условий инициирования горения.

7. В результате выполненных широкомасштабных теоретических и экспериментальных исследований установлено влияние большой группы значимых факторов (начальная температура, размеры, форма, теплофизические свойства и количество локальных источников нагрева, их частичное или полное внедрение в приповерхностный слой конденсированного вещества, отсутствие идеального теплового контакта на границе «горячая частица – конденсированное вещество», зависимость теплофизических свойств веществ и материалов от температуры, выгорание приповерхностного слоя конденсированного вещества, конвективный и радиационный теплоотвод от источника нагрева и другие) на характеристики индукционного периода. Показано, что при близких к предельным условиям зажигания влияние анализируемых факторов максимально. В условиях интенсивных физико-химических процессов влияние значимых факторов на характеристики переходного процесса менее существенно.

8. Обосновано, что учет в явном виде гетерогенной структуры конденсированного вещества (даже при равномерном распределении монодисперсных компонентов с существенно отличающимися теплофизическими характеристиками) в отличие от метода усреднения по объему топлива теплофизических свойств всех компонентов значительно повышает достоверность определения характеристик индукционного процесса, в частности времен задержки и предельной температуры зажигания, что подтверждается хорошей корреляцией результатов теоретического исследования и известных экспериментальных данных.

9. Впервые для металлизированных смесевых, гелеобразных и диспергированных топлив, а также термопластичных полимеров установлены диапазоны варьирования параметров системы «несколько горячих частиц – конденсированное вещество – газ», при которых анализ закономерностей зажигания группой разогретых до высоких температур частиц можно выполнять в рамках относительно простых математических моделей, описывающих взаимодействие конденсированного вещества с одиночным источником.

10. Новые знания, полученные в результате выполненных исследований инициирования процессов горения конденсированных веществ с существенно неоднородной структурой в условиях локального нагрева источниками ограниченной энергоемкости, представляют интерес для разработки теоретических основ перспективной технологии зажигания новых видов ракетных топлив, а также предупреждения нерегламентированных возгораний полимерных материалов и твердых натуральных топлив.

11. Результаты работы используются в Национальном исследовательском Томском политехническом университете при подготовке аспирантов по специальностям 01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества, 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Автор выражает благодарность научному консультанту – доктору физико-математических наук, профессору Гению Владимировичу Кузнецову, а также доктору физико-математических наук, доценту Павлу Александровичу Стрижаку за конструктивные замечания при обсуждении результатов выполненных исследований.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня рецензируемых научных изданий
для опубликования основных научных результатов диссертаций

1. Глушков, Д. О. Численное моделирование твердофазного зажигания металлизированного конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей / Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // **Химическая физика**. – 2011. – Т. 30, № 12. – С. 35–41.
2. Глушков, Д. О. Численное исследование процесса зажигания металлизированного конденсированного вещества внедренным в приповерхностный слой источником / Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // **Химическая физика**. – 2013. – Т. 32, № 5. – С. 55–61.
3. Глушков, Д. О. Твердофазное зажигание смесового топлива горячей частицей при свободноконвективном теплоотводе во внешнюю среду / Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // **Химическая физика**. – 2014. – Т. 33, № 4. – С. 38–47.
4. Глушков, Д. О. Зажигание полимерного материала одиночными горячими металлическими и неметаллическими частицами при диффузионно-конвективном тепло-массопереносе в среде окислителя / Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // **Химическая физика**. – 2014. – Т. 33, № 9. – С. 26–33.
5. Глушков, Д. О. «Низкотемпературное» зажигание частицы угля в потоке воздуха / Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // **Химическая физика**. – 2015. – Т. 34, № 3. – С. 48–56.
6. Глушков, Д. О. Зажигание смесового топлива горячей частицей в условиях неидеального теплового контакта / Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // **Химическая физика**. – 2015. – Т. 34, № 7. – С. 39–45.
7. Глушков, Д. О. Об устойчивости зажигания смесового твердого топлива локальным источником ограниченной энергоемкости / Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // **Физика горения и взрыва**. – 2014. – Т. 50, № 6. – С. 54–60.
8. Глушков, Д. О. Математическое моделирование воспламенения частиц угля в потоке воздуха / Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // **Химия твердого топлива**. – 2015. – № 2. – С. 17–23.

9. Вершинина, К. Ю. Отличия характеристик зажигания водоугольных суспензий и композиционного жидкого топлива / К. Ю. Вершинина, Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // **Химия твердого топлива**. – 2016. – № 2. – С. 21–33.
10. Глушков, Д. О. Зажигание частицы угля на нагретой поверхности / Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак, О. В. Шарыпов // **Химия твердого топлива**. – 2016. – № 4. – С. 9–15.
11. Глушков, Д. О. Влияние формы локального источника энергии на условия зажигания структурно-неоднородного твердого конденсированного вещества / Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // **Химическая физика и мезоскопия**. – 2012. – Т. 14, № 3. – С. 334–340.
12. Глушков, Д. О. Моделирование зажигания смесового топлива источником ограниченного теплосодержания при учете зависимости теплофизических характеристик материалов и веществ от температуры / Д. О. Глушков, Е. В. Кравченко, П. А. Стрижак // **Химическая физика и мезоскопия**. – 2013. – Т. 15, № 2. – С. 208–215.
13. Глушков, Д. О. Определение термокинетических характеристик зажигания диспергированного конденсированного вещества в условиях локального подвода энергии / Д. О. Глушков, А. В. Захаревич, П. А. Стрижак // **Химическая физика и мезоскопия**. – 2013. – Т. 15, № 3. – С. 343–350.
14. Глушков, Д. О. О влиянии выгорания на интегральные характеристики зажигания металлизированного смесового твердого топлива при локальном нагреве / Д. О. Глушков // **Химическая физика и мезоскопия**. – 2014. – Т. 16, № 1. – С. 52–59.
15. Глушков, Д. О. Сравнительная оценка основных характеристик зажигания капель водоугольного и искусственного композиционного жидкого топлива в потоке разогретого воздуха / Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // **Химическая физика и мезоскопия**. – 2015. – Т. 17, № 4. – С. 501–510.
16. Вершинина, К. Ю. Прогностическое моделирование газофазного зажигания продуктов термического разложения угля / К. Ю. Вершинина, Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // **Химическое и нефтегазовое машиностроение**. – 2015. – № 8. – С. 36–39.
17. Накоряков, В. Е. Низкотемпературное зажигание капель суспензионных органоугольных топлив / В. Е. Накоряков, Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // **Доклады Академии наук**. – 2016. – Т. 469, № 2. – С. 167–172.

18. Glushkov, D. O. Organic coal-water fuel: problems and advantages (review) / D. O. Glushkov, P. A. Strizhak, M. Yu. Chernetskii // **Thermal Engineering**. – 2016. – Vol. 63, No. 10. – P. 707–717.
19. Жуйков, А. В. Растопка котлов в условиях конвективного нагрева пыли высокорекреационного угля / А. В. Жуйков, В. А. Кулагин, М. П. Баранова, Д. О. Глушков // **Теплоэнергетика**. – 2016. – № 12. – С. 13–16.
20. Глушков, Д. О. Численное исследование тепломассопереноса при зажигании полимерного материала внедренным в приповерхностный слой источником энергии / Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // **Тепловые процессы в технике**. – 2013. – № 9. – С. 417–423.
21. Glushkov, D. O. Burning properties of slurry based on coal and oil processing waste / D. O. Glushkov, S. Y. Lyrshchikov, S. A. Shevyrev, P. A. Strizhak // **Energy and Fuels**. – 2016. – Vol. 30, No. 4. – P. 3441–3450.
22. Glushkov, D. O. Minimum temperatures for sustainable ignition of coal water slurry containing petrochemicals / D. O. Glushkov, P. A. Strizhak, K. Yu. Vershinina // **Applied Thermal Engineering**. – 2016. – Vol. 96. – P. 534–546.
23. Glushkov, D. O. Influence of organic coal-water fuel composition on the characteristics of sustainable droplet ignition / D. O. Glushkov, D. P. Shabardin, P. A. Strizhak, K. Yu. Vershinina // **Fuel Processing Technology**. – 2015. – Vol. 143. – P. 60–68.
24. Glushkov, D. O. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: analysis of key aspects / D. O. Glushkov, S. V. Syrodoy, A. V. Zhakharevich, P. A. Strizhak // **Fuel Processing Technology**. – 2016. – Vol. 148. – P. 224–235.
25. Glushkov, D. O. Numerical research of heat and mass transfer during low-temperature ignition of a coal particle / D. O. Glushkov, P. A. Strizhak, O. V. Vysokomornaya // **Thermal Science**. – 2015. – Vol. 19, No. 1. – P. 285–294.
26. Glushkov, D. O. Heat and mass transfer at ignition of solid condensed substance with relatively low calorific power by a local energy source / D. O. Glushkov, P. A. Strizhak // **Journal of Engineering Thermophysics**. – 2012. – Vol. 21, No. 1. – P. 69–77.
27. Glushkov, D. O. Mathematical modeling of heat and mass transfer processes with chemical reaction at polymeric material ignition by several small-size hot particles / D. O. Glushkov, P. A. Strizhak // **Mathematical Problems in Engineering**. – 2015. – Vol. 2015. – Article No. 614143. – P. 1–8.

28. Глушков, Д. О. Зажигание полимерного материала одиночной, нагретой до высоких температур частицей / Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // **Пожаровзрывобезопасность**. – 2011. – Т. 20, № 9. – С. 3–8.

29. Глушков, Д. О. Зажигание полимерного материала нагретой до высоких температур металлической частицей в условиях конвективного тепломассопереноса / Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // **Пожаровзрывобезопасность**. – 2011. – Т. 20, № 12. – С. 15–22.

30. Глушков, Д. О. Определение кинетических параметров зажигания диспергированного конденсированного вещества при локальном нагреве / Д. О. Глушков, А. В. Захаревич, П. А. Стрижак // **Пожаровзрывобезопасность**. – 2013. – Т. 22, № 6. – С. 24–31.

31. Глушков, Д. О. Теоретическая оценка устойчивости зажигания типичного полимерного материала локальным источником энергии / Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // **Пожаровзрывобезопасность**. – 2014. – Т. 23, № 2. – С. 10–19.

32. Вершинина, К. Ю. Характеристики зажигания частиц угля и капель суспензионного топлива при кондуктивном нагреве / К. Ю. Вершинина, Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // **Пожаровзрывобезопасность**. – 2015. – Т. 24, № 10. – С. 21–29.

33. Глушков, Д. О. Исследование интегральных характеристик зажигания полимерного материала несколькими нагретыми до высоких температур частицами / Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // **Пожарная безопасность**. – 2013. – № 4. – С. 27–35.

34. Вершинина, К. Ю. Анализ предельных условий зажигания газообразных продуктов термической деструкции частицы угля в потоке воздуха / К. Ю. Вершинина, Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // **Безопасность труда в промышленности**. – 2014. – № 7. – С. 54–59.

35. Глушков, Д. О. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса при зажигании полимерных материалов локальными источниками энергии / Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // **Известия ЮФУ. Технические науки**. – 2013. – № 8 (145). – С. 53–57.

36. Глушков, Д. О. Численное исследование макроскопических закономерностей зажигания смесового твердого топлива локальным источником энергии / Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // **Известия высших учебных заведений. Физика**. – 2013. – Т. 56, № 9-3. – С. 153–155.

37. Высокоморная, О. В. Зажигание гелеобразного топлива разогретой до высоких температур металлической частицей малых размеров / О. В. Высокоморная, Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // **Известия высших учебных заведений. Физика.** – 2013. – Т. 56, № 9-3. – С. 150–152.

38. Глушков, Д. О. Конвективный тепломассоперенос при зажигании полимерного материала локальным источником нагрева / Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // **Бутлеровские сообщения.** – 2012. – Т. 29, № 1. – С. 99–111.

39. Глушков, Д. О. Особенности постановки задач при численном исследовании зажигания металлизированного конденсированного вещества локальным источником энергии / Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // **Бутлеровские сообщения.** – 2013. – Т. 33, № 1. – С. 126–132.

40. Глушков, Д. О. Математическое моделирование зажигания гелеобразного конденсированного вещества одиночными разогретыми металлическими и неметаллическими частицами / Д. О. Глушков, А. О. Жданова, П. А. Стрижак // **Бутлеровские сообщения.** – 2013. – Т. 34, № 5. – С. 22–33.

Свидетельства на программы для электронных вычислительных машин

41. Глушков, Д. О. Программа расчета характеристик зажигания структурно-неоднородного твердого ракетного топлива при неидеальном контакте с локальным источником нагрева / Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011619684. Дата государственной регистрации 23.12.2011 г.

42. Глушков, Д. О. Программа расчета концентраций продуктов пиролиза полимерного материала при взаимодействии с источником ограниченной энергоемкости / Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012610182. Дата государственной регистрации 10.01.2012 г.

43. Глушков, Д. О. Программа расчета характеристик зажигания смесового твердого топлива локальным источником энергии в форме диска / Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013611998. Дата государственной регистрации 11.02.2013 г.

44. Глушков, Д. О. Программа расчета характеристик зажигания металлизированного конденсированного вещества внедренной в приповерхностный слой «горячей»

частицей / Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613386. Дата государственной регистрации 03.04.2013 г.

45. Глушков, Д. О. Программа расчета интегральных характеристик зажигания геолообразного топлива энергоэффективным источником энергии / Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612418. Дата государственной регистрации 27.02.2013 г.

46. Высокоморная, О. В. Программа вычисления параметров процесса зажигания металлизированного смесового топлива «горячей» частицей при свободно-конвективном теплоотводе в окружающую среду / О. В. Высокоморная, Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613056. Дата государственной регистрации 21.03.2013 г.

47. Высокоморная, О. В. Расчет характеристик диффузионно-конвективного теплопереноса при зажигании полимерного материала локальным источником ограниченной энергоемкости / О. В. Высокоморная, Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611423. Дата государственной регистрации 28.01.2015 г.

48. Вершинина, К. Ю. Расчет характеристик газозазного воспламенения летучих и гетерогенного зажигания коксового остатка при низкотемпературном нагреве частицы угольного топлива / К. Ю. Вершинина, Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611581. Дата государственной регистрации 30.01.2015 г.

49. Высокоморная, О. В. Расчет интегральных характеристик зажигания полимерного материала несколькими нагретыми до высоких температур частицами / О. В. Высокоморная, Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611582. Дата государственной регистрации 30.01.2015 г.

50. Вершинина, К. Ю. Расчет характеристик зажигания металлизированного высокоэнергетического материала при локальном нагреве в условиях выгорания приповерхностного слоя конденсированного вещества / К. Ю. Вершинина, Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611584. Дата государственной регистрации 30.01.2015 г.

51. Глушков, Д. О. Расчет характеристик гетерогенного зажигания одиночной частицы угля / Д. О. Глушков, П. А. Стрижак, А. А. Щербинина // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611602. Дата государственной регистрации 02.02.2015 г.

52. Глушков, Д. О. Расчет характеристик зажигания смесового топлива в условиях неидеального контакта и лучистого теплообмена на границе «горячая частица-топливо» / Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611603. Дата государственной регистрации 02.02.2015 г.

53. Вершинина, К. Ю. Расчет погрешности выполнения закона сохранения энергии в области решения задачи зажигания смесового твердого топлива локальным источником нагрева / К. Ю. Вершинина, Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611604. Дата государственной регистрации 02.02.2015 г.

54. Глушков, Д. О. Расчет характеристик газофазного зажигания полимерного материала внедренным в приповерхностный слой локальным источником ограниченной энергоемкости / Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611730. Дата государственной регистрации 04.02.2015 г.

55. Вершинина, К. Ю. Расчет характеристик газофазного зажигания летучих и гетерогенного горения коксового остатка при нагреве угля потоком горячих газов / К. Ю. Вершинина, Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617830. Дата государственной регистрации 23.07.2015 г.

56. Вершинина, К. Ю. Расчет нестационарного температурного поля при прогреве одиночной частицы угля высокотемпературным потоком воздуха / К. Ю. Вершинина, Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015618100. Дата государственной регистрации 30.07.2015 г.

57. Вершинина, К. Ю. Расчет характеристик зажигания продуктов термического разложения угля при учете зависимости теплофизических параметров от температуры / К. Ю. Вершинина, Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015618101. Дата государственной регистрации 30.07.2015 г.

Подписано в печать 26.09.2016 г.
Формат А4/2. Ризография
Печ. л. 2,0. Тираж 150 экз. Заказ № 12-09/16
Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а