

ГОРЕНИЕ И ВЗРЫВ

Выпуск 3

Под общей редакцией
д.ф.-м.н. С. М. Фролова

ТОРУС  ПРЕСС
МОСКВА 2010

Редакционная комиссия

С. М. Фролов (председатель),

А. А. Борисов, М. Ф. Гоголя, А. Г. Истратов, А. А. Сулимов, В. А. Тесёлкин

ББК 24.54

Г 67

УДК 621.43:621.499:662.612.3

Г 67 Горение и взрыв. Выпуск 3 / Под общей ред. д.ф.-м.н.
С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. — 344 с.: ил.

ISBN 978-5-94588-072-6

В сборнике опубликованы более 50 рецензированных и отрецензированных научных сообщений, представленных на научной конференции отдела горения и взрыва Учреждения Российской академии наук Института химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН 10–12 февраля 2010 г. Представленные научные работы связаны с такими направлениями фундаментальных исследований, как физика горения и взрыва, прикладная математика и газовая динамика, термодинамика, термохимия, нанотехнология, химическая технология, водородная энергетика и др.

Сборник рассчитан на научных работников, инженеров и аспирантов, занимающихся вопросами горения и взрыва и смежными проблемами, а также на студентов старших курсов технических вузов соответствующих специальностей.

ББК 24.54

ISBN 978-5-94588-072-6

© ТОРУС ПРЕСС, 2010

Предисловие

В сборнике «Горение и взрыв» публикуются материалы ежегодной научной конференции отдела горения и взрыва Учреждения Российской академии наук Института химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН (ИХФ РАН). Если в 2008 и 2009 гг. на конференции отдела были представлены 24 и 40 кратких сообщений соответственно [1, 2], то в 2010 г. их было уже более 50, включая сообщения специалистов из других российских научных центров (ИПХФ РАН, ИАП РАН, ИНС РАН, ИСМАН, ИФЗ РАН), научно-производственных организаций (ГосНИИ «Кристалл», ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова», Федеральный центр двойных технологий «Союз», НИИ органических полупродуктов и красителей, ООО «Технологии ВНИИОС») и высших учебных заведений (МГПИ, МГТУ, МФТИ(ГУ), НИЯУ МИФИ, РХТУ, ТулГУ), а также из научных институтов Национальной академии наук Беларуси (ИТМО НАН Беларуси и ИФ НАН Беларуси) и Европейского Союза (CNRM-C.N.R. (Италия) и AVL List GmbH (Австрия)).

Все материалы, публикуемые в третьем выпуске сборника, прошли процедуру научного рецензирования и тщательно отредактированы редакционной комиссией. Содержание третьего выпуска в полной мере отражает круг научных интересов отдела горения и взрыва ИХФ РАН. Как и ранее, материалы конференции сгруппированы в сборнике в виде четырех частей.

Часть 1 посвящена вопросам физики горения и детонации газов и смежным проблемам.

Цыбенова С. Б. провела параметрический анализ модели одной экзотермической реакции, осуществляемой в режиме идеального перемешивания в реакторе непрерывного действия, который позволяет оценить влияние кинетических особенностей на критические условия воспламенения, существования множественности стационарных состояний и автоколебательных режимов горения. *Цыбенова С. Б. и Быков В. И.* предложили классификацию режимов распространения пламени в газах в зависимости от особенностей кинетического механизма реакций, таких как многостадийность, множественность стационарных состояний, наличие осцилляций и т.п. *Медведев С. Н. и др.* теоретически исследовали воспламенение потока водородно-воздушной смеси каталитической пластиной с использованием детального механизма гомогенно-гетерогенных хи-

мических реакций и показали, что поверхностные реакции на пластине могут вносить существенный вклад в воспламенение смеси. *Миронов В. Н. и Пенязьков О. Г.* экспериментально доказали возможность самовоспламенения импульсной водородной струи при взаимодействии с преградами. *Басевич В. Я. и др.* провели математическое моделирование самовоспламенения углеводородно-воздушных смесей в адиабатическом реакторе с начальным неоднородным распределением температуры и показали, что в реакторе могут возникать и распространяться волны горения разного типа. *Беляев А. А. и др.* на основе решения задачи о структуре плоского ламинарного пламени создали базу данных для характеристик ламинарного горения гомогенных воздушных смесей *n*-гептана в широком диапазоне начальных температуры, давления, коэффициента избытка горючего и концентрации остаточных газов. *Шмелёв В. М.* провел теоретическое и экспериментальное исследование диффузионного горения газов в отсутствие вынужденной конвекции, т. е. в режиме горения, который реализуется у отверстия в перегородке, разделяющей объемы горючего и окислителя, и определил размер и форму образующегося факела пламени, а также распределения концентраций горючего, окислителя и продуктов сгорания. *Фоккин И. Г. и др.* привели результаты экспериментов по парциальному окислению сложных смесей газообразных углеводородов, имитирующих реальные попутные газы и продемонстрировали возможность селективной конверсии в них тяжелых фракций C_3+ углеводородов с образованием метана, оксида углерода, водорода, оксигенатов и олефинов. *Шаповалова О. В. и др.* исследовали возможность улучшения основных характеристик оригинальных конверторов природных и попутных газов в синтез-газ и водород, использующих объемную проницаемую матрицу, путем придания матрице функции катализатора конверсии входящего углеводородного газа и показали, что введение катализатора заметно расширяет нижний предел устойчивого горения смеси метана с воздухом. Исследуя возможность получения синтез-газа в некаталитических режимах самовоспламенения попутного нефтяного газа в кислороде, *Борисов А. А. и др.* обнаружили область отрицательного температурного коэффициента на смеси, моделирующей попутный нефтяной газ. *Шмелёв В. М. и Николаев В. М.* исследовали экспериментально и теоретически некаталитическую конверсию пропана в

режиме однородного и разделенного заряда с воздухом в химическом реакторе сжатия и предложили способ некаталитической паровой и углекислой конверсии горючего, совмещенной с его пиролизом при начальной приведенной концентрации пропана до 25%. *Иванов В. С. и Фролов С. М.* разработали эффективный вычислительный алгоритм многомерного моделирования процесса перехода горения в детонацию (ПГД) в газах, основанный на методе явного выделения фронта пламени и методе частиц, и провели двумерные расчеты быстрого ПГД в стехиометрической пропановоздушной смеси в трубах с регулярными препятствиями и фокусирующим устройством в виде суживающе-расширяющегося сопла. *Семёнов И. В. и др.* провели трехмерное численное исследование процесса прямого инициирования газовой детонации в цилиндрической трубе с параболическим сужением и коническим расширением. *Азатын В. В.* показал, что в стационарных детонационных волнах, распространяющихся в водородно-воздушных смесях, определяющую роль играет конкуренция разветвления и обрыва реакционных цепей. *Кузнецов Н. М. и др.* предложили семипараметрические термические и calorические уравнения состояния реальных газов для H_2 , H_2O , CO , N_2 , O_2 и CO_2 , предназначенные для газодинамических задач с горением и взрывом. *Скрипник А. А. и др.* провели многомерное численное моделирование процесса размораживания ветрового стекла легкового автомобиля при холодном старте с учетом прогрева охлаждающей жидкости в радиаторе системы охлаждения двигателя.

Часть 2, главным образом, посвящена вопросам горения и детонации гетерогенных систем, а также сопутствующим проблемам химической физики таких систем.

Бараньшин Е. А. и др. измерили температуру частиц сажи, образующихся при пиролизе этилена, разбавленного аргоном, за отраженными ударными волнами. *Басевич В. Я. и др.* впервые выполнили расчеты самовоспламенения и горения капель *n*-гептана с применением детального кинетического механизма, описывающего многостадийное низкотемпературное окисление с холодными и голубыми пламенами и высокотемпературное горение *n*-гептана в газовой фазе. *Авдеев К. А. и др.* предложили модель окисления одиночной частицы алюминия в перегретом водяном паре и уточнили значения эффективных кинетических констант в параболическом законе роста оксидной пленки на частице. *Борисов А. А. и др.* экс-

периментально исследовали самовоспламенение нового типа суспензионных горючих с добавками частиц энергоемких механоактивированных нанокompозитов и показали, что, начиная с некоторых пороговых значений температуры, частицы нанокompозитов могут резко сокращать задержки самовоспламенения смесей суспензионных горючих с воздухом. *Фролов Ф. С. и Фролов С. М.* провели анализ возможных механизмов самовоспламенения капель *n*-тетрадекана и *n*-гептана с добавками ультрадисперсных частиц механоактивированного нанокompозита Mg–MoO₃ и показали, что в условиях такта сжатия дизеля возможны «микровзрывы» капель, приводящие к гомогенизации заряда топливно-воздушной смеси и повышению эффективности сжигания топлива. *Ермолаев Б. С. и др.* разработали математическую модель зажигания и горения сферического зерна модельного пороха — бутантриол тринитрата — с многостадийным глобальным кинетическим механизмом *k*-фазных и газофазных химических реакций, которая воспроизводит нестационарные эффекты, наблюдаемые при горении пороха в ракетных двигателях на твердом топливе (РДТТ) и ствольных установках. *Кузнецов Г. П. и др.* экспериментально исследовали конденсированные продукты горения свободных одиночных частиц циркония в среде смеси кислорода и азота в интервале давлений от 1 до 20 атм и показали, что отличительной особенностью морфологии продуктов является образование полых сфер. *Зенин А. А. и др.* представили результаты экспериментальных исследований зажигания двухосновного полупрозрачного пороха инфракрасным излучением CO₂-лазера и оценки макрокинетических характеристик процесса зажигания. *Истратов А. Г.* представил модель расчета диаграммы давления в полузамкнутой камере сгорания с учетом выноса дисперсных элементов топлива и показал возможность сильного снижения максимального давления и недогорания заряда. *Байков А. В. и др.* провели экспериментальные исследования частичного окисления авиационного керосина ТС-1 в канальном реакторе с различными наполнителями в виде твердых частиц химически инертных материалов и показали, что в реакторе с наполнителем процесс частичного окисления протекает менее глубоко, чем в полном реакторе без наполнителя, причем количество полезных продуктов реакции, способных к дальнейшему горению, и степень газификации исходного углеводородного топлива возрастают. *Ас-*

совский И. Г. и др. разработали метод фотосенсибилизации высокодисперсных керамических материалов для получения фотодинамического эффекта, который позволяет применять эти материалы для решения задач обезвреживания экологических загрязнений, а также фотодинамической терапии и дезинфекции в медицине. *Борисов А. А. и др.* предложили новые подходы к оценке тротилового эквивалента (ТЭ) взрывов неидеальных взрывчатых веществ (ВВ) по измерениям времени прохождения ударной волны между датчиками или прибытия волны на отметчик, а также по разрушениям конкретных объектов. Предложенные подходы повышают точность определения ТЭ и существенно упрощают процедуру расчета и требования к измерительной аппаратуре. *Шамшин И. О.* представил результаты расчетов взрывов смесевых зарядов, состоящих из инициирующего взрывчатого вещества (тротила), горючего (алюминия), окислителя (нитрата аммония) и газ-провайдера (гептана), и изучил влияние скорости перемешивания продуктов на параметры воздушных ударных волн.

Часть 3 посвящена вопросам горения и детонации конденсированных систем.

Маршаков В. Н. и др. провели экспериментальные и расчетные исследования горения порохового заряда при сбросе давления в модельном РДТТ и определили параметры, определяющие стационарный уровень давления в двигателе. *Чуйко С. В. и Соколовский Ф. С.* провели исследование горения твердых ракетных топлив, содержащих добавки быстрогорящих веществ, и показали, что аномальное (взрывное) горение таких зарядов обусловлено диспергированием топлива-матрицы в газовую фазу. *Ермолаев Б. С. и др.* представили данные об экспериментальных доказательствах преимущества заряда конвективного горения в сравнении с аналогичным насыщенным зарядом и расчетные модели для процессов горения такого заряда и выстрела. *Храповский В. Е. и др.* представили результаты экспериментов по возникновению и развитию конвективного горения и низкоскоростной детонации в перхлорате аммония и его смесях с алюминием насыпной плотности и показали, что существует минимальная длина образца, при которых возникает конвективное горение или осуществляется его переход в низкоскоростную детонацию. *Семёнов И. В. и др.* разработали программный комплекс для решения задач внутренней баллистики в квазиодномер-

ном приближении на многопроцессорных ЭВМ и с помощью теста AGARD сравнили его характеристики с характеристиками зарубежных пакетов прикладных программ. *Муравьев Н. В. и др.* представили экспериментальные данные по структуре, термическому поведению и параметрам горения монотоплив из октогена, а также бинарных энергоемких конденсированных систем (ЭКС) октоген-алюминий и показали, что замена микроалюминия на ультрадисперсный в бинарных ЭКС с октогеном приводит к значительному увеличению скорости горения и полноты реагирования металла, а применение ультрадисперсного октогена позволяет дополнительно повысить полноту сгорания и уменьшить дисперсность агломератов. *Мееров Д. Б. и др.* экспериментально исследовали влияние механоактивированных компонентов на параметры горения ЭКС на основе MoO_3/Al (ПАП-1) и $\text{MoO}_3/\text{Al}/\text{KClO}_4/(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ и показали, что использование механоактивированных компонентов может приводить к увеличению скорости и полноты их горения. *Моногаров К. А. и др.* провели сравнительное исследование термитных композиций из микродисперсных, ультра- и наноразмерных порошков и показали, что использование ультра- и наноразмерных компонентов может повысить эффективность работы пиронагревателей. *Долгобородов А. Ю. и др.* исследовали возможности и перспективы использования наноразмерного кремния в качестве компонентов ВВ и ЭКС для повышения характеристик детонации и горения и экспериментально показали, что нанокремний может реагировать во фронте горения с энерговыделением. *Матюшин Ю. Н. и др.* методом калориметрии сжигания в атмосфере кислорода измерили энергии сгорания и рассчитали стандартные энтальпии образования для орто-, мета- и пара-изомеров (3-аминофуразан-4-ил)пиридина, а также рассчитали стандартные энтальпии образования изомеров и оценили энергии изомеризации в исследованных соединениях и влияние положения заместителей на энтальпии образования изомеров. *Конькова Т. С. и др.* впервые измерили энергии сгорания и энтальпии парообразования трех производных метилазидо-N-нитрооксазолидинов, используя прецизионный калориметр и микрокалориметр Кальве, и получили энтальпии образования исследуемых соединений в стандартном состоянии в газовой фазе. *Мирошниченко Е. А. и др.* продолжили развитие предложенного авторами метода расчета энергий диссоциации связей $\text{C}-\text{NO}_2$ в молекулах и радика-

лах на основе экспериментальных термохимических величин в приложении к нитропроизводным C_4-C_7 и впервые получили термохимические свойства для 1.1.1-тринитробутана, что позволило расширить банк данных по нитробутильным радикалам. *Орджоникидзе О. С. и др.* определили условия разложения октогена и CL-20 методом синхронного термического анализа и предложили числовые значения кинетических параметров для построения моделей горения ЭКС. *Осавчук А. Н. и др.* провели сравнительное экспериментальное изучение и численное термодинамическое моделирование пяти предварительно отобранных модельных взрывчатых составов, отличающихся различным содержанием алюминия и октогена. *Афанасьев Г. Т.* проанализировал наблюдаемые противоречия между реальной структурой детонации и ее классическими одномерными моделями. *Андреев С. Г. и др.* провели анализ решения системы уравнений, описывающих условия стационарности течения в зоне реакции неидеальной детонационной волны в открытом цилиндрическом заряде ВВ, и показали, что необходимое условие распространения детонации в таком заряде — превышение более чем на порядок характерного времени рассеяния реагирующего вещества над характерным временем реакции в детонационной волне. *Воскобойников И. М.* рассмотрел особенности метания пластины с боковой поверхности заряда, состоящего из слоев двух ВВ с заметно отличающимися скоростями детонации и привел новые данные, показывающие перспективность использования слоистых зарядов для увеличения эффективности осколочного метания. *Бармин А. В. и др.* экспериментально исследовали дробящее действие состава ВВ, содержащего гексоген, алюминий и пластизольную связку, получили спектры распределения осколков по массе и размеру и показали, что рассматриваемый состав в сочетании с нормализованной сталью С-60 обеспечивает приемлемый уровень дробления. *Имховик Н. А. и Селиванов В. В.* экспериментально исследовали поведение фторопласта и металлизированных смесей на его основе при интенсивных динамических воздействиях и разработали феноменологическую модель процесса пробития преград из алюминиевых сплавов ударниками из материалов и композиций на основе фторполимеров. *Пепкин В. И.* предложил нетрадиционный энергетический подход к оценке чувствительности конденсированных ВВ, согласно которому параметры, определяющие механическую чувствительность твер-

дых ВВ, определяются энергией молекулы, отнесенной к единице объема или единице массы. *Тесёлкин В. А. и др.* экспериментально исследовали процессы деформации и воспламенения насыпных и прессованных слоев магния и механоактивированных энергетических композитов Mg/MoO₃ при ударе и трении, установили зависимость предела прочности от дозы активации магния и дали интерпретацию полученным результатам. *Дубовик А. В.* предложил приближенное решение задачи о сжатии слоя пластичного вещества между жесткими шероховатыми плитами, расположенными под малым углом наклона, которая важна для анализа чувствительности ВВ к механическим воздействиям.

Часть 4 включает некоторые материалы пленарной дискуссии на тему «Современное состояние диагностики процессов горения и взрыва». Цель дискуссии заключалась в обсуждении проблем экспериментального определения тех или иных параметров быстропротекающих физико-химических процессов, в обмене информацией о существующих новейших измерительных методиках и приборах, а также в обсуждении ярких примеров получения новой экспериментальной информации с помощью оригинальных приемов и методов.

Я признателен всем сотрудникам Отдела горения и взрыва ИХФ РАН и коллегам из других организаций за активное участие в научной конференции и ответственное отношение к подготовке материалов, публикуемых в сборнике. Неоценимое значение для качества сборника имели отзывы рецензентов и работа моих коллег по редакционной комиссии: А. А. Борисова, М. Ф. Гоголи, А. Г. Истратова, А. А. Сулимова и В. А. Тесёлкина. С особой благодарностью отмечаю поддержку и полезные советы со стороны академика А. А. Берлина и дирекции ИХФ РАН. Как и в прошлые годы, всю работу по подготовке и изданию сборника выполнил в срок и с высоким качеством замечательный коллектив издательства ТОРУС ПРЕСС, и я с удовольствием отмечаю их высокий профессионализм.

Литература

1. Горение и взрыв. Вып. 1 / Под общ. ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2008. 112 с.
2. Горение и взрыв. Вып. 2 / Под общ. ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2009. 192 с.

Москва

С. М. Фролов