

## Предисловие

В сборнике «Горение и взрыв» публикуются материалы ежегодной научной конференции отдела горения и взрыва Института химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук (ИХФ РАН). В связи с тем, что в 2014 г. исполняется 100 лет со дня рождения академика Якова Борисовича Зельдовича (1914–1987) и 110 лет со дня рождения академика Юлия Борисовича Харитона (1904–1996), конференция 2014 г. посвящена памяти этих двух выдающихся ученых XX в. — основателей отечественной научной школы по горению и детонации. Эти юбилейные даты очень знаменательны для ИХФ РАН: оба ученых начинали свою научную биографию в Институте химической физики АН СССР и оказали огромное влияние не только на формирование и развитие тематики научных исследований в Институте, но и на его славную историю и на человеческие судьбы целых поколений исследователей.

Как и ранее [1–6], в конференции приняли участие сотрудники ИХФ РАН и специалисты из других российских научных центров (ИАП РАН, ИДГ РАН, ИНС РАН, ИОХ РАН, ИПМ РАН, ИПМех РАН, ИПХФ РАН, ИСМАН, ИЭПХФ РАН, ОИВТ РАН, НИИ механики МГУ), научно-производственных организаций (НПО «Сатурн», ОАО «ГосНИИ «Кристалл», ОАО «Государственный научно-исследовательский институт машиностроения», ОАО ТМКБ «Союз», ОАО «НПО Энергомаш им. акад. В. П. Глушко», ОАО «ЦНКБ», ОКБ им. А. Люльки, РФЯЦ–ВНИИЭФ, СКТБ «Технолог», ФГУП ЦАГИ, ФГУП ЦИАМ, ФЦДТ «Союз», ФГУП ФНПЦ «Алтай», ФГУП «НИИПМ») и высших учебных заведений (МАИ, МГПИ, МГТУ, МГУ, МГУИЭ, МИТХТ, МФТИ, НИЯУ МИФИ, РХТУ, Белгородский государственный исследовательский университет), а также из научных институтов Национальной академии наук Беларуси (ИТМО НАН Беларуси) и Украины (Институт газа НАН Украины, Институт фундаментальных проблем высоких технологий НАН Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины).

Все материалы, публикуемые в седьмом выпуске сборника, прошли через процедуру анонимного научного рецензирования и отредактированы редакционной комиссией. В тех случаях, когда авторы реагировали на замечания рецензентов лишь в переписке и не внесли соответствующие пояснения в текст своего публикуемого сообщения, редакционная комиссия считала целесообразным представить на суд читателя научную аргументацию сторон. Содержание выпуска вполне отражает круг научных интересов отдела горения и взрыва ИХФ РАН.

Материалы конференции традиционно сгруппированы в сборнике в виде частей, посвященных вопросам горения и детонации газов (Часть 1), гетерогенных (Часть 2) и конденсированных (Часть 3) систем, а также пленарной

дискуссии на тему «Термолиз при высоких температурах и давлениях: требуемые и достигнутые уровни изучения» (Часть 4). В дополнение к научным сообщениям в седьмом сборнике продолжается рубрика «Научная публицистика» (Часть 5).

**Часть 1** посвящена вопросам горения и детонации газов.

*Рубцов Н. М. и др.* провели экспериментальные исследования самовоспламенения смесей водорода с воздухом в нагретом реакторе при общем давлении 1–2 атм с использованием скоростной цветной киносъемки, а также влияния добавок ингибитора (пропилена) и материала поверхности реактора на третий предел самовоспламенения водородно-воздушных смесей.

*Азатья В. В. и Сайкова Г. Р.* провели экспериментальные исследования влияния малых добавок  $i$ -C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>, CO<sub>2</sub>, CF<sub>3</sub>H и CF<sub>4</sub> на горение метановоздушных смесей при атмосферном давлении с целью эффективного подавления процесса. Показано, что механизм ингибирования горения метана носит цепной характер: незначительные добавки ингибитора приводят к обрыву цепей и к подавлению горения.

*Басевич В. Я. и др.* теоретически исследовали влияние малых добавок тяжелых углеводородов на самовоспламенение и горение однородных смесей водорода и метана в воздухе при высоких температурах (~ 2000 К) и показали, что такие добавки сокращают задержку самовоспламенения. Это происходит вследствие более легкого термического распада добавляемого углеводорода, в результате чего появляются атомарный водород и другие радикалы, инициирующие цепной процесс самовоспламенения.

*Лещевич В. В. и др.* представили результаты экспериментов по визуализации самовоспламенения стехиометрических водородно-воздушных и метановоздушных смесей в машине быстрого сжатия при температурах около 1000 К и давлениях 0,8–1,8 МПа, из которых следует, что наличие в рабочем объеме экспериментальной установки твердых примесей в виде микрочастиц может стать причиной преждевременного самовоспламенения газовых смесей.

*Кулешов П. С. и др.* провели численное исследование влияния добавок водорода на задержку самовоспламенения пропановоздушной смеси при низких и высоких температурах, а также на скорость ламинарного пламени и на эмиссию NO<sub>x</sub>, CO и C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>.

*Николаев В. М. и Шмелев В. М.* провели экспериментальное исследование воспламенения пропановоздушных смесей при сжатии при наличии локальной неоднородности с повышенной температурой в рабочем объеме экспериментальной установки. Показано, что такие неоднородности расширяют пределы воспламенения как бедных, так и богатых пропановоздушных смесей.

*Билера И. В.* провел экспериментальные исследования высокотемпературных (700–1250 °С) термических превращений  $n$ -бутана в условиях адиабатического сжатия в обогреваемой свободно-поршневой установке и

показал, что основные продукты пиролиза *n*-бутана — это этилен, метан, водород и пропилен, а с увеличением температуры к ним добавляются ацетилен и бензол. Впервые в продуктах пиролиза *n*-бутана обнаружены аллен, метилацетилен, винилацетилен, бутины-1 и -2, диацетилен, циклопентан, циклопентадиен, изопрен, а также некоторые другие соединения.

В другой работе *Басевича В. Я. и др.* разработан детальный кинетический механизм окисления и горения изобутана, который удовлетворительно описывает высокотемпературное и низкотемпературное (многостадийное) самовоспламенение, а также скорость распространения ламинарного пламени в смесях изобутана с воздухом разного состава. Механизм содержит 69 химических компонентов и 409 обратимых реакций.

*Магомедов Р. Н. и др.* представили результаты исследования кинетики и закономерностей окислительного крекинга углеводородов  $C_2-C_5$  с целью изучения возможности получения продуктов с необходимым соотношением  $C_2H_4$  и CO. Показано, что таким методом можно получать парогазовые смеси, содержащие этилен и оксид углерода с примесями других продуктов окисления, причем соотношение получаемых компонентов может варьироваться в широких пределах в зависимости от состава исходного сырья и условий проведения процесса.

Для расширения пределов устойчивой конверсии богатых смесей углеводородных газов с окислителем в синтез-газ *Шаповалова О. В. и др.* предложили использовать горелочные устройства на основе объемных некаталитических и каталитических проницаемых матриц. К достоинствам таких конверторов относятся отсутствие дополнительных источников тепла; возможность использования углеводородов любого состава, в том числе жидких; широкий диапазон допустимой производительности; компактность и простота конструкции; отсутствие катализатора и проблем с сажеобразованием в матрице; отсутствие особых требований к термостойкости материалов матрицы; возможность использования и воздуха, и кислорода; а также возможность работы при нормальном и повышенном давлениях.

*Быков В. И. и Цыбенова С. Б.* предложили термодинамический критерий для проверки адекватности моделей газофазного горения, основанный на понятии термодинамической доли той или иной стадии сложного кинетического механизма реакций: стадия значима, если ее термодинамическая доля больше некоторого заранее заданного уровня, т. е. если ее вклад в скорость изменения функции свободной энергии значителен.

*Быков В. И. и Старостин И. Е.* предложили моделировать процессы горения и взрыва в закрытых системах потенциально-потокным методом, не требующим знания детального механизма химических превращений, и представили систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику закрытой химически реагирующей системы с идеальным перемешиванием.

*Медведев С. Н. и др.* разработали алгоритмы метода динамической табуляции (МДТ) и метода динамического сокращения (МДС) детальных кинетических механизмов.

тических механизмов, которые позволяют существенно сократить затраты машинного времени на многомерные газодинамические расчеты. С помощью МДТ удалось сократить суммарное время кинетических расчетов в 12 раз при решении задачи о рабочем процессе в поршневом двигателе с гомогенным зарядом и с зажиганием от сжатия, а с помощью МДС — почти в 20 раз при решении задачи о протекании химических превращений в гомогенном реакторе.

*Азатян В. В. и др.*, используя статический реактор, провели экспериментальные исследования возникновения и развития разветвленно-цепной реакции горения водорода с кислородом внутри полуострова воспламенения при субатмосферном и атмосферном давлении. Показано чрезвычайно быстрое возрастание максимального давления взрыва по мере удаления от границы самовоспламенения.

В другой работе *Азатян В. В. и др.* провели экспериментальное исследование ингибирования детонации водородно-воздушных смесей добавками пропана и показали, что добавка 2%–3% пропана к смеси, содержащей 33% водорода при нормальных условиях, может приводить к разрушению детонационной волны в трубе диаметром 101 мм и длиной 15 м.

*Гольцев В. Ф. и др.* проанализировали факторы, определяющие эмиссию оксидов азота в турбореактивных двигателях при высоких значениях степени сжатия и температуры на входе в камеру сгорания, и предложили возможные способы ограничения эмиссии. Используя различные методики, включая кинетические, авторы рассчитали значения эмиссионных показателей NOx в продуктах сгорания модельного топлива — пропана — для стехиометрических и бедных (коэффициент избытка воздуха 2) смесей и показали, что рост эмиссии NOx при увеличении степени сжатия обусловлен кинетикой образования NO и NO<sub>2</sub> при горении.

*Агафонов Г. Л. и др.* провели экспериментальные и расчетные кинетические исследования образования частиц сажи при пиролизе и окислении различных смесей ацетилена с аргоном за отраженными ударными волнами и продемонстрировали предсказательные возможности модифицированной кинетической схемы термического разложения и окисления ацетилена и ди-ацетилена с образованием зародышей частиц сажи разных типов.

*Борисов А. А. и др.* провели теоретические и экспериментальные исследования влияния добавок водорода на сажеобразование при окислительной конверсии метана в бомбе постоянного объема и показали, что добавки водорода уменьшают выход сажи и делают ее более мелкодисперсной.

*Сметанюк В. А. и др.* измерили уровень шума в помещении и в окрестности выходного вентиляционного отверстия при огневых испытаниях импульсно-детонационной скоростной горелки (ГИДС), работающей на смеси природного газа с воздухом с частотой от 1 до 4 Гц. Максимальная интенсивность шума в помещении составила 150 дБ и не зависела от рабочей частоты ГИДС. В точке, расположенной в окрестности выходного вентиляционного

отверстия, интенсивность шума не превышала 105 дБ, что ниже предельного уровня производственного шума, допускаемого существующими стандартами.

*Зангиев А. Э. и др.* провели сравнительные двумерные осесимметричные и трехмерные расчеты рабочего процесса и тяговых характеристик импульсно-детонационных двигателей (ИДД) в условиях сверхзвукового полета летательного аппарата с числом Маха 3 на высоте 16 км и подтвердили сделанный ранее вывод о превосходстве ИДД по удельной тяге над идеальным прямоточным воздушно-реактивным двигателем (ПВРД) на обычном горении, причем количественно это превосходство составляет 20%–30% по отношению к значению  $\sim 0,85$  кН/кг/с для идеального ПВРД.

*Аксенов В. С. и др.* спроектировали, изготовили и испытали непрерывно-детонационную кольцевую камеру сгорания внешним диаметром 400 мм с кольцевым зазором 30 мм с использованием водорода в качестве горючего и воздуха в качестве окислителя. В проведенных огневых испытаниях зарегистрированы режимы устойчивого непрерывно-детонационного горения топливной смеси с 1, 2, 3 и 5 детонационными волнами, определены частота вращения детонации, скорость и направление распространения детонации, высота фронта и прослежена динамика переходных процессов. Измеренный удельный импульс по водороду составил 3200 с.

*Алексеев Д. П. и др.* провели расчетно-теоретические и экспериментальные исследования условий запуска сопла Лавала в сверхзвуковом потоке водородно-воздушной смеси и реализации ее детонационного горения и показали, что детонацию такой смеси можно стабилизировать в сопле Лавала с центральным телом.

*Фролов С. М. и др.* провели численное моделирование газодинамического и механического взаимодействия рабочего процесса в кольцевой непрерывно-детонационной камере сгорания с неподвижной турбинной решеткой и определили условия существования рабочего процесса и величину силы, действующей на турбинную решетку в нестационарном потоке продуктов детонации. Показано, что размещение неподвижной турбинной решетки на выходе из камеры сгорания может приводить к изменению рабочего режима или к его исчезновению, к изменению амплитуды пульсаций потока и др. Влияние турбинной решетки на рабочий режим зависит от угла наклона лопаток по отношению к оси камеры и от направления вращения детонации.

*Ширяева А. А.* предложила подход для учета влияния турбулентных пульсаций на среднюю скорость химических превращений при численном моделировании турбулентных течений с горением и применила его для различных режимов горения в двигателях летательных аппаратов.

*Морозов Д. О. и Сметанников А. С.* провели численное моделирование взрыва заряда тротила массой 6,8 кг на высоте 1 м над поверхностью земли в двумерной осесимметричной постановке и показали, что при определенных

условиях (заряд приподнят на высоту порядка его размера) на стадии, когда ударная волна остается еще достаточно сильной, для описания приповерхностного взрыва можно применять модель сферического взрыва.

*Комиссаров П. В. и др.* предложили и проверили экспериментально метод ослабления воздушной ударной волны от взрыва заряда конденсированного взрывчатого вещества (ВВ) на начальной стадии ее формирования за счет взаимодействия части газообразных продуктов детонации ВВ с дисперсными порошками интерметаллидов, в частности с порошком сплава алюминия и циркония. Показано, что таким методом можно существенно (на десятки процентов) снизить давление во фронте воздушной ударной волны.

В другой работе *Комиссаров П. В. и др.* предложили метод уменьшения поражающего действия взрыва заряда конденсированного ВВ за счет поглощения энергии воздушной ударной волны пеноблоком и уменьшения опасности от разлета осколков пеноблока путем создания неоднородной слоистой защитной оболочки. Экспериментально показано, что таким методом можно уменьшить эффективную энергию взрыва в 10 раз, если об энергии взрыва судить по характеристикам воздушной ударной волны.

*Аникеев А. А. и др.* провели расчеты ударных адиабат  $N_2$  и  $CO_2$ , используя несколько современных методов (вариационный, Монте-Карло и др.), и сделали заключения о границах применимости этих методов.

*Богданова Ю. А. и др.* провели расчеты термодинамических свойств (свободной энергии) трех плотных бинарных смесей ( $N_2-N$ ,  $O_2-O$  и  $NH_3-H_2$ ), используя модель эффективного однокомпонентного флюида и двухкомпонентную модель, и определили границы применимости модели эффективного однокомпонентного флюида.

**Часть 2** посвящена вопросам горения и детонации гетерогенных систем.

*Быков В. И. и Цыбенова С. Б.* предложили простую модель горения гетерогенных систем, выделили особенности физико-химических процессов в камере типа «труба в трубе» и показали, что в системе «топливо–окислитель» существует нелинейная обратная связь, которая определяет основные характеристики горения: условия зажигания, скорость и направление распространения фронта горения.

*Уткин П. С.* предложил алгоритм численного моделирования перехода горения в детонацию в гетерогенной системе, состоящей из двух сжимаемых сред, методом Годунова и проверил его на задачах Римана.

*Каспаров К. Н. и др.* представили новые результаты экспериментального исследования гетерогенного горения микропорошка железа и динамики формирования расплава и оксида железа в графитовом тигле при разных давлениях кислорода. Показано, что с ростом давления кислорода гетерогенное горение существенно интенсифицируется.

*Шмелев В. М. и Кинжис М.* провели эксперименты по воздействию электрического поля на поверхностное горение перемешанных газовых смесей

бедного и богатого составов и показали, что с помощью электрического поля можно управлять характеристиками поверхностного горения — скоростью и полнотой сгорания, а также устойчивостью процесса.

*Шмелев В. М.* представил экспериментальные данные по характеристикам поверхностного горения смеси природного газа с воздухом на матрице из пеноматериала с керамическим покрытием из оксида алюминия. Показано, что на матрице с покрытием реализуется режим горения с пламенем, погруженным в матрицу, который характеризуется пониженной эмиссией оксидов азота и СО.

*Костин С. В. и др.* предложили нестационарную физико-математическую модель и экспериментальный метод для изучения пространственно-неоднородных фильтрационных режимов горения в слабо градиентных полях давления. Показано, что в условиях неустойчивости квазиизобарического фронта горения и недостатка массы активного газа в пористой среде на фронте горения формируются ячеистые структуры.

*Ассовский И. Г. и др.* провели экспериментальные исследования механизма и закономерностей газофазного синтеза ультрапористых наноструктурных керамических материалов (аэрогелей и ксерогелей) при горении частиц металлов (алюминий, магний, цинк, титан, цирконий) и определили зависимости состава и морфологии получаемых продуктов от условий горения: природы и дисперсности металла, температуры, давления и состава газовой среды (воздух, кислород с инертными газами, двуокись углерода).

*Алдушин А. П. и Ивлева Т. П.* провели численное исследование неустойчивости фронта фильтрационного горения в плоском двумерном канале с пористым топливом, продуваемым газом (окислитель плюс инертная составляющая). Показано, что плоский фронт фильтрационного горения становится неустойчивым, если коэффициент фильтрации газа в продуктах реакции больше, чем в исходной шихте.

*Халтуринский Н. А. и Кудрявцев Ю. А.* представили результаты натурных испытаний огнезащитного действия краски КННА (огнезащитного вспучивающегося покрытия), нанесенной на двутавровую балку № 20 в условиях пожара по стандартной методике. Проведено сравнение полученных результатов с большим массивом данных по аналогичным испытаниям выпускаемых в настоящее время огнезащитных красок и показано, что краска КННА превосходит по своему огнезащитному действию самые лучшие образцы, присутствующие на рынке.

*Губин С. А. и др.* провели сравнительный анализ современных представлений о фазовой диаграмме углерода и показали, что положение линий на фазовой диаграмме углерода для нано- и крупнокристаллических частиц существенно различается. Расчетным путем продемонстрировано влияние структуры, размера и формы наночастиц углерода («нити», «лепестки», «нанотрубки») на положение линий фазовых переходов нанографит–наноалмаз.

*Ассад М. С. и др.* провели экспериментальные исследования установления рабочего процесса в импульсно-детонационной камере сгорания диаметром 20 мм и длиной 620 мм, работающей на термически активированных смесях гептана с кислородом, разбавленных воздухом. Показано, что в таких смесях детонация формируется на расстояниях 250–600 мм от источника зажигания в зависимости от коэффициента избытка горючего, наличия ускорителя пламени, степени термической активации смеси и наполнения трубы горючей смесью.

*Авдеев К. А. и др.* провели экспериментальное исследование магнитогидродинамических (МГД) эффектов от импульсной гетерогенной детонации капельной смеси жидкого углеводородного горючего с газообразным кислородом и показали, что на всех электродах МГД-генератора наблюдается устойчивая генерация напряжения с частотой, задаваемой импульсно-детонационной камерой сгорания.

*Василик Н. Я. и др.* предложили новый способ формирования потока продуктов детонации для нанесения порошковых покрытий, который позволил разогнать частицы порошка напыляемого материала до скоростей более 1000 м/с и получить покрытия, обладающие новыми свойствами.

*Яновский Л. С. и др.* сопоставили эффективность работы авиационной энергетической установки, использующей твердооксидные (ТОТЭ) и твердополимерные топливные элементы, с учетом необходимости работы на жидком авиационном топливе и показали, что применение ТОТЭ в авиации более перспективно.

**Часть 3** посвящена вопросам горения и детонации конденсированных систем.

*Штейнберг А. С.* представил обзор новых научных результатов, относящихся к общей теории теплового взрыва конденсированных энергетических материалов (ЭМ) и к количественному сопоставлению экспериментальных данных с выводами классических теорий взрыва и горения некоторых ЭМ.

*Иноземцев Я. О. и др.* представили свою новую разработку — эталонный калориметр для термохимических исследований ЭМ, который по совокупности метрологических, технических и эксплуатационных характеристик превосходит все имеющиеся отечественные и зарубежные лабораторные приборы. Калориметр позволяет на незначительных количествах образцов (до 0,5 г) выполнить серию из 5 опытов и получить прецизионные термохимические характеристики разнообразных классов соединений.

*Мирошниченко Е. А. и др.* предложили новую эмпирическую схему для оценки энергий связи в ЭМ по доступным термохимическим данным, которую использовали для расчета энергий диссоциации  $D(C-NO_2)$  в нитрометилфуразане и нитробифениле и энтальпий образования соответствующих радикалов.



*Матюшин Ю. Н. и Конькова Т. С.* разработали метод расчета энтальпий образования и растворения соединений с молекулярными и гетероциклическими ионами, основанный на аддитивности вкладов ионных составляющих в энергии кристаллической решетки, энтальпии образования и растворения соединений солевой структуры.

*Захаров В. В. и др.* провели экспериментальное исследование кинетики обратимого полиморфного фазового перехода в кристаллической фазе низкочувствительного ЭМ FOX-7 и с помощью калориметрических методов и оптической инфракрасной спектроскопии получили кинетические кривые и определили аррениусовские параметры константы скорости для прямой реакции.

*Крупкин В. Г. и Мохин Г. Н.* провели теоретическое исследование влияния неоднородности в виде выступа на поверхности горючего конденсированного ЭМ на его воспламенение и показали, что при размерах выступа, достаточных для образования очага, он воспламеняется в режиме теплового взрыва, а время воспламенения резко уменьшается по сравнению с гладкой поверхностью. Отмечено, что данный механизм может приводить к пульсациям при горении порохов вследствие повторяющегося воспламенения и потухания очагов.

*Маршаков В. Н.* проанализировал экспериментальные данные по горению и погасанию образцов двухосновных порохов критического диаметра с позиций очагового механизма горения и показал, что определяющими факторами погасания являются ограниченное количество очагов (на критическом диаметре размещается меньше трех очагов) и их взаимодействие через газовую фазу.

*Финяков С. В. и Зенин А. А.* получили формулы для расчета мгновенных и средних по времени скоростей горения конденсированных ЭМ при гармонически пульсирующем давлении и оценили эти скорости в линейном и нелинейном (квадратичном) приближениях для двух современных баллистических порохов и прессованного октогена. Показано, что средняя скорость горения при пульсирующем давлении совпадает со стабильной скоростью горения через очень короткое время после начала горения.

*Рашковский С. А. и Долгобородов А. Ю.* провели расчеты распространения волны тепловой перколяции (горения) в порошках низкой плотности, моделирующих порошки механоактивированных смесей металлического горючего и твердого окислителя, используя математическую модель, в которой постулируется время нагрева частиц до температуры воспламенения и время сгорания частиц при данной температуре. Показано, что в зависимости от значения температуры воспламенения горение порошковой смеси происходит по-разному: при малых значениях температуры воспламенения фронт волны горения остается практически плоским, тогда как при больших значениях горение смеси неравномерно в пространстве и во времени.

*Муравьев Н. В. и др.* провели экспериментальные исследования влияния нано- и микроразмерных добавок различных оксидов металлов на термолиз октогена и показали, что наиболее эффективной добавкой является нано-TiO<sub>2</sub>. Предложен механизм каталитического воздействия TiO<sub>2</sub> на разложение октогена, объясняющий уникальность каталитического действия TiO<sub>2</sub>.

*Брауэр Г. Б.* на основании экспериментов по изучению горения смесей порошков в противотоке инертного газа предложил оригинальную трактовку механизма капиллярных явлений в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, сопровождающихся плавлением металлической компоненты в волне горения, предположив, что в волне горения расплав находится не в виде сплошной пленки, а в виде капель.

*Шкадинский К. Г. и др.* провели математическое моделирование самоподдерживающегося фронтального процесса экзотермического химического превращения в пористом алюмотермическом составе Ti-Al-CaO<sub>2</sub> в условиях искусственной гравитации, создаваемой центрифугой, и получили пространственно-временные распределения полей температур отдельных групп реагентов, полей скоростей их конвективного движения, полей их концентраций, давления (напряжения), скоростей экзотермического химического взаимодействия отдельных реагентов (скоростей тепловыделения), что позволяет установить причинно-следственные связи всех сопутствующих процессов.

*Моногаров К. А. и др.* провели экспериментальные исследования, направленные на изучение возможности использования термитных составов Al/CoO, Al/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для разрушения титановых топливных баков спутников, отработавших на околоземной орбите, при входе в плотные слои атмосферы путем инициирования плавления титанового сплава. Показано, что разрушение (плавление) титановой пластины достигается только при использовании состава Al/CoO.

*Пивкина А. Н. и др.* провели экспериментальные исследования возможности реализации синергетического эффекта, заключающегося в снижении температуры начала разложения октогена в присутствии перхлората аммония (ПХА), при совместном разложении ПХА и октогена в составах с активным горючим-связующим путем нанесения покрытия из ПХА на частицы октогена. Показано, что при определенных условиях покрытие частиц октогена ПХА в таких составах, действительно, приводит к реализации синергетического эффекта, причем скорость горения таких составов можно изменять в достаточно широких пределах.

*Пятаков Н. Ф. и др.* представили подробные данные о физико-химических и взрывчатых характеристиках, закономерностях горения и зависимости скорости горения от давления для алкиловых эфиров и циклических простых эфиров диметилполонитраминов.

*Тве Е Зо и Денсюк А. П.* с помощью специальной методики измерили температуры кипения типичных жидких пластификаторов — нитроглицерина, нитрогликоля и динитрата диэтиленгликоля — и обнаружили, что

температура кипения пластификаторов оказалась ниже температуры поверхности порохов, изготовленных на их основе. Используя эти данные, авторы выдвинули гипотезу, что горение изученных нитроэфиров — многостадийный процесс, который в исследованном диапазоне давления протекает по газофазному механизму.

*Синдицкий В. П. и др.* провели экспериментальные исследования термической стабильности и горения 4,4''-динитро-трис-фуразана (НТФ) — ВВ плотностью 1,867 г/см<sup>3</sup> с расчетной скоростью детонации 8620 м/с, используя дифференциальный сканирующий калориметр, манометр Бурдона и бомбу постоянного давления, и рассчитали глубину его распада в конденсированной фазе при температурах испарения в интервале давлений от 0,1 до 10 МПа и временах пребывания, задаваемых скоростью горения. На основании расчета, показавшего, что в этих условиях доля распада НТФ не превышает 1%, сделан вывод о газофазном механизме горения НТФ.

*Брагин А. А. и др.* провели экспериментальные исследования влияния размеров, вида покрытий, процесса «старения» частиц алюминия и способа смещения компонентов на характеристики горения смесей октогена и АДНА с алюминием. Показано, что за счет модификации поверхности частиц алюминия и способа приготовления композиции можно в широких пределах регулировать баллистические характеристики таких смесей.

*Сеплярский Б. С. и др.* представили результаты экспериментальных исследований закономерностей горения порошковых и гранулированных смесей 2Тi + С при различном содержании влаги в исходной смеси в режиме спутной фильтрации при продуве образца аргоном и без продува. Показано, что наблюдаемое в экспериментах уменьшение скорости горения, вызванное введением влаги, связано с ростом примесного газовыделения и ухудшением условий для растекания титана, причем гранулирование снижает влияние примесных газов на скорость горения.

*Сеплярский Б. С.* для объяснения аномальных (с позиций современной теории) закономерностей горения «безгазовых» систем, проявляющихся при изменении диаметра образца, его толщины и др., предложил гипотезу о возможности конвективного переноса тепла, вызванного движением слоя расплава легкоплавкого реагента под действием капиллярных сил и перепада давлений примесных газов перед и за слоем расплава и подтвердил ее экспериментально.

*Тарасов А. Г. и др.* представили результаты экспериментального исследования горения гранулированной смеси 2Тi + С в спутном потоке азота и обнаружили значительное увеличение скорости горения такой смеси по сравнению с порошковой смесью того же состава. Показано, что при горении гранулированного состава ведущую роль в механизме распространения фронта горения играют реакции азотирования титана.

*Ермолаев Б. С. и др.* измерили импульс тяги, характеристики разгона метаемого тела и давление в камере импульсного устройства диаметром

25,5 мм с отстрелом массы, которое работает на зарядах ВВ из смеси тротил/гексоген в режиме низкоскоростной детонации. Показано, что импульс тяги изменяется пропорционально корню квадратному из произведения массы заряда на массу тела, по крайней мере, для зарядов не слишком большой массы. Определены условия, при которых достигается высокая полнота химического превращения, а максимальное давление в камере не превышает 1,3 ГПа.

*Семенов И. В. и др.* разработали математическую модель, вычислительный алгоритм и программный комплекс для расчета теплового состояния ствола артиллерийского орудия при выстреле в двумерной осесимметричной постановке, причем расчет включает и внутрибаллистический процесс, и прогрев ствола — многослойного изделия, состоящего из разных материалов.

*Махов М. Н. и Архипов В. И.* провели расчетно-экспериментальные исследования влияния добавок неорганических окислителей (нитрата аммония, ПХА и аммоний динитрамида) на теплоту взрыва и метательную способность бризантных ВВ на основе смесей октогена и триаминотринитробензола.

*Долгобородов А. Ю. и др.* провели экспериментальные исследования периода горения в детонацию и чувствительности к механическим воздействиям механоактивированных смесей ПХА и алюминия и установили очень высокую чувствительность таких смесей к удару.

*Стрелецкий А. Н. и др.* провели экспериментальные исследования влияния дозы активации на структуру и реакционную способность механоактивированных композитов Mg/фторопласт с целью определения физических причин увеличения скоростей взаимодействия при ударно-волновом и тепловом инициировании таких композитов. Установлены предельные значения доз, соответствующие максимальной активации смесей, при которой еще не происходит химического взаимодействия во время приготовления композиций.

*Худавердиев В. Г. и др.* провели экспериментальные исследования развития взрыва в смесях ПХА (20 мкм) с субмикронным алюминием ALEX (0,2 мкм) и показали, что переход горения в детонацию в таких смесях может происходить в малопрочных стеклянных оболочках диаметром 10 мм при поджигании спиралью накаливания. Определены сценарий и характеристики перехода горения в детонацию.

*Сулумов А. А. и др.* представили результаты экспериментально-теоретических исследований детонационных характеристик и критических условий распространения детонации в трехкомпонентной взрывчатой смеси гексоген/вода/песок, предлагаемой для использования в качестве взрывного пропантанта. Для экспериментального исследования авторы выбрали ранее практически не изученные смеси, в которых массовое соотношение ВВ (гексогена) и песка, а также их дисперсности варьировались в широких пре-

делах и впервые получили зависимости скорости детонации от содержания гексогена в тройной смеси в диапазоне от 14% до 74%, от размера частиц гексогена и песка и от начальной температуры смеси. Показано, что критический размер заряда, способного детонировать, снижается при увеличении содержания гексогена в смеси.

*Дубовик А. В. и др.* провели экспериментальные исследования чувствительности к удару фторполимеров, склонных к протеканию взрывоподобных реакций, и показали, что чувствительность фторсополимеров может заметно отличаться от чувствительности бинарных смесей полимеров при одинаковом элементном составе.

*Тесёлкин В. А. и др.* провели экспериментальные исследования чувствительности пастообразных взрывчатых смесей на основе ПХА, содержащих абразивную добавку в виде гранулированного керамического порошка с диаметром гранул 0,2–0,4. Исследованы особенности деформации и разрушения тонких слоев пастообразных материалов, измерены критические параметры инициирования взрыва при ударе, изучено влияние скорости нагружения, предварительного термостатирования и др. на критическое давление возбуждения взрыва при ударе и на критическую энергию инициирования

*Ананьев С. Ю. и др.* провели экспериментальное исследование прочностных характеристик двухстеночных углеродных нанотрубок при ударно-волновом воздействии, используя электронную микроскопию и спектроскопию комбинационного (рамановского) рассеяния. Получена подробная информация о поведении углеродных нанотрубок при ударно-волновом воздействии при давлениях до 98 ГПа.

**Часть 4** включает некоторые материалы пленарной дискуссии на тему «Термолиз при высоких температурах и давлениях: требуемые и достигнутые уровни изучения». В дискуссии приняли участие Афанасьев Г. Т., Зенин А. А., Кузнецов Н. М., Синдицкий В. П., Штейнберг А. С. и др.

В **Части 5** мы публикуем статью Н. М. Кузнецова о своем учителе — замечательном советском ученом, заведующем лабораторией ИХФ АН СССР профессоре А. С. Компанейце по случаю 100-летия со дня его рождения, а также письмо Я. Б. Зельдовича Ф. И. Дубовицкому, в котором обсуждаются вопросы о путях развития науки о горении, актуальные и сегодня.

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 многочисленных коллег-рецензентов как в нашей стране, так и соотечественников за рубежом, и работа коллектива редакционной комиссии: А. А. Борисова, Б. С. Ермолаева, Б. Л. Корсунского и В. Г. Крупкина. С особой благодарностью отмечаю поддержку и полезные советы со стороны директора ИХФ РАН академика А. А. Берлина. Как и в прошлые годы, всю работу по под-

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

готовке и изданию сборника выполнили в срок и с высоким качеством сотрудники издательства ТОРУС ПРЕСС, и я с удовольствием отмечаю их высокий профессионализм.

Книга выпущена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-08-0620г) и Центра импульсно-детонационного горения ИХФ РАН.

### Литература

1. Горение и взрыв / Под общ. ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2008. Вып. 1. 112 с. (ISBN 5-978-94588-056-6).
2. Горение и взрыв / Под общ. ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2009. Вып. 2. 192 с. (ISBN 978-5-94588-062-7).
3. Горение и взрыв / Под общ. ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. Вып. 3. 344 с. (ISBN 978-5-94588-072-6).
4. Горение и взрыв / Под общ. ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. Вып. 4. 448 с. (ISBN 978-5-94588-097-9).
5. Горение и взрыв / Под общ. ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2012. Вып. 5. 510 с. (ISBN 978-5-94588-109-9).
6. Горение и взрыв / Под общ. ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2013. Вып. 6. 414 с. (ISBN 978-5-94588-127-3).

Москва

С. М. Фролов