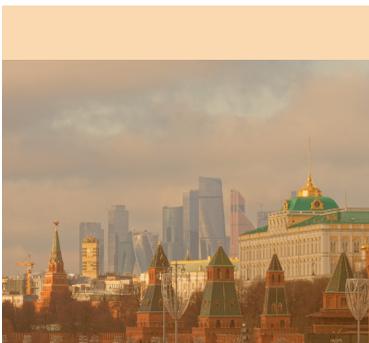


Научный Совет РАН по горению и взрыву
Отделение энергетики, машиностроения,
механики и процессов управления РАН
Отделение химии и наук о материалах РАН

Российский фонд фундаментальных исследований

ТЕЗИСЫ XV Всероссийского симпозиума по горению и взрыву

Москва, 2020 г



**Научный Совет РАН по горению и взрыву
Отделение энергетики, машиностроения,
механики и процессов управления РАН
Отделение химии и наук о материалах РАН**

**Российский фонд фундаментальных
исследований**

ТЕЗИСЫ

**XV Всероссийского симпозиума
по горению и взрыву**

том I

Тезисы XV Всероссийского симпозиума по горению и взрыву Том I

В сборнике представлены тезисы докладов XV Всероссийского симпозиума по горению и взрыву (Москва, 29 ноября – 4 декабря 2020 г). Доклады отражают современное состояние исследований в области физики горения и взрыва. В сборнике рассмотрены: фундаментальные вопросы физики горения и взрыва, кинетика химических превращений, термодинамика горения и взрыва; ударные волны, горение и детонация в конденсированных средах, свойства вещества при высоких давлениях и температурах; макрокинетика и газодинамика реагирующих систем, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, математическое моделирование; горение в авиационных, ракетных и поршневых двигателях; методы экспериментальной диагностики быстротекущих процессов в реагирующих средах; промышленные и технологические процессы на основе горения и взрыва; проблемы безопасности и экологии.

Симпозиум проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-03-22031.

Под редакцией:

д.ф.-м.н. Султанова В.Г., д.ф.-м.н. Салганского Е.А.

Корректурa, электронная верстка, дизайн-макет –
ООО «Медиа-Мастер»

ISBN 978-5-6044508-1-9

ISBN 978-5-6044508-1-9



9 785604 450819

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

<i>Арутюнов В.С.</i> САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ МЕТАН-АЛКАНОВЫХ И МЕТАН-ВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ В УСЛОВИЯХ ДВС	11
<i>Копылов Н.П.</i> КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ПОСЛЕДНИЕ РАЗРАБОТКИ В ПРЕДУПРЕЖДЕНИИ И ПОДАВЛЕНИИ ПОЖАРОВ В КРУПНЫХ ТОПЛИВНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ	12
<i>Рогачев А.С.</i> ГОМОГЕННАЯ И ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ МИКРО- И НАНО-ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ: ДВЕ ПАРАДИГМЫ НАУКИ О ГОРЕНИИ, ИХ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА.....	14
<i>Синдицкий В.П.</i> ГЕТЕРОЦИКЛИЧЕСКИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ: ТЕРМОЛИЗ И МЕХАНИЗМ ГОРЕНИЯ.....	16
<i>Смирнов Н.Н.</i> ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ПОЛИДИСПЕРСНЫХ АЭРОВЗВЕСЯХ	17
<i>Яновский Л.С.</i> ЭНЕРГОЕМКИЕ ТОПЛИВА И ГОРЮЧИЕ ДЛЯ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ: ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ.....	19

УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ

<i>Алешин В.В.</i> ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРЕКУРСОРОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОЛНЕ БЕСПЛАМЕННОГО ГОРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПОНЕНТА	23
<i>Байков А.В.</i> ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ ВИДОВ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С РЕАКТИВНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ	25
<i>Бивол Г.Ю.</i> УСКОРЕНИЕ ПЛАМЕНИ В КАНАЛЕ С ПОРИСТЫМ ПОКРЫТИЕМ В СМЕСИ ВОДОРОДА С ВОЗДУХОМ	26
<i>Бусурина М.Л.</i> МЕХАНОАКТИВАЦИЯ И ГОРЕНИЕ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ СМЕСЕЙ В СИСТЕМЕ Co-Ti-Al	28
<i>Вершинина К.Ю.</i> ЗАЖИГАНИЕ И ГОРЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ И ЖИДКИХ ГОРЮЧИХ ОТХОДОВ.....	30
<i>Волкова Н.Н.</i> КИНЕТИКА ТЕРМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ МОНОКРИСТАЛЛОВ 1,1-ДИАМИНО-2,2-ДИНИТРОЭТИЛЕНА	31
<i>Воротыло С.</i> САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ ДИСКРЕТНЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ И	

ФОРМИРУЮЩИМИСЯ В ВОЛНЕ ГОРЕНИЯ НАНОВОЛОКНАМИ SiC.....	33
<i>Гадомский С.Я.</i> НОВЫЙ ПОДХОД К ПЕРЕРАБОТКЕ ПОЛИИМИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ	34
<i>Глушков Д.О.</i> МЕХАНИЗМ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ ГЕЛЕОБРАЗНЫХ ТОПЛИВ	35
<i>Голуб В.В.</i> СТРУКТУРА И ДИНАМИКА СФЕРИЧЕСКИХ ВОДОРОДНО-ВЗДУШНЫХ ПЛАМЁН.....	37
<i>Гольщев А.А.</i> ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УДАРНОСЖАТОГО ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА В МЕГАБАРНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ	38
<i>Губарев Ф.А.</i> ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СКОРОСТНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГОРЕНИЯ НАНОПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ И ИХ СМЕСЕЙ.....	39
<i>Гуренцов Е.В.</i> ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ САЖЕВЫХ НАНОЧАСТИЦ В СТАНДАРТНОМ ЭТИЛЕНО-ВОДУШНОМ ПЛАМЕНИ МЕТОДАМИ ЛИИ И ПЭМ	41
<i>Долгобородов А.Ю.</i> ВОСПЛАМЕНЕНИЕ СМЕСЕЙ НАНОАЛЮМИНИЯ СОКСИДАМИ МЕДИ И ВИСМУТА ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ	42
<i>Емельянов А.Н.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОКРИТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ-ПАР МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ УДАРНО-СЖАТЫХ ПОРИСТЫХ ОБРАЗЦОВ	43
<i>Ермолаев Б.С.</i> КОНВЕКТИВНОЕ ГОРЕНИЕ И ВЗРЫВ В СМЕСЯХ НА ОСНОВЕ ПЕРХЛОРАТА И НИТРАТА АММОНИЯ	45
<i>Загнитько А.В.</i> ИЗУЧЕНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СОСТАВА АЭРОЗОЛЬНЫХ ПОТОКОВ ТОПЛИВНЫХ ЖИДКОСТЕЙ И ВОДЫ В АТМОСФЕРЕ	46
<i>Зиборов В.С.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВОЛНЫ УДАРНОГО СЖАТИЯ В СРЕДЕ С ЗАДАННОЙ ПОРИСТОСТЬЮ	49
<i>Калмыков П.И.</i> РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГОРЕНИЯ И АГЛОМЕРАЦИИ АЛЮМИНИЯ В ПОТОКЕ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ АЗОЛОВОГО СВЯЗУЮЩЕГО И ЦИКЛИЧЕСКИХ НИТРАМИНОВ	50
<i>Камынина О.К.</i> СВС МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ Ti-Ta-Ni-КЕРАМИКА	52

<i>Киверин А.Д.</i> ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В РАСХОДЯЩЕМСЯ ПЛАМЕНИ	54
<i>Кислов В.М.</i> ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ГАЗИФИКА- ЦИИ ДРЕВЕСИНЫ В ГОРЮЧИЙ ГАЗ МЕТОДОМ ПАРЦИАЛЬ- НОГО ОКИСЛЕНИЯ.....	55
<i>Коротких А.Г.</i> ЗАЖИГАНИЕ И ГОРЕНИЕ ВЭМ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ, БОРА И ТИТАНА	57
<i>Коршунова М.Р.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА ПОЛИАРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ ПИРОЛИЗЕ СМЕСЕЙ БЕНЗОЛА И ДИМЕТИЛОВОГО ЭФИРА ЗА УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ.....	59
<i>Крисяк Б.</i> Э. МЕХАНИЗМ ТЕРМОЛИЗА 1,1-ДИАМИНО-2,2- ДИНИТРОЭТИЛЕНА (FOX-7).....	61
<i>Кришеник П.М.</i> УСТОЙЧИВОСТЬ ПЕРЕХОДА БЕЗГАЗОВОЙ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ ЧЕРЕЗ КЛИНООБРАЗНУЮ ИНЕРТНУЮ ПРЕГРАДУ.....	63
<i>Кудрявцев А. Н.</i> МНОГОФРОНТОВАЯ СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН: ОТ ЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ УСТОЙЧИВОСТИ ДО ТРЕХМЕРНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	65
<i>Куликов С.В.</i> ПОСТУПАТЕЛЬНАЯ НЕРАВНОВЕСНОСТЬ И ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДОБАВОК КСЕНОНА НА ПОРОГ ДЕТОНАЦИИ СМЕСЕЙ O_2-H_2-He И H_2 -ВОЗДУХ.....	67
<i>Лавров В.В.</i> О ВЛИЯНИИ ПОРИСТОСТИ НА ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ АММИАЧНОСЕЛИТРЕННЫХ ВВ	70
<i>Лемперт Д.Б.</i> ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНЫЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ КАК ДИСПЕРГАТОРЫ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ПВРД.....	72
<i>Луценко Н.А.</i> О ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ СРЕД МЕТОДОМ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ.....	75
<i>Мееров Д.Б.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ОБРАЗЦОВ БОРА РАЗЛИЧНЫХ МОДИФИКАЦИЙ.....	77
<i>Мельникова К.С.</i> ЭВОЛЮЦИЯ ОЧАГОВ УЛЬТРА-БЕДНОГО ПЛАМЕНИ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В УСЛОВИЯХ ЗЕМНОЙ ГРАВИТАЦИИ	79
<i>Михальченко Е.В.</i> ЧИСЛЕННОЕ ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВА- НИЕ ДВИГАТЕЛЯ С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ	81

<i>Молодец А.М.</i> КЛЮЧЕВЫЕ ФУНКЦИИ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МИ-ГРЮНАЙЗЕНА.....	83
<i>Немцев М.Ю.</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ГОРЕНИЯ ИНГИБИРОВАННОГО ЗАРЯДА В УСТАНОВКЕ С ДОЖИГАТЕЛЬНОЙ КАМЕРОЙ.....	85
<i>Никитин А.Д.</i> ВЛИЯНИЕ ВОДЯНОГО ПАРА НА ПРОДУКТЫ ГАЗИФИКАЦИИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ В ПОТОЧНОМ РЕАКТОРЕ	87
<i>Николаев Д.Н.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ СЖИМАЕМОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ УДАРНО-СЖАТОГО КРЕМНИЯ ДО ДАВЛЕНИЯ 490 ГПА	89
<i>Нурмухаметов Д.Р.</i> МНОГОФАКТОРНОСТЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОНКИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ В УСЛОВИЯХ ВЗРЫВЧАТОГО РАЗЛОЖЕНИЯ.....	91
<i>Острик А.В.</i> ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ САПФИРА ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ	93
<i>Павлов Г.И.</i> КОРОТКОФАКЕЛЬНОЕ ГАЗОГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО ВИХРЕВОГО ТИПА	95
<i>Первухина О.Л.</i> ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕТОНАЦИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПЛОСКИХ ЗАРЯДОВ СМЕСЕЙ АММИАЧНОЙ СЕЛИТРЫ С ДИЗТОПЛИВОМ НА КАЧЕСТВО СОЕДИНЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ.....	98
<i>Погожев Ю.С.</i> ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ZrB ₂ -MoSi ₂ -MoB С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ СВС И ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ	100
<i>Полянчик Е.В.</i> ТЕХНОЛОГИЯ ГАЗИФИКАЦИИ В РЕЖИМЕ СВЕРХАДИАБАТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТКО	102
<i>Привезенцев С.С.</i> ПОДАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ФЛЕГМАТИЗИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ.....	104
<i>Размыслов А.В.</i> ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ПРЯМОТОЧНОГО ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ	106
<i>Рашковский С.А.</i> ВЛИЯНИЕ КРИВИЗНЫ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ГОМОГЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	107

<i>Розен А.Е.</i> ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СОЗДАНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР ВЫСОКОЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ.....	109
<i>Салганский Е.А.</i> ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МАССО-ПЕРЕНОСА СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОВ В ВОЛНЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ	111
<i>Санин В.Н.</i> СИНТЕЗ ЛИТЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ В РЕЖИМЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГОРЕНИЯ: ХИМИКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА И ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА.....	113
<i>Седов И.В.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА В ПРОЦЕССАХ СВЕРХАДИАБАТИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ	115
<i>Сидоркин В.Т.</i> СЖИГАНИЕ ГАЗА С ЭКСТРЕМАЛЬНО ВЫСОКОЙ ДОЛЕЙ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В ДУТЬЕВОЙ ВОЗДУХ	117
<i>Скребков О.В.</i> КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ НЕРАВНОВЕСНОСТЬ И ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТ В РЕАКЦИИ ВОДОРОДА С КИСЛОРОДОМ ЗА ОТРАЖЕННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ	119
<i>Смирнов А.Л.</i> МЕХАНИЗМ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ И ИОНИЗАЦИИ В СРЕДЕ ВЫХЛОПНЫХ СТРУЙ ТОРМОЗНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛУННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	121
<i>Смыгалина А.Е.</i> ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДА И СИНТЕЗ-ГАЗА В ДВИГАТЕЛЕ С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ	123
<i>Султанов В.Г.</i> МАХОВСКОЕ ОТРАЖЕНИЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ДЕТОНАЦИОННОГО ФРОНТА С УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЛИНЗОЙ	125
<i>Сыродой С.В.</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРИВОДЯЩИХ К СЕКВЕСТРОВАНИЮ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ ЗАЖИГАНИИ ЧАСТИЦ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА.....	126
<i>Тереза А.М.</i> РАСЧЕТ СОСТАВА, ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И СКОРОСТИ ПЛАМЕНИ ПРИ КОНВЕРСИИ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ПОЛИПРОПИЛЕНА И АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН	128
<i>Трушляков В.И.</i> ПРИМЕНЕНИЕ СМЕСЕВЫХ ТВЁРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ В КОНСТРУКЦИИ ГОЛОВНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ РАКЕТЫ- НОСИТЕЛЯ ДЛЯ ЕГО СЖИГАНИЯ ПОСЛЕ ВЫПОЛНЕНИЯ МИССИИ	130

<i>Федорова Н.Н.</i> НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ.....	132
<i>Филимонова Е.А.</i> УПРАВЛЕНИЕ ГОРЕНИЕМ ОБЕДНЕННОЙ ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ КОРОННЫМ РАЗРЯДОМ В КОМПРЕССИОННОМ ДВИГАТЕЛЕ.....	134
<i>Цветков М.В.</i> ПОВЕДЕНИЕ ЗОЛЫ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ	135
<i>Шаклеин А.А.</i> ДВУХСТАДИЙНАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА	137
<i>Шаров М.С.</i> ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВ В ВОЗДУХЕ	139
<i>Шебеко А. Ю.</i> ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ БОГАТЫХ МЕТАНОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ	140
<i>Шкадинский К.Г.</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭМУЛЬСИЙ (РАСПЛАВОВ) В УСЛОВИЯХ ГРАВИТАЦИОННОГО СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	141
<i>Юхвид В.И.</i> МАТЕРИАЛООБРАЗУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ: СВС-МЕТАЛЛУРГИЯ	143
<i>Ягодников Д.А.</i> О МЕХАНИЗМЕ ГОРЕНИЯ МИКРОННЫХ И НАНОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ БОРА В ВОЗДУХЕ.....	147
<i>Яковенко И.С.</i> РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГОРЕНИЯ В ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ С ВЗВЕШЕННЫМИ МИКРОКАПЛЯМИ ВОДЫ	149
<i>Якуш С.Е.</i> РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЯЧЕЙСТЫХ ПЛАМЕН В УЗКОМ ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ПЛАСТИНАМИ	151

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ МЕТАН-АЛКАНОВЫХ И МЕТАН-ВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ В УСЛОВИЯХ ДВС

Арутюнов В.С.^{1,2,@}, Беляев А.А.¹, Трошин К.Я.¹,

Арутюнов А.В.¹, Никитин А.В.^{1,2}

¹ФГБУН Федеральный исследовательский центр химической
физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, г. Москва

²ФГБУН Институт проблем химической физики Российской
академии наук, Моск. обл., г. Черноголовка, [@] v.arutyunov@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований и кинетического анализа самовоспламенения смесей метана с алканами C₂-C₆ и водородом в диапазоне температур 700-1000 К и давлений 1-15 атм, при которых возможно их нежелательное самовоспламенение в ДВС с искровым зажиганием. Показана немонотонная зависимость энергии активации задержки самовоспламенения алканов от числа углеродных атомов в молекуле с максимумом для этана. Установлено, что, несмотря на большое различие в реакционной способности алканов C₂-C₆ влияние их добавок на задержку воспламенения метана практически одинаково. Для многокомпонентных метан-алкановых смесей задержка самовоспламенения определяется суммарной концентрацией алканов и практически не зависит от ее детального состава. Это позволило предложить аналитические зависимости для расчета задержки самовоспламенения бинарных и тройных метан-алкановых смесей. Полученные экспериментальные результаты хорошо описываются компьютерным моделированием. Наряду с почти одинаковым влиянием примеси всех алканов C₂-C₆ это делает возможным замену сложной процедуры моторных испытаний газовых топлив их компьютерной оценкой. Показано существенное различие в температурной зависимости задержек самовоспламенения метана, водорода и их смесей, связанное с принципиальными отличиями в механизмах их окисления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобра РФ, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития НТК России на 2014 – 2020 годы», соглашение № 05.607.21.0311, уникальный идентификатор RFMEFI60719X0311, а также РФФИ проект 19-31-90022.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВИАЦИОННОГО СПОСОБА ТУШЕНИЯ ЛАНДШАФТНЫХ ПОЖАРОВ

Копылов Н.П., Кузнецов А.Е., Сушкина Е.Ю.,

Копылов П.С., Елтышев И.П.

ФГБУ ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха

Лесные и торфяные пожары (ландшафтные пожары) становятся настоящим бедствием для многих стран мира. В таких пожарах гибнут десятки и сотни людей, уничтожаются целые деревни, города и промышленные предприятия, наносится колоссальный ущерб экологии.

При тушении ландшафтных пожаров активно используется авиация: в США и Канаде - самолеты GL-215, в России – самолеты Бе-200ЧС и Ил-76ТД. При сбросе огнетушащих веществ (ОТВ) с самолетов в зависимости от высоты, скорости полета, объема выливаемых ОТВ происходит их дробление.

Выполненные эксперименты по определению спектра капель ОТВ показали, что распределение капель по размерам и массе хорошо описывается гамма-распределением [1]

$$f(d) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot d^{\alpha-1} \cdot e^{-\beta \cdot d}$$

где α , β – параметры распределения;

d – диаметр капель, мм;

$\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция.

Максимум повторяемости водяных капель приходится на диаметр 0,2 мм. При прохождении капель воды через факел пламени капли размером до 0,375 мм испаряются полностью [2]. Чтобы увеличить плотность орошения при сбросе воды с самолета, необходимо увеличить диаметр капель. Для этого используются добавки к воде – антипирены и загустители.

Получено соотношение, позволяющее рассчитывать медианный диаметр капель в зависимости от физических свойств растворов с добавками: плотности ρ , коэффициента поверхностного натяжения σ , динамической вязкости μ :

$$d_m = \frac{1.8}{\sqrt[6]{k_3 \cdot \sqrt{\rho}}} \cdot (k_1 \cdot \frac{\sqrt{\sigma}}{2} + k_2 \cdot \sqrt{\mu}), \quad (1)$$

где k_1 , k_2 , k_3 – эмпирические коэффициенты.

Экспериментально подтверждено использование формулы (1) для практических расчетов [3]. Эксперименты и расчеты выполнены

для таких добавок, как бишофит (антипирен), бентонит (загуститель), смачиватель «Файрекс».

[1] Копылов Н.П., Кузнецов А.Е., Карпов В.Н., Сушкина Е.Ю. Спектры капель при сбросе воды с самолета Ил-76// Пожарная безопасность. 2019. № 1. С. 17-26.

[2] Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Испарение и трансформация капель и больших массивов жидкости при движении через высокотемпературные газы. Новосибирск. Издательство СОРАН. 2016. С. 301.

[3] Волков Р.С., Копылов Н.П., Стрижак П.А., Хасанов И.Р. Трансформация поверхности массивов огнетушащих жидкостей при их свободном падении с большой высоты.// Пожарная безопасность, 2017, №1. С. 30-37.

ГОМОГЕННАЯ И ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ МИКРО- И НАНО-ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ: ДВЕ ПАРАДИГМЫ НАУКИ О ГОРЕНИИ, ИХ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Рогачев А.С.^{1,®}, Мукасян А.С.²

¹*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова РАН (ИСМАН), Черноголовка, Россия*

²*Университет Нотр Дам, Нотр Дам, Индиана, США*
® *rogachev@ism.ac.ru*

Решение фундаментальной задачи управления процессами горения в микрогетерогенных и нано-гетерогенных системах, таких как порошковые реакционные смеси, многослойные реакционные нанофольги, супертермитные составы, пористые системы фильтрационного горения и др., имеет критически важное значение для развития многих современных технологий. В их числе самораспространяющийся высокотемпературный синтез материалов, ракетостроение, пиротехника, соединение разнородных материалов, безопасность промышленных производств.

В науке о горении сложились две парадигмы (концептуальных модели), каждая из которых отражает соответствующий режим распространения волны горения в микро- и нано-гетерогенных системах. Гомогенная модель является развитием классических работ Я. Б. Зельдовича, Д. А. Франк-Каменецкого по теории газовых пламен [1]. В работах А. Г. Мерджанова, Б. И. Хайкина [2] и их школы было показано, что при определенных условиях микрогетерогенные системы можно рассматривать как гомогенные в тепловом отношении. Однако такое приближение оказалось применимым не всегда. Развитие экспериментальных методов исследования волн горения в микрогетерогенных системах выявило в них тепловые микро-неоднородности [3,4], существование которых не укладывалось в гомогенную модель, что послужило основанием для создания микрогетерогенной (дискретной) модели горения [5,6].

В данной обзорной работе представлен анализ развития и взаимодействия двух этих моделей горения на примере конкретных микро- и нано-гетерогенных систем. Показано, что переход от квазигомогенного режима горения к микрогетерогенному однозначно определяется соотношением характерных времен реакции и теплообмена на микроскопическом уровне. Квазигомогенный и

микрогетерогенный режимы горения проявляются не только на микроскопическом уровне (в тепловой микроструктуре фронта и локальной скорости горения), но и в макроскопических закономерностях распространения волн горения. В рамках каждой из парадигм рассмотрены области существования стационарных и автоколебательных режимов, пределы горения, зависимости скорости от размеров частиц и других параметров.

Показано, что гомогенное безгазовое горение в макроскопических масштабах реализуется в многослойных реакционных нано пленках, при этом скорости распространения достигают десятков метров в секунду, что весьма необычно для «твердого пламени». Механизмы этих процессов получили объяснение на основе электронно-микроскопического исследования волн горения и молекулярно-динамического моделирования наногетерогенных реакций. Наряду с безгазовыми, проанализированы процессы горения с ведущей ролью газофазного массо- и теплопереноса: фильтрационное горение, горение растворов (системы золь-гель), нанотермиты.

Показано, что целенаправленное сочетание гомогенных и микрогетерогенных механизмов горения позволяет управлять процессом в широком диапазоне параметров и получать конденсированные продукты с нужной микроструктурой и свойствами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-03-00438).

- [1] Зельдович Я.Б., Франк-Каменецкий Д.А., 1938, ЖФХ, 12(1). 100-105.
- [2] Merzhanov A.G., Khaikin B.I., 1988, Prog. Energy Comb. Sci. 14. 1-98.
- [3] Merzhanov A.G., Rogachev A.S. 1992, Pure Appl. Chem. 64(7). 941-953.
- [4] Varma A., Rogachev A.S., Mukasyan A.S., Hwang S., 1998, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 95. 11053-11058.
- [5] Рогачев А.С. ФГВ, 2003, 39(2). 38-47.
- [6] Рогачёв А.С., Мукасыян А.С. ФГВ, 2015, 51(1). 66-76.

ГЕТЕРОЦИКЛИЧЕСКИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ: ТЕРМОЛИЗ И МЕХАНИЗМ ГОРЕНИЯ

Синдицкий В.П.

РХТУ им. Д.И. Менделеева

vps@muctr.ru

Изучение горения энергетических материалов с целью установления механизма горения, нахождения связи между строением ВВ и скоростью его горения является одной из важнейших фундаментальных задач. В работе представлены результаты в этой области, полученные в Менделеевском университете в последние годы.

Среди известных классов энергетических материалов гетероциклические фуразаны и фуроксаны занимают особое место. С одной стороны, фуразановый и фуроксановый циклы обладают высокой энтальпией образования, с другой стороны, они содержат в своем составе активный кислород. В результате такого сочетания свойств энергетические характеристики при горении складываются из близких по величине вкладов внутренней энергии и теплоты окислительно-восстановительных превращений. Подобное сочетание характерно и для нитропроизводных пиразола, которые сейчас широко исследуются во всем мире.

В то же время в последние годы появилось много соединений, горение которых определяется только энтальпийным вкладом, причем эти вещества могут вообще не иметь в своем составе окислительных элементов. К ним можно отнести соли азотетразола с азотистыми основаниями, компоненты газогенерирующих составов и ракетных топлив. Производные мезоионного пятичленного гетероцикла азасиднона представляют собой стабильный гибрид высокоэнергетической азидогруппы и CO_2 . Особый интерес среди полиазотистых соединений представляют производные 1,2,4,5-тетразина из-за высокой положительной энтальпии образования. Азолоаннелированные тетразины как перспективные энергонасыщенные материалы исследуются относительно недавно, однако оказалось, что введение этого фрагмента в молекулу ВВ увеличивает скорость горения.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ПОЛИДИСПЕРСНЫХ АЭРОВЗВЕСЯХ

Смирнов Н.Н.

МГУ имени М.В. Ломоносова

*Федеральное государственное учреждение "Федеральный научный
центр Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук", г. Москва, Россия*

В лекции представлены результаты теоретических, численных и экспериментальных исследований процессов инициирования горения и детонации в гетерогенных полидисперсных смесях. Подробно рассмотрены проблемы распыления, испарения и горения капель топлива, а также неравновесные эффекты при распылении капель и фазовых переходах. Исследовано влияние неравномерности размеров капель и неравномерности их пространственного распределения на воспламенение смеси и ускорение пламени при сильном и слабом инициировании детонации: ударной волной и искровым зажиганием с последующим переходом дефлаграции к детонации (ПГД). Изучены особенности инжекции и воспламенения струи в камере сгорания.

Исследовано поведение отдельных капель в нагретом воздушном потоке, что позволило выделить два сценария нагрева и испарения капель. Мелкие капли последовательно нагреваются, затем охлаждаются за счет потерь тепла на испарение, а затем быстро нагреваются до момента их полного испарения. Более крупные капли могут непосредственно нагреваться до критической температуры, а затем быстро испаряться. Дробление капель оказывает существенное влияние на процессы нагрева и испарения.

Исследование воспламенения газок капельного облака ударной волной показало, что увеличение концентрации капель выше определенного значения тормозит начало детонации в дисперсных смесях и порождает детонационный режим, характерный для несмешанных систем, когда химическая реакция протекает только в тонком пограничном слое облака, тем самым поддерживая распространение ударной волны в чистом газе.

В отличие от гомогенных газовых смесей процессы перехода горения в детонацию в полидисперсных гетерогенных средах не настолько хорошо изучены в настоящее время, что, по-видимому, объясняется большим интересом к ударно-волновому инициированию детонации в таких средах, проявившимся Российскими и зарубежными исследователями до последнего времени. Проведенные

исследования переходных процессов в гетерогенных средах, возникающих при мягком инициировании, показали существенную роль неравновесности физических процессов фазовых переходов на режимы распространения экзотермических волн в таких системах. Изучена роль неравновесных эффектов при испарении и дроблении капель горючего в гетерогенных смесях. Введён критерий, характеризующий степень отклонения системы от состояния равновесия. Исследовано управление процессом перехода горения в детонацию в гомогенных газовых и гетерогенных горючих смесях. Исследовано влияние полидисперсного характера горючей смеси на режим перехода горения в детонацию. Изучена роль пространственной неоднородности распределения конденсированной фазы на переход горения в детонацию. Показано, что неоднородность пространственного распределения конденсированной фазы ухудшает условия инициирования детонации ударной волной, но способствует переходу горения в детонацию.

Работа выполняется при поддержке РФФИ (грант 20-03-00297).

ЭНЕРГОЕМКИЕ ТОПЛИВА И ГОРЮЧИЕ ДЛЯ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ: ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ

Яновский Л.С.^{1,2}

¹ – ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», г. Москва,

Авиамоторная ул., д. 2

² – ФГБУН ИПХФ РАН, г. Черноголовка, М.О., Проспект акад.

Семенова, д. 1

yanovskiy@ciam.ru, yls@icp.ac.ru

Рассмотрены физико-химические процессы, происходящие в топливах при высокотемпературном нагреве в каналах и форсунках топливных систем, системах регенеративного охлаждения, газогенераторах и камерах сгорания высокоскоростных воздушно-реактивных двигателей (ВРД) перспективных летательных аппаратов (ЛА).

Установлены закономерности смоло- и коксоотложений и газообразования при термической и каталитической деструкции, а также закономерности горения энергоемких и эндотермических жидких и твердых топлив различных классов в воздушных потоках. Приведены результаты обобщения экспериментальных исследований, а также новые модели процессов деструкции и горения твердых топлив, в том числе содержащих металлические компоненты в качестве горючего, как в режимах газогенерации, так и в режимах дожигания в воздушном потоке.

Показаны возможности реализации химического хладоресурса при высокотемпературном нагреве как жидких, так и твердых углеводородных топлив. Созданные эндотермические топлива позволяют обеспечить работоспособность камер сгорания высокоскоростных ВРД, изготовленных из существующих конструкционных материалов. Разработана имитационная модель сложной системы «ЛА-ВРД-Топливо», позволяющая формировать требования к характеристикам новых топлив из условия обеспечения экстремума целевой функции-эффективности выполнения полетного задания- при наличии конструктивно-геометрических и эксплуатационных ограничений. Показаны пути создания энергоемких топлив нового поколения.

УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРЕКУРСОРОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОЛНЕ БЕСПЛАМЕННОГО ГОРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПОНЕНТА.

Михайлов Ю.М.¹, Ковалев Д.Ю.², Алешин В.В.^{1,@}

¹ *Институт проблем химической физики РАН*

² *Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН*

@vva@icp.ac.ru

Экзотермическое разложение ряда твердых энергетических материалов в балластированных системах может протекать в форме самораспространяющегося низкотемпературного беспламенного горения. Показано, что выделяющиеся при этом химически активные газы и пары способны восстанавливать некоторые металлоорганические прекурсоры с образованием высокопористых композиционных материалов, содержащих наноразмерные частицы этих переходных металлов или их производных. В настоящей работе изложены результаты исследования стадийности процесса восстановления прекурсоров железа, кобальта, никеля, меди, серебра или свинца в волне беспламенного горения энергетического компонента.

Для регистрации текущего состояния прекурсора переходного металла и продуктов его восстановления использовали метод времяразрешающей рентгеновской дифракции (TRXRD), позволяющий регистрировать локальные фазовые превращения кристаллических соединений в режиме реального времени с дискретизацией до 0,5 секунды.

Показано, что в результате беспламенного горения смеси нитрата целлюлозы, гексаметилендиизоцианата (ГМДИ) и карбонатов серебра или меди происходит прямое формирование частиц 0-валентного металла размером 20-40 нм без образования промежуточных кристаллических фаз с синхронным уменьшением интенсивность дифракционных линий исходного прекурсора.

Обнаружено, что в процесса беспламенного горения смеси НЦ, ГМДИ никеля и свинца существует промежуток времени (1-2 секунды) в течение которого система находится полностью в рентгеноаморфном состоянии. То-есть, интенсивность дифракционных линий прекурсора

постепенно уменьшается до фоновой, а линии 0-валентных металлов еще не проявляются. Только затем происходит быстрая кристаллизация частиц металла. Размер образующихся частиц никеля составляет около 5 нм, а частиц свинца – 80-100 нм. Если в случае легкоплавкого свинца это явление можно объяснить его плавлением, то существование промежуточной аморфной фазы тугоплавкого никеля ещё требует своего объяснения.

Показано, что полное восстановление оксида железа (III) не происходит даже при максимальной температуре беспламенного горения гексогена 740⁰С. В этих условиях при максимальной температуре в реакционной зоне сначала протекает восстановление оксида железа (III) до оксида железа (II) и металла, а затем, при снижении температуры, происходит частичное окисление образовавшегося оксида железа (II) и металла до шпинели (Fe₃O₄). Если к ещё горячим продуктам горения открыть доступ воздуха, они вновь загораются с образованием оксида железа (III).

Обнаружено, что полное восстановление прекурсора железа в волне беспламенного горения гексогена всё же может происходить, если в исходной смеси дополнительно присутствует прекурсор кобальта. В этом случае происходит синхронное исчезновение дифракционных линий прекурсоров и появление линий кобальта и сплава кобальта с железом. Если к ещё горячим продуктам горения открыть доступ воздуха, они вновь загораются с образованием шпинелей Co₃O₄ и Fe₃O₄.

Получаемые в результате беспламенного горения высокопористые материалы, содержащие наноразмерные частицы переходных металлов, могут быть использованы в качестве катализаторов некоторых органических реакций. Разработана технология получения их в гранулированном виде непосредственно в процессе беспламенного горения. Так, каталитический материал на основе никеля показал хорошие результаты в реакции превращения винилацетилена в дивинил, а каталитический материал на основе железа и кобальта - в синтезе углеводов по методу Фишера-Тропша. Отличительной особенностью этих катализаторов является отсутствие у них пирофорных свойств.

Работа выполнена по теме Государственного задания, № государственной регистрации АААА-А19-119101690058-9 и при пожжержке РФФИ (16-29-01035).

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ ВИДОВ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С РЕАКТИВНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ.

Байков А.В.^{1,2}, Аверьков И.С.^{1,2}, Лемперт Д.Б.², Кислов М.Б.²,
Жолудев А.Ф.², Разносчиков В.В.^{1,2}, Яновский Л.С.^{1,2}

¹ – ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», г. Москва, *Авиамоторная ул. д. 2*

² – ФГБУН ИПХФ РАН, г. *Черноголовка, М.О., Проспект акад. Семенова, д. 1*

avbaykov@ciam.ru

В докладе излагается сравнительный анализ возможностей различных видов твердого топлива, которые могут применяться в летательных аппаратах (ЛА) с воздушно – реактивными двигателями (ВРД). В качестве критерия эффективности топлива предлагается рассматривать не отдельные технические характеристики предлагаемого топлива или двигателя, работающего на этом топливе, а летно – технические характеристики (ЛТХ) ЛА на котором применяется рассматриваемое топливо. Лучшим считается топливо, которое обеспечивает достижение наивысших ЛТХ для ЛА выполняющего конкретное полетное задание. Для анализа ЛТХ применяется комплексная математическая модель ЛА, включающая в себя математические модели собственно ЛА, включая его основные массо – габаритные характеристики, двигателя ЛА и применяемого топлива. В качестве примера в докладе приводится выполненный сравнительный анализ ЛТХ ракеты класса «воздух –воздух». Как базовая модель при анализе рассматривается ракета «Метеор», с прямоточным воздушно – реактивным двигателем, состоящая на вооружении стран НАТО. В качестве перспективных топлив, рассматриваются топливные композиции на основе новых полиазотистых соединений, различных металлов, соединений фтора и активных связующих. При анализе учитывается, что металлы, в условиях воздушного тракта ВРД, могут иметь различную полноту сгорания, исходя из чего выбирается оптимальный состав твердого топлива. Исследуется возможность создания безметалльных топливных композиций. Приводятся результаты испытаний отдельных образцов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 17-03-00058.

УСКОРЕНИЕ ПЛАМЕНИ В КАНАЛЕ С ПОРИСТЫМ ПОКРЫТИЕМ В СМЕСИ ВОДОРОДА С ВОЗДУХОМ

Бивол Г.Ю. @, Головастов С.В.

Объединённый институт высоких температур РАН

@ grigorij-bivol@yandex.ru

Экспериментально исследовано ускорение пламени в водородно-воздушной смеси в присутствии пористых материалов. Эволюция скорости была представлена на основе последовательностей высокоскоростных шпирен изображений. Обнаружено, что пенополиуретан с различными размерами пор, размещенный на двух противоположных стенках канала, влияет на ускорение пламени в канале. Представлены зависимости скорости реакции от размера пор. Было обнаружено, что скорость потока к концу пористой секции может быть до 5 раз выше при использовании пенополиуретана с 10 порами на дюйм по сравнению с пенополиуретаном с 80 порами на дюйм. Скорость пламени в гладком канале была ниже скорости пламени в пористом канале для всех тестируемых случаев. Пенополиуретан с меньшим размером пор привел к снижению давления по сравнению с твердым каналом. Сверхзвуковое горение со скоростью около 1600 м/с было обнаружено в пористом канале с размером пор 2,5 мм.

Для оценки эффективности использования пористого покрытия с целью снижения импульса ударно-волновых возмущений, оказываемых на боковую поверхность канала, проведено измерение импульса давления. При распространении пламени в канале с крупными порами были зарегистрированы ударные волны с давлением 1,4 МПа. Давление в канале с твердыми стенками было меньше, чем в пенополиуретане с 20 порами на дюйм и выше, чем в пенополиуретане с меньшими порами. В зависимости от размера пор давление волн сжатия изменяется на порядки (от 1,4 МПа в пористом материале с размером пор 2,5 мм до 0,01 МПа в пористом материале с размером пор 0,3 мм для стехиометрической смеси).

Сделано заключение о том, что пористые покрытия могут влиять на потери тепла, потери импульса, расширение продуктов сгорания и другие факторы. Размер пор покрытия может существенно влиять на ускорение горения на всех стадиях распространения пламени: от ламинарного до турбулентного горения и детонации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-79-00275.

Механоактивация и горение механоактивированных смесей в системе Co-Ti-Al

Бусурина М.Л.[@], Вадченко С.Г., Сычев А.Е.

*Институт структурной макрокинетики и проблем
материаловедения им. А.Г. Мерджанова РАН, Черногоровка, Россия*
[@]busurina@ism.ac.ru

Механоактивационный синтез тройных интерметаллидных соединений является перспективной задачей материаловедения [1]. Система Ti-Al-Co представляет интерес с целью получения на ее основе высокофункциональных конструкционных сплавов, а также сплавов Гейслера Co_2TiAl и Ti_2CoAl .

В настоящей работе методом механоактивации (МА) впервые получен сплав на основе фазы Гейслера Co_2TiAl . Экспериментально были подобраны условия механоактивации реакционной порошковой смеси для формирования однофазного материала. Рентгенофазовый анализ показал, что фаза Co_2TiAl формируется уже через 5 минут механоактивации (Рис. 1).

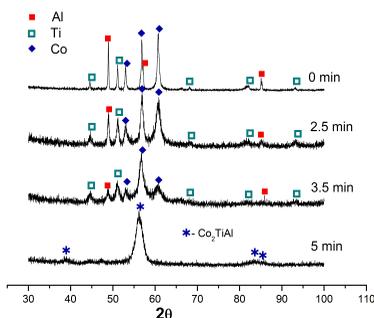


Рис.1. Результаты рентгенофазового анализа порошковой реакционной смеси 2Co-Ti-Al для различного времени механоактивации.

Исследован процесс горения механоактивированных порошковых смесей состава 2Co-Ti-Al и Co-2Ti-Al и синтезированы сплавы на их основе в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, проведено сравнение со сплавами полученными методом теплового взрыва [2] и СВС-прессования [3].

Как показали исследования, параметры горения порошковых реакционных смесей (Co+Ti+Al) зависят от условий нагрева и времени механоактивации.

Результаты дифференциально-термического анализа показали, что механоактивационная обработка снижает температуру начала экзотермической реакции взаимодействия в смесях (Co+Ti+Al), значительно понижая при этом максимальную температуру реакции.

1. Т.Ф. Григорьева, А.П. Барина, Н.З. Ляхов. Механохимический синтез интерметаллических соединений. *Успехи химии*. 70 (1) 2001– с. 54 – 71.
2. М.Л. Бусурина, А.Е. Сычев, И.Д. Ковалев, А.В. Карпов, Н.В. Сачкова. Тепловой взрыв в системе 2Co-Ti-Al: горение, фазообразование и свойства. *Физика горения и взрыва*, **2020**, т. 56, №3, (в печати).
3. М.Л. Бусурина, А.В. Карпов, В.А. Щербаков, А.Н. Грядунов, Н.В. Сачкова, А.Е. Сычев. Электрофизические свойства сплава на основе 2Co-Ti-Al, полученного методом СВС-прессования. *Перспективные материалы*, 2020 № 1, с. 5 - 12.

ЗАЖИГАНИЕ И ГОРЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ И ЖИДКИХ ГОРЮЧИХ ОТХОДОВ

Вершинина К.Ю.[@], Дорохов В.В., Романов Д.С.

Томский политехнический университет, Томск, Россия

[@]vershininaks@gmail.com

За последние десятилетия как в России, так и в мире проблема загрязнения окружающей среды приобрела большие масштабы. Крупными источниками загрязнения являются коммунальные, производственные предприятия, а также энергетические объекты, сжигающие ископаемое топливо (в особенности, пылевидный уголь). Также наряду с непрерывными производственными процессами усиливается проблема постепенного истощения запасов главных топлив (угля, нефти, газа) и возрастания степени сложности их извлечения. Проблемы по обозначенным направлениям могут быть частично решены путем внедрения технологий совместной утилизации горючих отходов различных отраслей с выработкой энергии на теплогенерирующих предприятиях.

Задачами исследования являлась количественная и качественная оценка совместной утилизации горючих отходов разных видов (древесные, угольные, нефтяные, растительные) в составе высоковлажных и маловлажных топливных смесей. Экспериментально определялись основные механизмы зажигания и горения малых порций топлива (капель, частиц, слоя) в модельной камере сгорания при варьировании ряда влияющих факторов (температура нагрева, состав топлива, размер и масса сжигаемых образцов топлива). Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод о позитивных предпосылках применения смесевых топлив на основе отходов для снижения вредного воздействия на окружающую среду при получении тепловой и электрической энергии на установках различных мощностей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-43-700001).

КИНЕТИКА ТЕРМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ МОНОКРИСТАЛЛОВ 1,1-ДИАМИНО-2,2-ДИНИТРОЭТИЛЕНА

Волкова Н.Н.[@], Казаков А.И., Шилов Г.В.

Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия

[@] nvolkova@icp.ac.ru

Физические и химические свойства перспективного взрывчатого соединения 1,1-диамино-2,2-динитроэтилен (апрол, FOX-7) описаны в большом количестве статей и ряде обзоров, и, тем не менее, такое свойство FOX-7, как способность к сублимации и влияние этого процесса на механизм и кинетику термического разложения, скорость горения и чувствительность к взрыву данного ВВ – практически не исследовано.

В предыдущей работе авторов [1] было показано, что в условиях, способствующих сублимации, например, при снижении давления в реакционной ячейке, механизм термораспада кристаллов FOX-7 резко изменяется: если в токе инертного газа при атмосферном давлении FOX-7 термически довольно стабилен, то при непрерывном вакуумировании реакционной системы скорость термораспада кристаллического FOX-7 резко увеличивается. Возможно, что одним из важнейших факторов, влияющим на закономерностей термических превращений FOX-7, является его способность к сублимации, скорость которой значительно возрастает при понижении давления в системе.

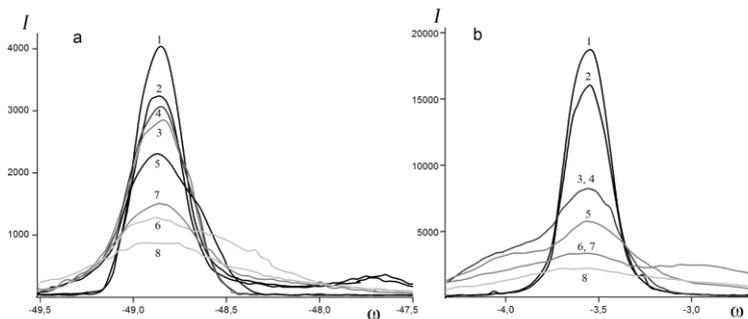


Рис. 1а и 1б. Профили рентгеновского отражения $I(\omega)$: для исходного монокристалла FOX-7 (1); после термостатирования монокристалла FOX-7 при непрерывном вакуумировании в течение 2.2 (2); 4.5 (3); 6 (4); 9 (5); 12.5 (6); 17 (7) и 22.5 часов (8).

Плоскости отражения: (-2 0 0) - а и (0 2 0) - б.

В настоящей работе исследовано изменение макроскопического строения монокристаллов FOX-7 при температуре 108°C в условиях непрерывного вакуумирования системы до остаточного давления 0.13 Па. Методом рентгеновского анализа, выполненного с помощью монокристалльного дифрактометра для разных кристаллографических направлений в монокристалле FOX-7, показано, что при термостатировании кристалла в описанных условиях происходит существенное изменение формы кривых дифракционного отражения (КДО): в самом начале процесса происходит сужение рентгеновских пиков (рис. 1 **a** и **b**, кривые 2), по-видимому, в результате отжига дефектов и совершенствования структуры кристалла FOX-7. Далее происходит значительное уширение и падение интенсивности сигнала (рис. 1 **a** и **b**, кривые 3-8), что свидетельствует о макроскопическом, механическом разрушении монокристалла (например, распаде на домены), поскольку параметры и пространственная группа элементарной ячейки при этом не изменились.

Важно отметить, что разрушение монокристалла происходит неизотропно, характер изменения формы КДО зависит от индексов кристаллографических плоскостей отражения: наиболее медленно изменяются профили отражения от плоскости $(-2\ 0\ 0)$, в то время как уменьшение интенсивности, уширение и даже раздвоение пиков, соответствующих отражению от других плоскостей серии $\{2\ 0\ 0\}$, происходит довольно резко (рис. 1 **b**, кривые 3 - 7).

Разрушение кристалла FOX-7 в условиях пониженного давления может быть вызвано как нарушением структурного порядка в результате сублимации молекул, так и ростом давления паров сублимирующихся молекул в объеме кристалла. Такие явления, в свою очередь, способствуют активации химических процессов, приводящих к ускорению термического распада FOX-7, а при определенных условиях, например, при значительном увеличении скорости сублимации, - и к диспергированию кристаллов, смене механизма разложения и росту скорости процесса на несколько порядков [1].

Работа выполнена по темам Государственного задания: 0089-2019-0005, № гос. регистрации АААА-А19-119101690058-9 и 0089-2019-0017, № гос. регистрации АААА-А19-119100800130-0 и при поддержке РФФИ, проект 17-03-00058

[1] N.N. Volkova, A.I. Kazakov, A.V. Danilchik, A.V. Shastin, G.V. Shilov, 2018, Proc. **21**th Int. Seminar New Trends in Research of Energetic Materials NTREM, 2018, Pardubice, Czech Rep. 1143.

**САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ КЕРАМИЧЕСКИХ
КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ ДИСКРЕТНЫМИ
УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ И ФОРМИРУЮЩИМИСЯ В
ВОЛНЕ ГОРЕНИЯ НАНОВОЛОКНАМИ SiC**

Воротыло С.[@], Левашов Е.А.

НИТУ «МИСИС», Ленинский проспект, д.4., Москва

[@]s.vorotilo@misis.ru

В работе предложен метод получения керамико-матричного композиционного материала на основе карбида кремния, упрочненного дискретными углеродными волокнами и монокристаллическими нановолокнами SiC. В зависимости от макрокинетических характеристик процесса горения на поверхности углеродных волокон могут формироваться диффузионные слои, керамические частицы либо волокна SiC диаметром 10-50 нм и длиной 15-20 мкм. Исследована стадийность химических превращений и структурообразования в волне горения смесей Si-C-C₂F₄ и Si-C-C₂F₄-Ta. Установлены оптимальные условия формирования *in situ* нановолокон как на поверхности углеродных волокон, так и керамической матрицы. Горячим прессованием получены комплексно-упрочненные композиты SiC-TaSi₂-C_f-SiC_{nw} с относительной плотностью 97%, твердостью HV=19 ГПа, прочностью на изгиб $\sigma = 420$ МПа и трещиностойкостью $K_{1C} = 12.5$ МПа·м^{1/2}.

Работа была выполнена в рамках проекта Минобрнауки России «Разработка иерархически структурированных дискретно-армированных и дисперсно-упрочненных термостабильных материалов для теплонагруженных узлов перспективной ракетно-космической техники» (проект № 0718-2020-0034)

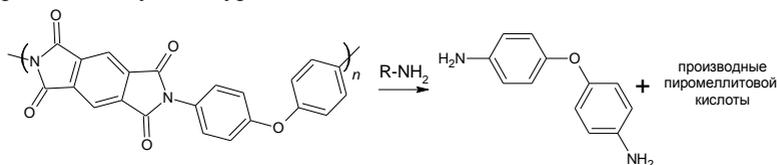
НОВЫЙ ПОДХОД К ПЕРЕРАБОТКЕ ПОЛИИМИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Гадомский С.Я.

Институт проблем химической физики РАН
gadomsky@icp.ac.ru

Благодаря таким свойствам полиимидов, как термическая стабильность, гибкость и универсальность (возможность использования полиимидов в качестве полимерной матрицы для создания композиционных материалов), такие материалы находят всё большее применение в различных отраслях промышленности. Причем сфера применения полиимидных продуктов постоянно расширяется, в связи с чем чрезвычайно актуальной является задача поиска способов их переработки или утилизации.

На примере коммерчески доступного полиимида Kapton впервые показано, что реакция полиимидов с производными аммиака протекает в мягких условиях (комнатная температура, атмосферное давление) с разрывом полимерной цепочки и с высвобождением одного из исходных мономеров (оксиданилина), согласно приведённому ниже уравнению.



Исходный полимер разрушался длительной обработкой растворами гидразин гидрата и этилендиамина. Кроме того, деградация Kapton проводилась также путём воздействия на полимер парами водного раствора аммиака. Во всех случаях наблюдалось образование исходного мономера с количественными выходами.

Обнаруженные особенности протекания реакций имидов с аминами применимы не только для новых методов переработки полиимидных материалов. На примере взаимодействия имидов с гидросиламином показано, что такие реакции могут быть использованы и для синтеза новых ингибиторов деацетилаз гистонов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-03-00950 А; АААА-А20-120013190052-4)

МЕХАНИЗМ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ ГЕЛЕОБРАЗНЫХ ТОПЛИВ

Глушков Д.О.[@]

*Национальный исследовательский
Томский политехнический университет*

г. Томск, Россия

[@] dmitriyog@tpu.ru

Одним из перспективных направлений развития теории горения конденсированных веществ является разработка новых топливных составов, например на основе эмульсий и суспензий горючих жидкостей. Путем загущения этих составов можно получить гелеобразные топлива, которые сочетают преимущества жидких и твердых топлив [1]. В зависимости от условий применения такие топлива (по сравнению с широко распространенными твердыми и жидкими) характеризуются более высокими энергетическими характеристиками, меньшим негативным воздействием на окружающую среду при хранении, транспортировке и сжигании [2].

В рамках данной работы выполнено экспериментальное исследование процесса зажигания группы составов гелеобразного топлива, приготовленных на основе горючих жидкостей и криогелей [3], в том числе с добавлением мелкодисперсных твердых компонентов [4]. Одиночные частицы топлива массой 5–15 мг зажигались в неподвижной высокотемпературной воздушной среде при 823–1273 К. С использованием программно-аппаратного комплекса высокоскоростной видеорегистрации [5] установлены механизм и характеристики индукционного процесса, которые отличаются от закономерностей и характеристик физико-химических процессов, протекающих при зажигании жидкого топлива в обычном состоянии. Микровзрывное диспергирование капли расплава в течение индукционного периода положительно влияет на развитие горения и интенсификацию выгорания компонентов топлива [3, 4]. Времена задержки зажигания топлив в условиях диспергирования капель расплава не превышают 5 с. Установлено влияние интенсивности нагрева (скорости ввода в камеру сгорания) и размера (массы) частиц гелеобразного топлива на основную характеристику процесса – время задержки зажигания. В координатах «время задержки зажигания – плотность теплового потока» установлена область устойчивого зажигания топлива. Минимальное значение плотности теплового потока, при котором топливо зажигается, составляет 40 кВт/м². В таких

условиях (близких к предельным условиям зажигания) основные факторы (состав топлива, температура источника нагрева, начальный размер частиц) оказывают достаточно существенное влияние на длительность индукционного периода. При относительно высоких значениях теплового потока (более 100 кВт/м^2) эти факторы менее существенно влияют на времена задержки зажигания.

Также установлено [6], что при разных начальных температурах гелеобразного топлива (190–295 К) при зажигании протекает идентичная совокупность физико-химических процессов, отличающаяся длительностью индукционного периода. Например, значения времен задержки зажигания отличаются на 25–95% для топлив с начальной температурой 293 К и температурами 188–233 К вследствие более длительной стадии прогрева и плавления последних. Выявлено, что начальная температура топлива менее существенно влияет на времена задержки зажигания составов, содержащих мелкодисперсные твердые компоненты.

Анализ полученных видеозаписей с использованием ПО Tema Automotive и оригинальных программных кодов, разработанных в среде программирования MatLab, позволил установить основные характеристики микровзрывного диспергирования капель расплава: скорости вдува горючих паров в среду окислителя и движения мелкодисперсных частиц в окрестности капли, размеры и температуры области экзотермического реагирования. Полученные результаты являются основой для разработки физических и математических моделей зажигания перспективных гелеобразных топлив.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-13-00031).

[1] Solomon Y., Natan B., Cohen Y., 2009, *Combust. Flame*. **156**(1). 261-8.

[2] Ciezki H.K., Naumann K.W., 2016, *Propellants Explos. Pyrotech.* **41**(3). 539-47.

[3] Vershinina K.Y., Glushkov D.O., Nigay A.G., Yanovsky V.A., Yashutina O.S., 2019, *Ind. Eng. Chem. Res.* **58**(16). 6830-40.

[4] Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Nigay A.G., Yanovsky V.A., Yashutina O.S., 2020, *Powder Technol.* **360**. 65-79.

[5] Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Nigay A.G., Yashutina O.S., 2019, *J. Energy Inst.* **92**(6). 1944-55.

[6] Glushkov D.O., Nigay A.G., Yanovsky V.A., Yashutina O.S., 2019, *Energy Fuels*. **33**(11). 11812-20.

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА СФЕРИЧЕСКИХ ВОДОРОДНО-ВЗДУШНЫХ ПЛАМЁН

Голуб В.В.^{1@}, Володин В.В.¹, Микушкин А.Ю.^{1,2}, Ельянов А.Е.¹

¹Объединенный институт высоких температур РАН

²МГТУ им. Н.Э. Баумана

@golub@ihed.ras.ru

В работе представлены результаты ИК и шлирен визуализации сферического распространения водородно-воздушного пламени в изначально неподвижной смеси. Впервые проведена ИК съемка сферически расширяющегося фронта пламени с ультракороткими временами экспозиции. Примененная техника съемки позволила выявить структуры фронта пламени, фактор складчатости поверхности которых существенно превышает все ранее полученные. Экспериментальные фотографии подвергнуты автоматизированной обработке с выделением основных масштабов неоднородностей. Проведен анализ динамики размеров наблюдаемых неоднородностей. Показано развитие последующих гармоник неоднородностей фронта пламени и установлена связь между размерами неоднородностей последующих стадий (Рис. 2).

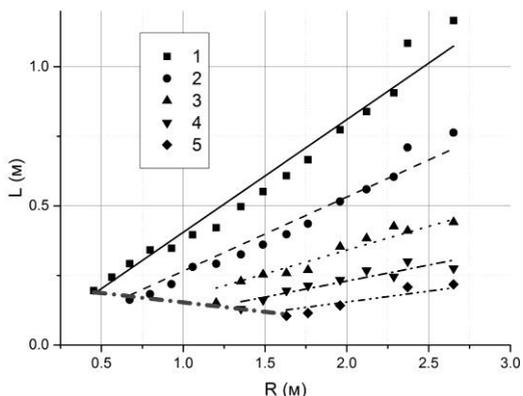


Рисунок 1 Динамика каскада неоднородностей сферического водородно-воздушного пламени.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УДАРНОСЖАТОГО ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА В МЕГАБАРНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ

Гольшев А.А.[@], Соболев Д.В., Молодец А.М.
Институт проблем химической физики РАН
[@] golyshev@icp.ac.ru

Политетрафторэтилен (тефлон) широко используется в качестве высокоомного изолятора, сочетающего химическую стойкость с высокой температурой плавления и разложения. Тефлон используется в качестве изолятора не только при нормальных условиях, но и при измерении электросопротивления материалов в опытах с ударными волнами до давлений ~ 150 ГПа (см., например, [1-2] и ссылки в них).

При исследовании электрофизических свойств ударносжатых материалов зачастую требуются проводить измерения их электросопротивления при пониженных начальных температурах. В связи с этим в представляемой работе измерено электросопротивление ударносжатого тефлона в области мегабарных давлений и пониженных начальных температур до температур жидкого азота. Показано, что электросопротивление предварительно «охлажденного» тефлона при ударном сжатии скачкообразно уменьшается при давлении 80 ГПа. Эффект скачкообразного уменьшения электросопротивления ударносжатого тефлона имеет обратимый характер – в волне разгрузки при давлении ~ 80 ГПа электросопротивление тефлона возвращается практически к исходному значению. В целом установлено, что сильное квазиизэнтропическое сжатие политетрафторэтилена переводит его в высокопроводящее состояние с электропроводностью на уровне $\sigma = 0.1-0.2$ ($\Omega \cdot \text{см}$)⁻¹. Граница существования высокопроводящего состояния ударно-сжатого тефлона в координатах давление-температура располагается в диапазоне давлений 80-120 ГПа на уровне 1000-1500 К.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-08-00237).

[1] Бордзиловский С.А., Караханов С.М., 2002, ФГВ. 2002. **38**. №.6. С.127-5.

[2] Гольшев А.А., Молодец А.М., 2013, ФГВ. **49**. №.2. С.106-7.

**Оптические системы скоростной визуализации для
исследования высокотемпературного горения нанопорошков
металлов и их смесей**

Губарев Ф.А.^{1,@}, Ким С.¹, Мостовщиков А.В.^{1,2}, Ильин А.П.¹

¹*Национальный исследовательский Томский политехнический
университет*

²*Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники*
@ gubarevfa@tpu.ru

Перспективным направлением развития нанотехнологий является исследование, синтез и применение нанопорошков металлов, в частности нанопорошка алюминия и его смесей [1]. Процесс горения нанопорошка алюминия и смесей на его основе протекает при высокой температуре и в некоторых случаях сопровождается разлетом продуктов горения [2]. В связи с этим, актуальной задачей является разработка методов и средств для наблюдения, контроля и измерения параметров высокотемпературного горения нано- и микропорошков металлов и их смесей в режиме реального времени.

В работе исследовались нанопорошок алюминия с распределением частиц по диаметру, близким к нормально-логарифмическому с максимумом 80 нм, нанопорошок железа с распределением частиц по диаметру с максимумом 110 нм, микропорошки АСД-6М и Р-10, а также нанопорошки алюминия, активированные СВЧ и рентгеновским излучением.

В докладе представлены разработанные методы и результаты визуализации поверхности горящих порошков в реальном времени. Рассмотрены лазерные мониторы с традиционной схемой построения изображения и коротким фокусным расстоянием, и дистанционной схемой, имеющей увеличенную (50 см) дистанцию мониторинга [3]. Предлагаемая техника эксперимента позволяет исследовать поверхность образцов порошковых материалов во время высокотемпературного горения, сопровождающегося интенсивным свечением и разлетом продуктов горения. Кроме лазерного мониторинга рассматриваются также методы визуализации на основе

лазерной подсветки: скоростная визуализация с лазерной подсветкой и метод корреляции цифровых спекл-изображений.

В докладе также представлены результаты скоростной визуализации поверхности образца твердого топлива во время горения. Твердое топливо на основе микронного порошка алюминия АСД-6М является примером смеси, горение которой сопровождается не только ярким свечением, но и значительным разлетом продуктов сгорания. Применение дистанционного лазерного монитора позволило визуализировать поверхность горящего образца, и оценить скорость и характер процесса горения.

[1] Zarko V.E., Gromov A.A., 2016, *Energetic Nanomaterials: Synthesis, Characterization, and Application*.

[2] Li L., Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Smirnov A., Gubarev F.A., 2020, *IEEE T. Instrum. Meas.* 2019 (early access).

[3] Li L., Antipov P.A., Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Gubarev F.A., 2019, *PIER M.* **84**. 85-93.

ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ САЖЕВЫХ НАНОЧАСТИЦ В СТАНДАРТНОМ ЭТИЛЕНО-ВОДУШНОМ ПЛАМЕНИ МЕТОДАМИ ЛИИ И ПЭМ

Гуренцов Е.В.^{1,@}, Еремин А.В.¹, Михеева Е.Ю.¹, Колотушкин Р.Н.^{1,2}

¹Объединенный институт высоких температур РАН

²МГТУ им. Баумана

@ gurentsov@ihed.ras.ru

Надежные измерения размеров растущих сажевых частиц в различных условиях необходимо для тестирования моделей сажеобразования с одной стороны и для развития методов диагностики сажи, с другой стороны. Для решения этой задачи предложено использовать «стандартные» пламена с определенными параметрами горения [1]. Одним из таких пламен является предварительно перемешанное этилено-воздушное пламя C_2H_4 -14.08%; O_2 -18.05%; N_2 -67.87% с соотношением $C/O=0.78$, реализуемое в стандартной горелке МакКенна (Holthuis & Associates) с бронзовой пористой поверхностью диаметром 62 мм. В данной работе представлены результаты измерения размеров сажевых наночастиц в зависимости от высоты пламени методами лазерно-индуцированной инкандесценции (ЛИИ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Также представлены данные по измерениям температуры по высоте пламени, полученные при помощи платино-родиевой термпары. Полученные данные сравниваются с аналогичными измерениями, сделанными в таком же пламени другими исследовательскими группами. Показано, что, несмотря на идентичные соотношения горючее/окислитель и применение стандартных горелок, данные по размерам сажевых наночастиц существенно различаются. Обсуждаются причины обнаруженных расхождений. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, Грант №19-79-10204.

[1] <https://www.adelaide.edu.au/cet/isfworkshop/data-sets/laminar-flames#isf-4-premixed-flames-3-mckenna-burner-stabilised-flames-lii-target-flames>

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ СМЕСЕЙ НАНОАЛЮМИНИЯ С ОКСИДАМИ МЕДИ И ВИСМУТА ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ

Долгобородов А.Ю.^{1,2,3,@}, Кириленко В.Г.², Гришин Л.И.^{1,3},
Бражников М.А.²

¹*Объединенный институт высоких температур РАН*

²*ФИЦ химической физики им. Н.Н.Семенова РАН*

³*НИЯУ МИФИ*

@ aldol@ihed.ras.ru

Приведены результаты экспериментального исследования воспламенения наноразмерных смесей алюминия с оксидами меди и висмута. Смесей готовились по специальной технологии ультразвуковым перемешиванием исходных нано порошков Al (средний размер частиц 100 нм), CuO (80 нм) и Bi_2O_3 (200 нм). Для снижения высокой чувствительности состава Al/ Bi_2O_3 добавлялся флегматизатор (фторопласт Ф42). Иницирование проводилась лазерным излучением на длине волны 808 нм. Плотность мощности излучения на поверхности образцов составляла 310 Вт/см^2 при облучаемой площади $1,1 \text{ мм}^2$, длительность импульса изменялась от 1 до 10 мс. В опытах двухканальным пирометром регистрировалось появление свечения продуктов реакции с облучаемой и тыльной стороны образцов диаметром 6 мм и толщиной $4 \div 9 \text{ мм}$. Определены задержки иницирования t_{ign} , минимальная энергия иницирования E_{cr} и средняя скорость горения в зависимости от плотности и состава образцов. Изучено влияние старения составов на чувствительность к воздействию лазерного импульса. E_{cr} свежеприготовленного состава Al/CuO (19/81) составляла 5 мДж, а при сроках хранения более 14 дней увеличивалась до стабильного значения $E_{cr}=11 \text{ мДж}$ при $t_{ign} = 4 \text{ мс}$. Для Al/ Bi_2O_3 /Ф42 (14/82/4) $E_{cr}=6,5 \text{ мДж}$, $t_{ign} = 2,5 \text{ мс}$. Результаты показали сильную зависимость скорости горения и энергии иницирования от пористости образцов. При пористости образцов около 85% скорости горения достигали 370-440 м/с. На основе анализа пирометрических измерений свечения продуктов сделано предположение о двухстадийном механизме воспламенения нанотермитов при воздействии лазерного излучения.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОКРИТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ-ПАР МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ УДАРНО- СЖАТЫХ ПОРИСТЫХ ОБРАЗЦОВ

Емельянов А.Н.[@], Шахрай Д.В., Ким В.В.

¹*Институт проблем химической физики РАН*

[@]emelyanov@icp.ac.ru

Задача определения положения на фазовой диаграмме границ двухфазной области и критической точки перехода жидкость-пар для металлов привлекает внимание физиков длительное время [1]. Для большинства металлов из-за высоких параметров критической точки по температуре и давлению околокритические состояния можно достигать только с помощью динамических экспериментов. В основном это методы электрического взрыва проводников и метод изоэнтропического расширения ударно-сжатых образцов в динамически более мягкую среду.

В представленной работе были проведены эксперименты по изоэнтропическому расширению ударно-сжатых пористых образцов меди и вольфрама в плоской геометрии. Исследуемые образцы после ударного сжатия расширялись в гелиевую среду с различным начальным давлением (от вакуума до 150 атм.). Излучение от исследуемого образца регистрировалось с помощью оптических пирометров на основе пин-диодов. В экспериментах использовали плоские пористые образцы вольфрама ($m=2.6, 3.1$) и меди ($m=2.3$) (средний размер частиц ~ 10 мкм, $m=\rho/\rho_0$ (ρ_0 - нормальная плотность, ρ - плотность образца)). Образцы представляли собой диски диаметром 15-20мм и толщиной 300-400мкм. Для регистрации электропроводности и оценки плотности металлов после расширения в экспериментальную сборку были введены электроды для контактного измерения электропроводности. В процессе проведения эксперимента через электроды пропускали импульс тока $\sim 9,5$ А и регистрировали падение напряжение на электродах.

Результаты оценки плотности для меди для разных давлений в области входа изоэнтропы в двухфазную область имеет место хорошее согласие с расчетными данными, полученными с помощью одномерного гидродинамического моделирования по методике [2]. Для вольфрама, наоборот, получено сильное различие полученной

оценки плотности из экспериментальных данных и с помощью гидродинамического расчета и уравнения состояния [3]. Это позволило предположить, что в экспериментах по изоэнтропическому расширению ударно-сжатого изначально пористого вольфрама при расширении в околоскритической области фазового перехода жидкость-пар происходит расслоение на две фазы, что существенно меняет характер испарения и параметры критической точки фазового перехода жидкость пар.

[1] Физика неидеальной плазмы, Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т., Москва: Физматлит, 2004.

[2] Ким В.В. Дисс. канд. физ.-мат. наук. Черноголовка, 2005, 131с.

[3] Ломоносов И.В., Фазовые диаграммы и термодинамические свойства металлов при высоких давлениях и температурах. Дис.... док. физ.- мат. Наук, ИПХФ РАН, Москва, 2000. 173с.

КОНВЕКТИВНОЕ ГОРЕНИЕ И ВЗРЫВ В СМЕСЯХ НА ОСНОВЕ ПЕРХЛОРАТА И НИТРАТА АММОНИЯ

Ермолаев Б.С.^{1@}, Худавердиев В.Г.¹, Беляев А.А.¹, Храповский В.Е.¹, Сулимов А.А.¹

¹*ФИЦ Химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва*
[@]*boris.ermolaev44@mail.ru*

Изучены закономерности и механизмы конвективного горения и перехода горения в детонацию в дисперсных смесях окислитель–горючее в широком диапазоне соотношения компонентов, размера частиц и условий горения. Опыты проведены в манометрической бомбе и на удлиненных зарядах, помещаемых в оболочки разной прочности, с одновременной фото- и пьезометрической регистрацией. Исследовались измельченный перхлорат аммония (ПХА) и нитрат аммония (НА) нескольких фракций. В качестве горючего использованы микронные и субмикронные порошки алюминия и древесный уголь. Содержание горючего в смеси изменялось от нуля до 70 %. Варьировались плотность (пористость) заряда, давление от сгорания воспламенителя и длина заряда. Опыты дополнены математическим моделированием. В манометрической бомбе в зависимости от длины заряда и давления воспламенителя наблюдаются медленное послышное горение, конвективное горение или взрыв. Активность конвективного горения оценивалась по максимальному темпу роста давления; пороговая длина заряда, начиная с которой горение заканчивается взрывом, служила мерой опасности взрыва. Получены данные, демонстрирующие влияние содержания горючего, размера частиц компонентов и плотности заряда на активность горения смесей и их склонность к взрыву. Дано объяснение наблюдаемым эффектам: здесь ключевая роль отведена локальной концентрации окисляющих газов в зоне реакции, от величины которой, наряду с размером частиц, зависит скорость горения частиц алюминия. Быстрое горение частиц алюминия, приводящее к взрыву, наблюдается при высокой концентрации окисляющих газов, которая реализуется, например, за счет увеличения поверхности горения частиц окислителя при их измельчении. Смесей ПХА с субмикронным алюминием обладают исключительно высокой склонностью к взрыву. Впервые на зарядах насыпной плотности, помещенных в тонкостенные кварцевые трубки, получен переход горения в нормальную детонацию при мягком поджигании. Переход в детонацию осуществляется через стадию низкоскоростной детонации с образованием вторичной волны.

Работа поддержана проектом РФФИ 20-08-00654.

ИЗУЧЕНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СОСТАВА АЭРОЗОЛЬНЫХ ПОТОКОВ ТОПЛИВНЫХ ЖИДКОСТЕЙ И ВОДЫ В АТМОСФЕРЕ

©Загнитко А.В., Зарецкий Н.П., Мацуков И.Д., Алексеев В.И.,
Вельмакин С.М., Пименов В.В., Сальников С.Е., Федин Д.Ю.,
Меньшиков Л.И., Меньшиков П.Л., Цуриков И.В.
НИИ «Курчатовский институт», г. Москва, РФ
@zagnitko_AV@nrcki.ru; azagnitko@yandex.ru

С целью быстрого и дистанционного исследования крупномасштабных импульсных выбросов топливных жидкостей и воды объемом до 10^4 - 10^7 м³ в атмосфере при моделировании промышленных аварий на объектах топливно-энергетического комплекса разработаны дистанционные сети лазерных анализаторов скорости аэрозольных потоков, поверхностной и массовой концентрации мелких и крупных капель топливных жидкостей (бензин, керосин, мазут, нефть, дизельное топливо) и воды диаметром $d \approx 0.5 - 5000$ мкм. Показано, что быстродействие анализаторов капель и измерителей скорости аэрозольных потоков составляет $\tau = 1$ мс и менее 5 мкс, соответственно, с передачей данных на головной сервер сбора и обработки информации на расстояние до 10 км по оптоволоконному кабелю каждую 1 мс. Диапазон измерения массовой и поверхностной концентрации капель $M = 1-4000$ г/м³ и $S = 1-150$ м²/м³, а оптической плотности выбросов и облаков $D = \lg(I_0/I) = 0.05-3.5$, где I_0 и I – интенсивности лазерного излучения в анализируемом объеме без и в присутствии аэрозолей, соответственно.

Описаны оптические газоанализаторы с $\tau \leq 0.5$ с для детектирования паров топливных жидкостей с их высокоскоростной аспирацией насосом в зону анализа инфракрасных сенсоров. Рабочая температура инфракрасных газоанализаторов составляет $T = (-100)$ - $(+60)$ °С. Диапазон измерения объемной концентрации метана $C = 0.5-99.5$ об.%. Газоанализаторы защищены НЕРА фильтром от проникновения капель в зону сенсорного анализа газов и паров.

Для изучения воздушно-жидкостной системы на начальных стадиях ее расширения разработаны электрические устройства для контроля размеров разлетающихся фрагментов жидкости и анализа кинетики их распада за время около 0.005-0.05 с после осуществления импульсного распыления жидкости. Анализатор размеров с

быстродействием около 1 мс включает две системы тонких, параллельных и перемежающихся электродов в виде сита параллельных струн из вольфрамовой проволоки, включенных в потенциометрическую схему с выходом сигнала на удаленный компьютер и его последующей передачей по оптоволоконному кабелю на головной сервер сбора информации, расположенный на расстоянии более 3 км от места импульсного диспергирования жидкости. Расстояние между струнами варьируется от 3 до 20 мм, а их длина равна 25-40 см. Аналогичное устройство было создано на основе решетки параллельных лучей полупроводниковых лазеров и системы фотоприемников излучения с быстродействием 1 мс для анализа крупных фрагментов жидкостей при импульсном распылении жидкостей, а также измерении грубодисперсных капель осадков капель из облаков.

При анализе экспериментальных данных использовался закон Бугера-Ламберта-Бэра, согласно которому, если интенсивность света, испускаемого источником, равна I_0 , то интенсивность I света, уловленного приёмником, зависит от расстояния L между ними по экспоненциальному закону. Показано, дифракционное рассеяние даёт пренебрежимо малый относительный вклад в скорость рассеяния и этим эффектом можно пренебречь. Рассчитаны индикатрисы рассеивания неполяризованных лучей для капель воды, керосина, бензина и дизельного топлива. Рассмотрен случай полного и изотропного отражения лучей от капли. Этот случай представляет собой противоположный предел по отношению к приближению малых углов рассеяния. Установлено, что сечение рассеяния луча на капле равно её геометрическому сечению $\pi d^2/4$. Вследствие малости телесного угла, под которым детектор виден из основного объёма оптической зоны анализа, вкладом перерассеянных фотонов в измеряемый сигнал можно пренебречь. Установлено, что формула Бугера-Ламберта-Бэра применима во всех произведённых опытах. Кроме того, рассчитан коэффициент поглощения излучения каплями методом Монте-Карло. Показано, что сечение рассеяния фотонов оказывается близко к её геометрическому сечению.

Разработанная сеть лазерных анализаторов капель и газоанализаторов была использована при проведении крупномасштабных экспериментов, связанных с моделированием аварий при импульсном распылении топливных жидкостей массой до нескольких сотен тонн в атмосферу. Измерены поверхностная и

массовая концентрация капель диаметром от 0.5 до 5000 мкм, интенсивность их осадков из топливных выбросов. Установлены кинетические особенности развития высокоскоростных ($\geq 50-300$ м/с) и оптически плотных затопленных двухфазных струй длиной и объемом более 100 м и 10^4 м³ в атмосфере.

Данная работа выполнена по теме: «Разработка физико-технических основ методов измерения параметров аэрозольных и парогазовых облаков, возникающих при крупномасштабных авариях на объектах ТЭК и создание экспериментальных образцов систем диагностики аэрозольных облаков согласно приказу №1859 от 21.09.2020».

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВОЛНЫ УДАРНОГО СЖАТИЯ В СРЕДЕ С ЗАДАННОЙ ПОРИСТОСТЬЮ

Зиборов В.С., Ростилев Т.А.

Объединённый институт высоких температур РАН

@ ziborov.vs@yandex.ru

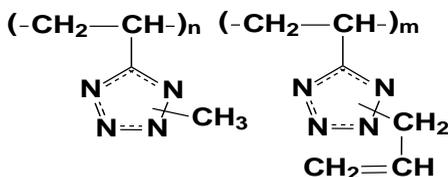
Свойства волны ударного сжатия при распространении в эпоксидном компаунде, содержащем полые микросферы из стекла, исследованы экспериментально в диапазоне давлений существования двух волновой конфигурации фронта. В качестве ускорителей плоских ударников из алюминиевого сплава Д16Т использована пороховая пушка калибром 57 мм. Метод лазерной интерферометрии применён для измерений скорости свободной поверхности образцов при выходе на неё волны ударного сжатия. Получены профили скорости образцов из эпоксидного компаунда, содержащего полые стеклянные микросферы Средний диаметр микросфер 83 мкм, содержание в образцах – 1/1 и 1/3 объёмных долей. Диапазон давлений ударного сжатия 0.3 – 1.3 ГПа.

Получена зависимость наибольшего градиента скорости фронта первичной волны от давления ударного сжатия для образцов, различающихся по содержанию пор. Установлено, что наибольший градиент скорости фронта волны ударного сжатия тем выше, чем меньше объёмная доля стеклянных микросфер. Наибольшее различие наблюдается при малых давлениях сжатия и уменьшается с ростом давления, исчезает при $P > 1.3$ ГПа, Определены степенные показатели зависимости наибольшего градиента скорости фронта для первичной и основной волны..

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГОРЕНИЯ И АГЛОМЕРАЦИИ АЛЮМИНИЯ В ПОТОКЕ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ АЗОЛОВОГО СВЯЗУЮЩЕГО И ЦИКЛИЧЕСКИХ НИТРАМИНОВ

Калмыков П.И., Лебедев А.С., Певченко Б.В., Попенко Е.М.
 АО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск, Россия
post@frpc.secna.ru, alpineclub@mail.ru

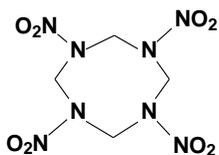
В современных высокоэнергетических материалах (ВЭМ) широко используются полимерные связующие, способные к самостоятельному горению, а также высокоэнергоёмкие циклические нитрамины – НМХ, ВСО, HNIW и другие, регулирование параметров горения которых является актуальной задачей [1,2]. Известные катализаторы горения не эффективны в композициях с высоким содержанием окислителей. Поэтому в данной работе скорость горения ВЭМ (U^T) регулировали за счет использования композиционных тетразолсодержащих горючих связующих (ГСВ) МРVT-АМР с нитропластификаторами различной химической природы, изменения дисперсности и содержания нитраминов, варьирования размера частиц металлического горючего. Показано, что скорость горения является основным фактором, определяющим интенсивность процесса агломерации металлического горючего на поверхности горения ВЭМ, а приведенные способы регулирования U^T в различной степени влияют на процесс образования агломератов в потоке продуктов сгорания.



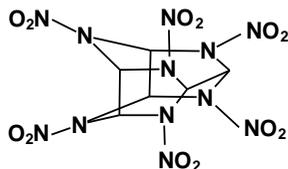
МРVT-А

Целью настоящей работы являлось установление возможных диапазонов регулирования U^T и барического показателя (ν) в законе горения ВЭМ на основе высокоэнтальпийного карбоцепного поли-N-метилаллил-5-винилтетразола (МРVT-А) с высоким содержанием азота до 51%, повышенной энтальпией образования и плотностью, алюминия различной дисперсности и циклических нитраминов (НМХ,

HNIW) с применением указанных методов и оценка их влияния на агломерацию металла.



HMX



HNIW

Для компоновки композиционных азоловых ГСВ MPVT-AMP были использованы следующие соединения: сополимер MPVT-A и смесевые пластификаторы эвтектического типа на основе нитроэфиров (НГЦ, ДНДЭГ, ДНТЭГ, ДНПГ) [3], низкоплавких нитрамин (ДНП, ДИНА, НАПН) и нитротриазолов (1-Этил-3Н, 1-НЭЭЭ-3Н),

На их основе разработаны четыре класса композиционных азоловых ГСВ MPVT-AMP: 1 – нитроэфирные (НЭ); 2 – нитрамино-нитроэфирные (НАНЭ); 3 – нитраминные (НА); 4 – нитротриазольные (НТ) для перспективных ВЭМ различного назначения.

Установлено, что (U^T) азоловых композиций ВЭМ с различным типом пластификатора определяется скоростью горения соответствующего ГСВ ($U^{ГСВ}$), а изменение состава энергонасыщенных пластификаторов является эффективным способом регулирования баллистических характеристик ВЭМ на их основе. При изменении химического состава пластификатора в ГСВ получены следующие уровни U_7^T ВЭМ при $P=7$ МПа: НЭ – от 11,6 до 13,5 мм/с; НАНЭ – от 11,5 до 13,8 мм/с; НА и НТ – от 8,9 до 10,9 мм/с.

Показано, что скорость горения возрастает с увеличением размера частиц циклических нитраминов, а также с ростом содержания HMX и HNIW.

Зависимость скорости горения композиций ВЭМ от дисперсности алюминия носит экстремальный характер с минимальным значением $U_7=12,8$ мм/с при использовании марки АСД-6ТО. Использование порошков алюминия различной дисперсности позволяет регулировать скорость горения азоловых ВЭМ в диапазоне от 12,8 до 20,4 мм/с при $P=7$ МПа.

[1] Калмыков П.И. и др., 2011, БП и ВЭКС. **2.** 36-42.

[2] Синдицкий В.П. и др., 2012. ФГВ. **48.** 2. 45–59.

[3] Лотменцев Ю.М. и др., 2009. БП и ВЭКС. **2.** 2–5.

СВС МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ Ti-Ta-Ni-КЕРАМИКА

Камынина О.К.[@], Вадченко С.Г., Шкодич Н.Ф., Петров Е.В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук, г. Черноголовка,
Россия
@ sci-secretary@ism.ac.ru*

В настоящее время существует большое количество работ, в которых изучено получение многослойных материалов, чередующих слои керамики и металлов, и исследованы процессы формирования этих соединений [1, 2]. Структурированные материалы, состоящие из слоев, с градиентом по составу и пористости, и материалы с многослойными покрытиями обладают хорошими эксплуатационными свойствами при высоких температурах, абразивном износе, в агрессивных средах и т.д. Целью данного исследования было получение в режиме горения многослойного материала Ti-Ta-Ni-керамика, предварительно структурированного из металлических фольг и реакционных лент. Выбор слоев структурированного материала основывался на результатах предыдущих исследований с учетом температур плавления металлических фольг и температуры горения реакционных лент. [3, 4].

Экспериментальные образцы формировали чередованием металлических фольг и керамических лент в следующей последовательности – Ti-Ta-(Ti+0.65C)-Ni-(Ti+1.7B)-(Ti+1.7B)-Ta-Ni-Ti.

Синтез проводили в реакционной камере в среде аргона при атмосферном давлении. К образцам, помещенным между нагревательными пластинами, прикладывалась нагрузка ~ 69 кПа. Образцы предварительно нагревались со скоростью 60 град/мин до температуры 530±30°C, не достигая температуры самовоспламенения. При достижении заданного значения нагреватели отключали. Реакция инициировалась раскаленной вольфрамовой спиралью с торца образца. Контроль температуры осуществлялся тремя термopарами WR5/WR20, сигнал с которых через аналого-цифровой преобразователь записывали на компьютер с частотой 1 кГц. Эксперименты регистрировались видеокамерой MIRO M310 с частотой 5000 кадров в секунду.

В результате проведенных экспериментов показано, что за 0,2 секунды в условиях СВС формируются легкие, тонкие композиционные материалы (толщиной 1,5 мм) на основе соединения титана-тантала-керамики. Благодаря высокотемпературным реакциям в слоях, образующих керамику, удалось соединить титан и тантал. Для соединения титана и тантала использовались высокоэнергетические реакционные системы на основе смесей титана-углерода и титана-бора. Покадровый анализ скоростной видеосъемки позволил определить скорости распространения волны горения (195 мм/с). При этом, высокотемпературная керамика на основе соединений углерода и бора позволила существенно уменьшить вес материалов, сохранив свойства слоев (тугоплавкость, жаростойкость, коррозионную стойкость).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00594_а.

- [1] Martinsen K., 2015, CIRP Annals. **64**(2). 679–99.
- [2] Rogachev A.S., 2018, Adv. Eng. Mater. **20**(8). 1701044–51
- [3] Камынина О.К., 2016, Int. Jour. of SHS. **25**(4). 238-42.
- [4] Камынина О.К., 2019, Rus. Jour. of NFM. **60**(4). 422-25

ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В РАСХОДЯЩЕМСЯ ПЛАМЕНИ

Киверин А.Д.^{1,@}, Яковенко И.С.¹

¹Объединенный Институт Высоких Температур РАН

@ alexeykiverin@gmail.com

Работа посвящена решению задачи о свободном распространении пламени в высокоактивной газообразной смеси. Численный анализ эксперимента по горению эквимоларной водород-кислородной смеси при повышенном давлении в постановке [1] показал, что переход горения в детонацию (ПГД) при свободном распространении пламени является прямым следствием особенностей развития фронта пламени. В частности, рождение и рост возмущений поверхности фронта с критической длиной волны [2] определяет локальное ускорение пламени и генерацию ударных волн от ускоряющихся участков фронта. При этом частота рождения возмущений с критической длиной волны тем выше, чем выше активность горючей смеси, а взаимодействие расходящихся ударных волн с соседними участками фронта пламени интенсифицирует рост возмущений по механизму возбуждения термоакустической неустойчивости [3]. В результате, экспоненциально растущее возмущение поверхности фронта совместно с генерируемой ударной волной становятся источником локального инициирования детонации. Интерференция детонационных фронтов от разнесенных источников на поверхности фронта пламени формирует фронт расходящейся детонационной волны. Таким образом, в настоящей работе предложен механизм ПГД в расходящемся пламени, а проведенный дополнительный анализ показал, что условия развития ПГД по такому сценарию выполнимы только в случае очень высокоактивных газообразных смесей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-38-20079

[1] Зельдович Я.Б., Розловский А.И., 1947, ДАН СССР, **57(4)**, 365-8

[2] Гостинцев Ю.А. и др., 1988, ФГВ, **5**, 63-70

[3] Nicoud F., Poinsot T., 2005, Comb. Flame. **142(1)**, 153-9

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ В ГОРЮЧИЙ ГАЗ МЕТОДОМ ПАРЦИАЛЬНОГО ОКИСЛЕНИЯ

Кислов В.М.¹ @, Глазов С.В.¹, Цветкова Ю.Ю.¹, Пилипенко Е.Н.¹,
Салганская М.В.^{1,2}

¹ *Институт проблем химической физики РАН*

² *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*
@ vmkislov@icp.ac.ru

Эффективность использования низкосортных твердых топлив может быть увеличена путем превращения их в газообразные продукты, более удобные для промышленного использования. Преобразование твердого топлива в горючий газ (газификация) может осуществляться путем неполного окисления органической массы топлива различными газообразными окислителями (воздух, кислород, водяной пар, углекислота).

При газификации твердых топлив органического происхождения в режиме фильтрационного горения со сверхadiaбатическим разогревом образующийся продукт-газ содержит не только горючие газообразные вещества (главным образом, CO, H₂), но и заметное количество органических жидких продуктов термического разложения твердых топлив (пиролизных смол). Из-за способности конденсироваться смолы представляют угрозу для турбин и двигателей, так как могут замедлять или полностью блокировать их работу, снижая КПД процесса. Поиск методов конверсии низкокачественного продукт-газа с высоким содержанием смол в бессмольный синтез-газ, который может быть использован как для выработки электроэнергии, так и в качестве исходного материала для получения химических продуктов является весьма актуальной задачей.

Эксперименты проводили в установке, состоящей из газификатора диаметром 115 мм и конвертора диаметром 45 мм. Результаты экспериментальных исследований термической конверсии продуктов фильтрационного горения сопоставляли с результатами термодинамических расчетов. Расчеты показывают, что минимально необходимый расход воздуха, при котором происходит полная конверсия аэрозоля в горючий газ соответствует примерно коэффициенту избытка воздуха $J = 0.45$ ($J = 1$ – полное сгорание). С увеличением расхода воздуха до $J = 0.67$ происходит окисление горючих газообразных компонентов, содержание CO снижается с 12.8

до 8.6%, а H_2 с 9.1 до 2.8%, за счет чего температура конверсии увеличивается с 1172 до 1544°C.

Эксперименты показали качественно схожие результаты. С увеличением количества подаваемого на конверсию воздуха от 0 до $J=0.8$ содержание CO и H_2 в продуктах снижается (CO примерно с 30 до 11% и H_2 – с 3.5 до 0.5%), а CO_2 – растет примерно с 11 до 18%. В экспериментах содержание CO было несколько выше, а водорода примерно в два раза ниже, чем в расчетах. Температура конверсии была на 400–500°C ниже расчетной (740°C при $J=0.3$ и 1030°C при $J=0.8$), а при полном сгорании аэрозоля ($J=1$) составляла всего 1140°C. В расчетах предполагалась полная конверсия смол пиролиза при $J \geq 0.45$. В экспериментах высокую степень конверсии (до 100%) наблюдали только при $J=0.8$ ($Q_{\text{газ}} = 1-2$ МДж/м³). Достаточно высокая степень конверсии (80%) при относительно высокой для данного случая теплоте сгорания газообразных продуктов конверсии (от 2.5 до 4.0 МДж/м³) достигается при расходе воздуха, соответствующем коэффициенту избытка воздуха $J=0.5$.

Выполненная работа показала перспективность окислительной конверсии пиролизных смол, содержащихся в продуктах газификации твердых топлив, в горючий газ. Для достижения лучших результатов необходима детальная оптимизация работы конвертора.

Работа выполнена по теме Государственного задания, № государственной регистрации АААА-А19-119022690098-3 (тема 0089-2019-0018) и при финансовой поддержке РФФИ (17-03-00058).

ЗАЖИГАНИЕ И ГОРЕНИЕ ВЭМ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ, БОРА И ТИТАНА

Коротких А.Г.^{1,2,@}, Сорокин И.В.¹

¹*Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

²*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

@korotkikh@tpu.ru

Порошки бора и боридов металлов являются одними из наиболее перспективных компонентов гибридного и твердого ракетных топлив за счет их высокой удельной энергии при окислении в процессе горения систем.

В работе использовались образцы высокоэнергетических материалов (ВЭМ) на основе перхлората и нитрата аммония, горючего-связующего, содержащие порошки алюминия Al (базовый состав), аморфного бора В и боридов алюминия AlB₂, AlB₁₂. В ходе исследования получены основные параметры термического разложения, зажигания и горения исследуемых образцов ВЭМ с использованием термического анализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter, непрерывного СО₂-лазера максимальной мощностью 200 Вт с длиной волны 10.6 мкм и диаметром луча 10 мм, бомбы постоянного давления.

ТГ-ДСК анализ показал, что при нагреве в воздухе с постоянной скоростью 10 °С/мин. окисление порошка аморфного бора осуществляется при более низких значениях температур 560–800 °С с более высоким значением тепловыделения, по сравнению с порошками алюминия Al (свыше 800 °С) и диборида алюминия AlB₂ (свыше 870 °С). Однако при нагреве металлизированных образцов ВЭМ в аргоне температура начала разложения составов не меняется и составляет ~120–400 °С, которая определяется температурой интенсивного разложения полимерного связующего и окислителя.

При лучистом зажигании ВЭМ установлено, что все образцы топлив устойчиво зажигаются в воздухе и времена задержки зажигания ВЭМ, содержащего порошок аморфного бора, в 2.2–2.8 раза меньше (рис. 1) по сравнению с ВЭМ, содержащим Al, в диапазоне плотности теплового потока $q = 90\text{--}200 \text{ Вт/см}^2$. Использование

порошков AlB_2 и AlB_{12} в составе ВЭМ позволяет снизить времена задержки зажигания в 1.7–2.2 раза в указанном диапазоне q по сравнению с базовым составом ВЭМ.

При горении ВЭМ в азоте в диапазоне давлений от 0.5 до 7.0 МПа (рис. 2) максимальная скорость горения топлив получена для ВЭМ, содержащего аморфный бор (в 1.9–2.4 раза выше, чем скорость горения ВЭМ с Al), показатель степени которого в законе скорости горения составляет 0.82. Использование порошков AlB_2 и AlB_{12} в составе ВЭМ приводит к увеличению скорости горения топлив в 1.2–1.4 раза по сравнению с ВЭМ, содержащим Al. При этом степенной показатель равен 0.56–0.60 для указанных составов ВЭМ.

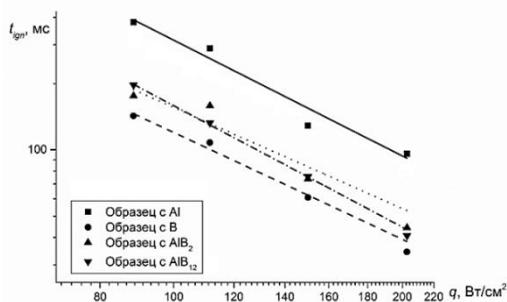


Рис. 1. Время задержки зажигания ВЭМ от плотности теплового потока

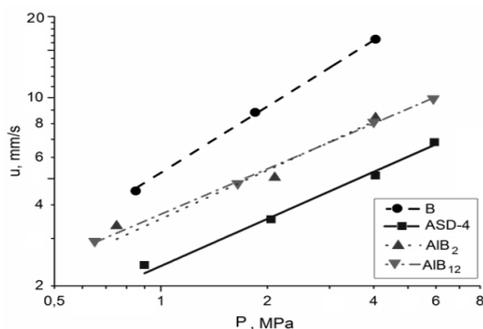


Рис. 2. Скорость горения ВЭМ от давления

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-03-00588.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА ПОЛИАРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ ПИРОЛИЗЕ СМЕСЕЙ БЕНЗОЛА И ДИМЕТИЛОВОГО ЭФИРА ЗА УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Дракон А.В., Еремин А.В., Коршунова М.Р.[@], Михеева Е.Ю.
Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия
[@]mayya_korshunova_95@mail.ru

Изучение процессов роста полиароматических углеводородов (ПАУ), являющихся важным промежуточным звеном на пути образования сажи при горении различных топлив, является весьма актуальной задачей. Активно развиваются модели образования сажи, рост которой, по современным представлениям, происходит за счет химического роста ПАУ и физических процессов их столкновения и слипания [1]. Кроме того, молекулы ПАУ загрязняют окружающую среду и оказывают вред на здоровье человека.

В данной работе впервые применен метод лазерно-индуцированной флюоресценции (ЛИФ) для диагностики ПАУ, образующихся при пиролизе смесей бензола (C_6H_6) и диметилового эфира (ДМЭ) за отраженными ударными волнами (ОУВ). Данные измерения носят качественный характер, поскольку ПАУ имеют широкие спектры ЛИФ, что приводит к перекрытию сигналов от разных компонент. Преимуществом измерений в условиях ударно-трубного эксперимента является возможность варьирования температуры в широком диапазоне, что актуально, поскольку данных по спектральным характеристикам ПАУ и кинетике их роста при высоких температурах недостаточно [2]. Для возбуждения флюоресценции ПАУ использовался Nd:YAG лазер на длине волны 266 нм с длительностью импульса 12 нс и плотностью энергии 35 мДж/см². Регистрация спектра излучения производилась с помощью монохроматора АСТОН SP150 и оптической ICCD камеры Andor iStar. Сигнал ЛИФ регистрировался в течение 150 нс после импульса лазера. Измерения проводились при разных временных задержках относительно момента прохождения фронта ОУВ: 150, 650, 1150 мкс. Для контроля начала появления конденсированной фазы использовался метод лазерной экстинкции. Излучение от HeNe лазера, проходящее через окна исследовательского сечения, фокусировалось на фотодетектор PDA10A-ES, который был оптически защищен интерференционным светофильтром на 632,8 нм для подавления теплового излучения от реагирующей смеси.

Были проведены эксперименты в температурном диапазоне $T_5 = 1300-2020$ К со смесями: $1\%C_6H_6 + 99\%Ar$, $5\%DMЭ + 95\%Ar$ и $1\%C_6H_6 + 5\%DMЭ + 94\%Ar$. Получены спектральные зависимости ЛИФ ПАУ при пиролизе исследованных смесей в диапазоне температур для чистой смеси C_6H_6 1350-1800 К, для чистой смеси $DMЭ$ 1300-2000 К, для смеси $1\%C_6H_6 + 5\%DMЭ$ 1420-2020 К при разных задержках 150, 650 и 1150 мкс относительно фронта ОУВ. При температурах выше 2000 К измерениям ЛИФ препятствовали образующиеся углеродные наночастицы. Из анализа спектральных зависимостей полученных сигналов ЛИФ видно, что с увеличением температуры и задержки относительно ОУВ максимум спектральной зависимости сдвигается в сторону больших длин волн, что может свидетельствовать об образовании соединений более крупных ПАУ. При пиролизе бензола спектральные измерения ЛИФ ПАУ в моменты времени 650 мкс и 1150 мкс имеют ограничение из-за возникновения теплового излучения от конденсированных частиц при $T_5 > 1600$ К. В момент времени 150 мкс в данной смеси наблюдается образование более легких ПАУ. При пиролизе $DMЭ$ при увеличении задержки относительно ОУВ и увеличении температуры не происходит сильного сдвига спектра ЛИФ, что свидетельствует об образовании соединений только из 2-3 ароматических колец. Добавка диметилового эфира к бензолу приводит к сдвигу в область более коротких длин волн и увеличению амплитуды сигнала ЛИФ.

Кинетическое моделирование было проведено с использованием детального газофазного механизма пиролиза и окисления широкого спектра углеводородных топлив, включая образование ПАУ до C_{160} и углеродных наночастиц [3] в программе *Open SMOKE++* [4]. Тяжелые ПАУ и наночастицы разных размеров делятся на 20 псевдоклассов, масса которых удваивается от одного класса к другому. Каждый класс включает фиксированное количество атомов углерода и водорода [3]. Получены расчетные временные профили мольных долей многих классов ПАУ для разных температур. Совместный анализ расчетов и экспериментальных данных показывает, что в каждый момент времени относительный вклад в суммарный сигнал ЛИФ могут вносить разнообразие классы ПАУ.

- [1] H. Wang, Proc. of the Comb. Inst., 33, 2011, 41-67.
- [2] P. Desgroux, Proc. of the Comb. Inst., 34, 2013, 1713-1738.
- [3] C. Suggest et al, Comb. and Fl. 162, 2015, 3356-3369.
- [4] A. Cuoci et al, Comp Phys Commun, 192, 2015, p. 237-264.

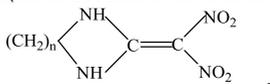
Механизм термоллиза 1,1-диамино-2,2-динитроэтилена (FOX-7)

Крисюк Б. Э.[®], Дубихин В.В.

*Институт проблем химической физики РАН. Черноголовка,
Московская область.*

[®] *bkris@mail.ru*

Работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию механизма термоллиза 1,1-диамино-2,2-динитроэтилена (ДАДНЭ, FOX-7) [1] и его циклических гомологов [2]:



где n – количество CH_2 -групп, которое в изученных гомологах равно 2 (соединение **II**), 3 (соединение **III**) или 4 (соединение **IV**).

Расчеты проводили на многопроцессорном кластере в вычислительном центре ИПХФ РАН с помощью программ GAUSSIAN 09 методом DFT с гибридным функционалом PBE0/сс-pVDZ и методом связанных кластеров CCSD(T)/aug-сс-pVDZ. Исследование кинетики термического разложения растворов энергоемких соединений в кристаллическом состоянии и в высококипящих растворителях проведено на манометрической установке, рассчитанной на работу при высоких давлениях и состоящей из стеклянного сосуда, чувствительной мембраны и камеры компенсации давления, выполненной из металла [3]. Измерения проводили в изотермическом режиме при 170 – 250⁰С в нитробензоле.

Температурная зависимость начальной скорости термоллиза хорошо описывается уравнением Аррениуса (рис.1), параметры приведены в табл.1. Методами квантовой химии рассчитывали кинетические параметры следующих каналов термоллиза: 1.Отрыв нитрогруппы; 2. Нитро-нитритная изомеризация; 3. Перенос атома водорода на углерод; 4. Перенос атома кислорода на углерод; 5. Перенос атома водорода на кислород нитрогруппы.

В ряду I – IV только для переноса водорода на углерод наблюдается аналогичная экспериментальной константы скорости от структуры (табл.1). Из данных рис.1 и табл.1 следует, что наиболее устойчивым соединением является **II**, затем следует **I**, и потом **III** и **IV**, причем два последних близки между собой. Именно такой порядок изменения и в расчетных значениях E_a .

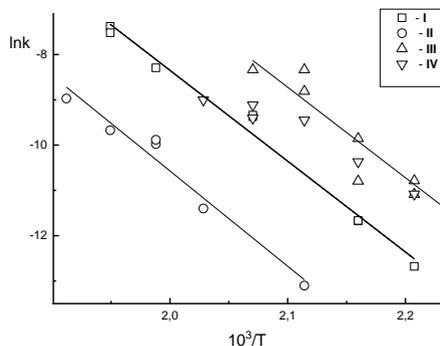


Рис.1

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные параметры уравнения Аррениуса: (1) - PBE0/сс-pVDZ; (2) - CCSD(T)/aug-сс-pVDZ

Соед.	Эксперим.			Расчет		
	Диапазон температур	lgA	E_a	lgA	E_a (1)	E_a (2)
I	180-240	13,79	171	13,32	200	186
II	200-250	13,69	175	13,79	229	218
III	170-210	12,41	140	-	193	162
IV	170-220	-	-	-	184	170

Экспериментальные результаты практически совпадают с расчетными для реакции переноса водорода (расчетные значения предэкспонента $lgA = 13,3 - 13,7$), что подтверждает преобладание данного пути реакции.

[1] Latypov N.V., Bergman J., Langlet A., Wellmar U., Bemm U. 1998, Tetrahedron. **54**, 11525.

[2] Baum K., Bigelow S.S., Nguyen N.V., Archibald T., Gilardi R., Flippen-Anderson J.L., George C. *J. Org. Chem.* 1992, **57**, 235-241

[3] Дубихин В.В., Галюк О.С., Яновский Л.С., Варламова Н.И., Казаков А.И., Молоканов А.А. Патент № 2707986 Рос. Федерация // Б.И. 2019. № 34.

[4] Kiselev V. G., Gritsan N. P. 2014, J. Phys. Chem. A. **118**, 8002–8008.

Работа поддержана проектом РФФИ №17-03-00058

УСТОЙЧИВОСТЬ ПЕРЕХОДА БЕЗГАЗОВОЙ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ ЧЕРЕЗ КЛИНООБРАЗНУЮ ИНЕРТНУЮ ПРЕГРАДУ.

Кришеник П.М., Костин С.В., Рогачев С.А.

*Институт структурной макрокинетики и проблем
материаловедения им.А.Г.Мерджанова РАН*

petr@ism.ac.ru

В работе численными и экспериментальными методами исследована устойчивость перехода безгазовой волны горения через фигурную инертную преграду. Целью работы являлось исследование распространения неадиабатической волны горения по слоевой системе, состоящей из реагирующих безгазовых конденсированных слоёв, разделенных внедренной инертной преградой, имеющей клинообразную форму. Была показана возможность оптимизации процесса горения малогазовых слоевых систем за счёт аккумуляции тепла на границе контакта слоёв в процессе перехода.

Переходной процесс горения с помощью двумерной математической модели исследовался в области параметров, соответствующих устойчивому распространению плоского фронта в безгазовых системах. На рис. 1

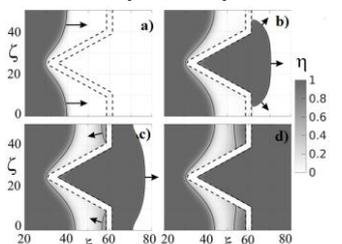


Рисунок 1

представлены поля глубины превращения формирующиеся при переходе горения через клинообразную преграду при докритических значениях теплотеря. Горение распространялось от одного безгазового слоя к другому. При достижении плоским фронтом острия клина происходит перестройка его структуры. Форма преграды определяет направление вектора теплового потока от раскаленных продуктов горения в поджигаемую область за преградой. Аккумуляция тепловой энергии в области острия клина стимулирует индукционный прогрев вещества в клине и его воспламенение. После достижения фронтом горения острия клина (рис.1 a,b) интенсивный теплоперенос из зоны реакции и продуктов горения за инертную преграду приводит к воспламенению слоя в области острия клина. После выхода горения из клина происходит перестройка структуры фронта (рис.1 b,c,d). Стрелками указано направление распространения горения в поджигаемом слое. В воспламенительном слое возобновляется горение, формируется

встречный фронт. Завершающий этап переходного процесса – выход горения в поджигаемом слое на стационарный режим. Численным анализом получено, что существует оптимальное значение отношения основания клина к ширине слоя, при котором реализуется устойчивый переходной процесс.

Экспериментально исследован переход горения слоя порошка на основе железо-титанового термита через ленточную клинообразную преграду. Целью эксперимента являлась демонстрация осуществимости идеи аккумуляции энергии на границе слоёв для устойчивого инициирования горения в трудно поджигаемом составе с реальными энерго-кинетическими параметрами и структурой. В качестве модельного воспламенительного состава применялся хромово-алюминиевый термит – смесь оксида хрома с порошком алюминия. Поджигались смеси железо-титанового термита с диоксидом титана отличающиеся между собой только процентным содержанием компонент. Зажигание хромово-алюминиевого термита осуществлялось около его торца электрической спиралью с керамическим сердечником (см. рис. 2).

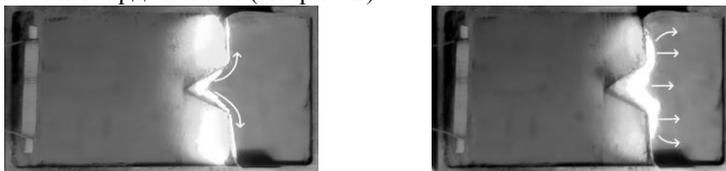


Рис.2. Процесс перехода горения через клиновидную преграду.

Выбранные смеси на основе железо-титанового термита не загорались хромово-алюминиевым термитом через уплощённую (плоскую) ленточную преграду. Однако использование клинообразной преграды приводило к тому, что термитные смеси загорались

Выводы: Аккумуляция тепловой энергии с использованием особой конфигурации слоёв клиновидного типа может применяться в безгазовых слоевых системах для оптимизации переходных процессов горения плоских образцов, для увеличения их устойчивости к теплотерям во внешнюю среду. Проведенный эксперимент и численный анализ выявил зависимость параметрической области устойчивого перехода горения через инертную преграду от её геометрических характеристик. Полученные результаты могут быть использованы как при проектировании СВС сложных систем, так и для анализа устойчивости волны горения при переходе через границу раздела гетерогенных систем в системах пироавтоматики.

Работа поддержана проектом 16-03-00874 РФФИ.

МНОГОФРОНТОВАЯ СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН: ОТ ЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ УСТОЙЧИВОСТИ ДО ТРЕХМЕРНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Борисов С. П.¹, Кудрявцев А. Н.^{1,2}

¹ ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск

² НГУ, г. Новосибирск

Известно, что детонационная волна (ДВ) имеет сложную нестационарную самоподдерживающуюся многофронтную структуру, образование которой связано с неустойчивостью плоской ДВ по отношению к поперечным возмущениям. Анализ линейной устойчивости ДВ, распространяющейся в плоском канале прямоугольного сечения, приводит к определенным предсказаниям относительно характеристик формирующейся многофронтной детонации [1].

В настоящей работе связь теории устойчивости с формированием ячеистой структуры ДВ исследуется с помощью прямого численного моделирования. Развитие одномерной галопирующей неустойчивости моделируется с помощью численной схемы, использующей выделение фронта ударной волны и компактные разности высокого порядка для аппроксимации пространственных производных. Для численного моделирования процесса формирования детонационных ячеек в двумерном плоском канале и в трехмерном канале прямоугольного сечения уравнения Эйлера для химически реагирующего газа решаются с помощью WENO схемы сквозного счёта пятого порядка точности. При проведении многомерных расчетов использовалось до 80 ядер вычислительного кластера.

В одномерных расчётах продемонстрировано полное согласие расчетных данных с предсказаниями линейной теории на ранних стадиях развития неустойчивости, изучена эволюция возмущений на более поздних нелинейных стадиях в зависимости от параметров задачи.

В двумерных расчетах определялся преобладающий размер и количество детонационных ячеек, укладываемых поперек канала. Расчеты показывают, что во время ранней стадии развития неустойчивости число образующихся ячеек хорошо согласуется с предсказаниями линейной теории. Позже, однако, нелинейные эффекты приводят к «спариванию» детонационных ячеек и уменьшению их числа примерно в два раза.

В проведенных трехмерных расчетах распространения ДВ в канале прямоугольного сечения были изучены два различных типа образующейся пространственной структуры фронта детонации («прямоугольная» и «диагональная» моды) и спонтанный переход от одного типа к другому. Выполнено сравнение результатов двумерных и трехмерных расчетов, обнаружены существенные отличия в параметрах двумерной и трехмерной детонации, в частности в величине максимального давления.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-33-00740 и 16-57-48007.

Список литературы

1. S.P. Borisov and A.N. Kudryavtsev. J. Phys.: Conf. Ser. **722**, 2016, 012022

ПОСТУПАТЕЛЬНАЯ НЕРАВНОВЕСНОСТЬ И ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДОБАВОК КСЕНОНА НА ПОРОГ ДЕТОНАЦИИ СМЕСЕЙ O_2 - H_2 - He и H_2 -ВОЗДУХ

Куликов С.В.[@], Терновая О.Н., Червонная Н.А.

Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия

[@] kuls@icp.ac.ru

Последние годы ведутся исследования влияния поступательной неравновесности во фронте на физико-химические процессы за ударной волной. В конце 70 годов прошлого века были сформулированы физические предпосылки возникновения сильного эффекта поступательной неравновесности во фронте УВ для смесей, состоящих из основного легкого газа и двух тяжелых примесей, заметно отличающиеся по молекулярной массе между собой [1]. Фронтом ударной волны полагается пространственная зона между холодным и ударно нагретым газом, где распределения молекул по скоростям отличаются от максвелловских. Затем в 90-х годах прошлого века было проведено детальное численное исследование поступательной неравновесности во фронте ударной волны для газовой смеси двух малых тяжёлых примесей, заметно различающихся между собой по массе, и легкого основного газа [2]. При моделировании использовался метод Монте-Карло нестационарного статистического моделирования (ММКНСМ). В англоязычной литературе он известен, как direct simulation Monte Carlo (DSMC) [3]. Оказалось, что распределение по относительным скоростям (g) пар молекул, состоящих из двух тяжелых примесей, заметно отличающихся по молекулярной массе между собой, в узкой зоне фронта может на несколько порядков (вплоть до 11) превосходить при больших g равновесное значение распределения за волной

Научный интерес к данной проблеме обусловлен возможной перспективностью использования эффектов поступательной неравновесности для практических приложений, прежде всего – для управления воспламенением и детонацией за ударной волной в горючих смесях. Одной из интересных в этом отношении горючих смесей является система $H_2 + O_2$, которая довольно широко применяется в реальности.

Изучалось на ударной трубе влияние малой добавки тяжёлого газа Xe на условия возникновения детонации в падающей ударной волне при изменении интенсивности волны [4, 5] для смесей $10\%H_2 + 5\%O_2 + (84-x)\%He + x\%Xe$ ($x = 0; 0.25; 0.5$). В этих смесях при $x = 0.25$

и $x = 0.5$ O_2 и Хе являются двумя тяжелыми примесями, заметно отличающимися по молекулярной массе между собой, а Не и H_2 легкими газами. Небольшая добавка Хе приводила к смещению порога детонации в область более слабых начальных ударных волн. Согласно проведенным численным исследованиям данный эффект является следствием возникновения специфической поступательной неравновесности во фронте волны и обусловлен сильным повышением частоты высокоэнергетических столкновений молекул O_2 и Хе во фронте по сравнению с равновесием за волной. Это вероятно приводит к ускорению химического взаимодействия O_2 и H_2 за фронтом.

Кроме того, численное изучение распределений пар молекул O_2 и Хе во фронте ударной волны [6] показало возможность усиления данного эффекта при уменьшении концентрации Хе с 0.5 до 0.25%. Проведенные эксперименты [5] это подтвердили. Оказалось, что для смеси с 0.25% Хе порог детонации смещается сильнее в область более слабых ударных волн, чем для смеси с 0.5% Хе. Данный факт немонокотного смещения не оставляет никаких сомнений в том, что этот эффект обусловлен спецификой поступательной неравновесности во фронте волны и больше ни с чем не связан.

Недавно было экспериментально исследовано влияние малой добавки Хе на условия возникновения детонации в падающей ударной волне при изменении интенсивности начальной волны для смесей $(75-x)\%N_2 + 25\%воздух + x\%Хе$ ($x = 0; 0.25; 0.5$). Постановка представленного исследования по сравнению предыдущими [4, 5] гораздо ближе к условиям аварийных ситуаций на АЭС, где при нештатных случаях в воздушную атмосферу машинного зала может выделяться в малом количестве Хе и в большом - H_2 . Как и ранее небольшая добавка тяжёлого газа ксенона, приводила к смещению порога детонации в область более слабых ударных волн. И этот эффект, как и ранее, более силён для $x = 0.25$, т.е. является немонокотным относительно концентрации Хе. Это снова свидетельствует о том, причиной такого поведения является поступательная неравновесность во фронте несмотря на то, что в отличие от [4, 5] основным легким газом является не Не, а H_2 , имеющий вращательные и колебательные степени свободы, а смесь умеренно тяжёлых газов (O_2 и N_2) имеет значительно большую концентрацию. Следовательно, для проявления данного эффекта достаточно чтобы только очень тяжёлая примесь была в очень малом количестве. А вторая менее тяжёлая примесь может иметь гораздо большую концентрацию.

Работа выполнена по темам Государственных заданий, № гос. Регистрации: 0089-2014-0018 и 0089-2019-0017.

[1] Зельдович Я.Б., Генич А.П., Манелис Г.Б., 1979, Док. Акад. Наук СССР. 248. 349-351

[2] Куликов С.В., 1997, Мех. жид. и газа. Изв. Акад. Наук. №4. 171-178

[3] Берд Г., Молекулярная газовая динамика, Мир, Москва, 1981, 319 с.

[4] Куликов С.В., Манелис Г.Б., 2002 Докл. Акад. Наук. 382. 641-644.

[5] Куликов С.В., Червонная Н.А., 2018 Хим. физика. 37. 66-70.

[6] Куликов С.В., Манелис Г.Б., Терновая О.Н., 2007 Хим. физика. 26. 73-76.

О ВЛИЯНИИ ПОРИСТОСТИ НА ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ АММИАЧНОСЕЛИТРЕННЫХ ВВ

Лавров В.В.^{1,2,@}, Михайлов А.В.³, Комиссаров П.В.⁴

¹ *ФГБУН Институт проблем химической физики РАН,
г. Черноголовка, Россия*

² *ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
РАН, г. Москва, Россия*

³ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, Россия*

⁴ *ФГБУН ФИЦ Химической физики им. Н.Н. Семенова
РАН, г. Москва, Россия*

@ lavr@icp.ac.ru

Нитрат аммония и его смеси, производящиеся миллионами тонн в год по всему миру, в том числе и в России, широко применяются в качестве промышленных ВВ и минеральных удобрений. Так же велико использование взрывчатых смесей на основе нитрата аммония в террористических целях.

Смеси нитрата аммония с горючими добавками, не являющимися индивидуальными взрывчатыми веществами (ВВ), относятся к ВВ группы II и считаются неидеальными взрывчатыми веществами. Они обладают рядом отличительных свойств относительно штатных ВВ военного назначения, и остаются недостаточно изученными. Основной мотивацией проведения и теоретических и экспериментальных исследований в области физики взрыва таких ВВ служит неудовлетворительная предсказательная способность современных расчетных методов в отношении параметров детонации, а также проблемы с адекватной оценкой их взрывоопасности. Одной из причин такого положения является отсутствие достаточного количества экспериментальных данных по комплексу взрывчатых свойств, что обусловлено крайне низкой детонационной способностью простейших взрывчатых смесей. В настоящей работе проведены анализ имеющихся данных по скорости детонации стехиометрической смеси аммиачной селитры (АС) с дизельным топливом (ДТ) (одно из самых распространенных промышленных ВВ) и эксперименты по определению зависимости скорости детонации этой смеси от диаметра заряда и плотности.

Проведенный анализ результатов экспериментальных исследований детонации смеси АСДТ показал, что из-за большого разброса значений имеющиеся данные не позволяют однозначно судить даже о

такой базовой зависимости для любого гетерогенного ВВ, как зависимость скорости детонации от плотности (см. рис. 1а).

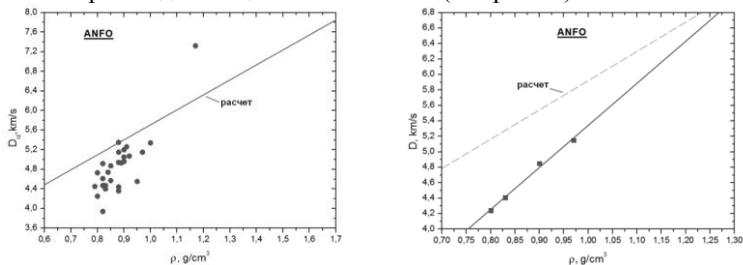


Рис. 1. Сравнение экспериментальной и теоретической зависимостей скорости детонации АСДТ от плотности.

Экспериментальные исследования в настоящей работе проводились со стехиометрическими смесями АСДТ, плотность смесей варьировалась от 0,80 до 0,97 г/см³. Различная плотность ВВ создавалась путем смешения пористой гранулированной с пористой молотой аммиачной селитрой, компоненты смеси брались из одной партии. Выбранный интервал плотностей охватывал весь диапазон, в котором были получены экспериментальные данные другими исследователями, за исключением одной точки при плотности 1,17 г/см³. Из-за низкой детонационной способности составов все эксперименты проводились в стальных оболочках, максимальный диаметр заряда составлял 102 мм.

Полученная в результате проведенных исследований зависимость скорости детонации от плотности для смеси АСДТ с хорошей точностью аппроксимируется характерной для большинства гетерогенных ВВ линейной зависимостью (см. рис. 1б). Этот факт позволяет сделать вывод, что наиболее вероятными причинами большого разброса значений скорости детонации, полученных при одинаковой плотности смеси АСДТ, являются различия в свойствах образцов аммиачной селитры, использованных различными авторами, а также ошибки, допущенные при проведении экспериментов с ВВ, обладающим крайне низкой детонационной способностью.

Проведенные исследования также подтвердили, что расхождения между результатами эксперимента и расчета термодинамическим методом для смесей АСДТ являются значительными.

Работа выполнена при поддержке проекта №20-08-00654А РФФИ и по теме Государственного задания №АААА-А19-119071190040-5.

ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНЫЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ КАК ДИСПЕРГАТОРЫ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ПВРД

^бЛемперт Д.Б., ^{а,б,в}Яновский Л.С., ^{а,б}Разносчиков В.В., ^{а,б}Аверьков И.С.,

^аЖолудев А.Ф.

^аЦИАМ им. П.И.Баранова, г. Москва,

^бИПХФ РАН, Россия, г. Черногловка

^в МГУ, Москва

Для высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) с внутриаэрозной зоной эксплуатации наиболее перспективными являются силовые установки (СУ) на основе прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД), в т.ч. ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе (РПДТ). При сравнительной простоте РПДТ имеют высокие значения удельного импульса в широком диапазоне высот и скоростей полета, что позволяет при обеспечении высоких скоростей иметь в 1.5 – 2 раза большую дальность полета ЛА по сравнению с использованием РДТТ. Основными компонентами для современных опытных твердых топлив для РПДТ являются легкие металлы, горючее связующее и окислитель. Металлы обеспечивают высокую объемную теплоту сгорания, но их продукты сгорания имеют высокую молекулярную массу или являются конденсированными. Окислитель в небольшом количестве требуется для газификации и диспергирования твердого топлива в ГГ и способствует «выносу» продуктов неполного сгорания в камеру дожигания. Цель работы - оценка возможности замены низкоэнтальпийного окислителя ПХА с практически нулевой теплотой сгорания на высокоэнтальпийные соединения (ВЭС) с низким содержанием кислорода и теплотой сгорания не ниже 9.5 МДж/кг. Это однозначно приведет к повышению теплоты сгорания всего топлива.

Использование ВЭС в качестве диспергатора позволит создать в ГГ высокие температуры того же уровня, что и при использовании ПХА. В качестве потенциальных диспергаторов исследовано около 50 ВЭС, в основном, это производные N-гетероциклов. Для комплексной оценки практической реализуемости этого предложения использовалось многодисциплинарное имитационное моделирование (ИМ) сложной технической системы летательный аппарат – силовая установка – топливо «ЛА-СУ-Т».

В состав ИМ системы «ЛА-СУ-Т» входят несколько десятков совместно работающих верифицированных математических моделей

(ММ): а) для расчета геометрических, аэродинамических, объемно-массовых и летно-технических характеристик ЛА; б)- ММ СУ для «завязки» и расчета высотно-скоростных (ВСХ), дроссельных (ДХ) и габаритно-массовых (ГМХ) характеристик двигателей различных схем; в) ММ топлива для расчета его свойств; г) блок расчета критериев эффективности системы «ЛА–СУ–Т».

Таким образом, в ИМ имеет место сопряжение «ракетных», «двигательных» и «топливных» аспектов проектирования, организовано взаимодействие с пакетами многопараметрической оптимизации, которые позволяют оптимизировать параметры и их характеристики с целью формирования оптимального технического облика системы «ЛА–СУ–Т» по выбранным критериям эффективности.

В результате исследования сформированы оптимальные предварительные параметры РПДТ и состав твердого маршевого топлива с новыми ВЭС в качестве диспергаторов. Проведен широкий комплекс исследований по оптимизации композиции бор + связующее + диспергатор с целью нахождения систем, позволяющих обеспечить максимальную дальность полета. Энергетический анализ системы «ЛА–СУ–Т» показал, что на базе большинства из исследованных потенциальных диспергаторов можно создать рецептуры, обеспечивающие дальность полета на 18 % выше, чем на базе ПХА как диспергатора.

Следующим шагом в развитии этой темы было исследование возможности использования высокоэнтальпийных углеводородов, например, 1,4-диэтинилбензола (ДЭБ), который имеет несравнимо более высокую теплоту сгорания, чем все изученные ранее ВЭС (~42 против ~ 16 МДж/кг). В то же время высокая величина энтальпии образования ДЭБ (~ 4000 кДж/кг) позволяет осуществить разогрев в газогенераторе до 1900 К в отсутствие внешнего воздуха или иных окислителей. Это позволяет успешно диспергировать исходное топливо. Было экспериментально показано, что процесс горения топлив связующее + ДЭБ (даже без ПХА) идет с вполне хорошей скоростью при 40-60 атм, несмотря на то, что ни в композиции, ни во внешней среде нет элементов-окислителей. Процесс горения протекает исключительно по причине высокой энтальпии образования ДЭБ. Расчетами показано, что применения ДЭБ в качестве диспергатора в системе связующее + ДЭБ может повысить дальность полета на 80% по сравнению с топливом на базе ПХА

Проведены экспериментальные определения скорости горения, чувствительности нормальной скорости горения к давлению и температуре для составов с ДЭБ и с несколькими ВЭС на базе полиазотов.

Работа выполнена на средства ИПХФ РАН в рамках выполнения госзадания (№ госрегистрации АААА-А19-119101690058-9) и проекта РФФИ № 20-07-00319.

О ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ СРЕД МЕТОДОМ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ

Луценко Н.А.^{1,2,@}, Салганский Е.А.³

¹*ИАПУ ДВО РАН, Владивосток, РФ*

²*ДВФУ, Владивосток, РФ*

³*ИПХФ РАН, Черногловка, РФ*

@ nickl@inbox.ru

Потребности современной промышленности в редких и ценных металлах постоянно возрастают. Дефицит редкоземельных металлов является мировой проблемой. В то же время в тяжелых нефтях, битумах и углях может содержаться значительное количество различных ценных металлов, которые сегодня, как правило, не используются, а остаются в отходах нефтепереработки и углеотходах.

Настоящая работа посвящена применению фильтрационного горения для извлечения ценных металлов из разнообразных металлосодержащих сред. Предложена оригинальная математическая модель для описания гетерогенного горения пористых металлосодержащих смесей с учетом фазовых переходов металла (плавление/кристаллизация и испарение/конденсация). Математическая модель основана на классических подходах механики сплошных гетерогенных сред [1] и теории фильтрационного горения [2]; она является комбинацией и модификацией разработанных ранее двух моделей: модели гетерогенного горения пористых сред при принудительной и естественной фильтрации [3-5] и модели процессов в гранулированных теплоаккумулирующих материалах с фазовым переходом [6, 7]. Отличительной особенностью модели является то, что скорости фазовых переходов предполагаются неизвестными априори и лимитируются только притоком/оттоком энергии, и при этом фазовые переходы происходят при фиксированной температуре. Для расчета процессов, описываемых предложенной моделью, разработан оригинальный численный метод, основанный на комбинации явных и неявных конечно-разностных схем.

Проведенные расчеты на примере пористой кадмийсодержащей смеси показали, что при распространении спутной волны горения металл испаряется из зоны горения, затем с потоком воздуха переносится в более холодную область перед фронтом волны и там конденсируется. В результате этого идет накопление металла (повышение его концентрации) в области перед фронтом горения. При этом при распространении фронта горения область с повышенным содержанием металла также продвигается по объекту, а концентрация металла в ней увеличивается. Таким образом, показано, что посредством фильтрационного горения можно эффективно обогащать металлсодержащие среды, повышая в них концентрацию редких металлов в десятки раз и этим многократно увеличивая рентабельность дальнейшего извлечения данных металлов традиционными способами. Проведенные расчеты также показали, что меняя условия горения можно управлять процессом накопления металлов, а именно, ускорять процесс или увеличивать максимальную концентрацию металла.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-29-24029-мк). Результаты получены с использованием оборудования ЦКП "Дальневосточный вычислительный ресурс" ИАПУ ДВО РАН.

[1] Нигматулин Р.И., 1978, Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука. 336 с.

[2] Алдушин А.П., Мержанов А.Г., 1988, Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. Новосибирск: Наука. с. 9-52.

[3] Lutsenko N.A., 2013, Proceedings of the Combustion Institute. **34**. 2289-2294.

[4] Левин В.А., Луценко Н.А., 2017, Доклады Академии наук. **476**. 30-34.

[5] Lutsenko N.A., 2018, Combustion Theory and Modelling. **22**. 359-377.

[6] Левин В.А., Луценко Н.А., Фецов С.С., 2018, Доклады Академии наук. **479**. 386-389.

[7] Lutsenko N.A., Fetsov S.S., 2019, International Journal of Heat and Mass Transfer. **130**. 693-699.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ОБРАЗЦОВ БОРА РАЗЛИЧНЫХ МОДИФИКАЦИЙ

Мееров Д.Б.^{1,®}, Моногаров К.А.¹, Муравьев Н.В.¹,
Пивкина А.Н.¹, Фоменков И.В.², Шишов Н.И.³

¹ФИЦ ХФ РАН, Москва

²ИОХ РАН, Москва

³ФГУП «ФЦДТ «СОЮЗ», Дзержинский, Московская обл.

® mmeerov@mail.ru

Проведено исследование порошков бора и его соединений, полученных различными методами – металлотермическим, электролитическим и методом крекинга бороводородов. Детально исследованы кристаллическое состояние, размер и микроструктура частиц, наличие и состав примесей, а также химический состав оксидного слоя частиц бора. Проведен анализ влияния указанных характеристик на параметры их окисления при нагревании с постоянной скоростью. Установлено определяющее влияние химического состава поверхностного слоя частиц на температуру начала их интенсивного окисления.

Физико-химические изменения, происходящие в оксидной оболочке частиц бора при нагревании, чрезвычайно важны для процессов его окисления и горения, в том числе, в составе твердотопливных композиций. Детально изучено влияние примесей Al_2O_3 , MgO , MgF_2 , Al и Mg на термическое поведение оксида бора, при этом особое внимание уделено процессу испарения B_2O_3 . Термоаналитически определены температура и тепловые эффекты реакций между компонентами, детально проанализированы процессы дегидратации, плавления и испарения оксида бора. Установлено, что интенсивный процесс испарения оксида бора начинается при температуре выше $1300\text{ }^\circ\text{C}$, а экспериментально определенная величина энтальпии испарения составляет 347 ± 3 кДж/моль. Обнаружено взаимодействие между фторидом магния и оксидом бора при температуре около $1000\text{ }^\circ\text{C}$ с потерей массы, соответствующей содержанию фторида магния и образованию газофазного фторида бора. Установлено, что растворенный в оксиде бор практически не оказывает влияния на процесс испарения расплава оксида бора, в то время как добавление Al_2O_3 или MgO приводит к существенному повышению термической стабильности оксидной оболочки частиц бора.

Исследования показали, что скорость горения и размер конденсированных продуктов сгорания в модельных составах В/ПХА/парафин практически не зависят от марки бора. Однако, содержание активного бора в агломератах, вылетающих с поверхности горения, существенно выше для образцов аморфного и электролитического бора, что является преимуществом при их использовании в газогенераторах для ракетно-прямоточных двигателей (РПД).

Экспериментально установлено, что применение полимерного связующего, пластифицированного высоколетучим веществом, препятствует формированию пористого каркаса при сгорании композиций с аморфным бором, в то время как при использовании связующего с низколетучим пластификатором каркас формируется во всем диапазоне проведенных исследований $0,1 < P < 4$ МПа.

Полученные результаты позволяют прогнозировать эффективность новых борсодержащих рецептур, а также контролируемо модифицировать существующие композиции для РПД.

Работа выполнена за счет субсидии на выполнение государственного задания по теме 0082-2018-0002, АААА-А18-118031490034-6.

ЭВОЛЮЦИЯ ОЧАГОВ УЛЬТРА-БЕДНОГО ПЛАМЕНИ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В УСЛОВИЯХ ЗЕМНОЙ ГРАВИТАЦИИ

Володин В.В.¹, Голуб В.В.¹, Киверин А.Д.¹, Мельникова К.С.^{1,®},
Микушкин А.Ю.¹, Яковенко И.С.¹

¹*Объединенный Институт Высоких Температур РАН*
® mkss-ks@yandex.ru

Задачи обеспечения пожаро- и взрывобезопасности технических систем и энергетических комплексов не теряют своей актуальности. Одними из основных направлений исследований в данной области являются анализ нестационарного развития ускоряющегося пламени в газовых смесях, в результате которого могут сформироваться такие разрушительные режимы распространения пламени как окологлуковое горение и детонация [1]. Не менее важным является нахождение концентрационных пределов устойчивого распространения пламени при различных условиях протекания процесса, а также исследование динамики процессов горения в газовых смесях обедненного состава и ультра-бедных смесях, с содержанием горючего компонента близким к нижнему концентрационному пределу горения.

В условиях развития аварий на реальных технических объектах формирование горючей смеси происходит, как правило, при нештатном выбросе горючих газов в воздушную атмосферу в результате разгерметизации топливных баков или нарушения целостности топливных магистралей [2]. В некоторых ситуациях возможен также химический синтез горючего, и его постепенное накопление в замкнутом объеме. В случае крупных объемов, характерных для реальных промышленных объектов, рассмотренные сценарии обеспечивают формирование обедненных горючих смесей, состав которых может существенно отличаться от стехиометрического. Горение смесей бедного состава характеризуется невысокой интенсивностью и малыми термическими и динамическими нагрузками, по сравнению с процессами горения в высокоактивных смесях с составом близким к стехиометрическому, где возможны процессы интенсивного ускорения пламени и переход к детонации.

Тем не менее, воспламенение и последующее распространение пламени в смесях бедного состава несет существенные риски разрушения важных объектов инфраструктуры, повреждения коммуникаций и оборудования. Кроме того, развитие пламени может привести к воспламенению более химически активных сред или областей занятых газовыми смесями с повышенным содержанием горючего.

Настоящая работа посвящена совместному экспериментальному и расчетно-теоретическому исследованию процессов распространения пламени в водородно-воздушных ультра-бедных смесях. Ввиду малой интенсивности горения в рассматриваемых смесях, важную роль в развитии процесса горения и переноса очагов горения в пространстве играет естественная конвекция. Ранее механизмы поддержания устойчивого горения в ультра-бедных смесях были исследованы теоретически [3] и экспериментально в условиях микрогравитации [4]. В недавних работах очаги ультра-бедного пламени были стабилизированы натекающим потоком в канале [5,6]. В данной работе впервые экспериментально продемонстрирована крупномасштабная структура ультра-бедного водородно-воздушного пламени в условиях земной гравитации, в больших объемах, характерных для реальных технических систем. Методами многомерного детального численного моделирования воспроизведена и проанализирована динамика развития свободного ультра-бедного пламени.

Авторы благодарят за финансовую поддержку РФФИ (грант №18-38-20079) и программу грантов Президента Российской Федерации для молодых ученых (грант №МК-3473.2019.2).

[1] G. Ciccarelli, S. Dorofeev, 2008, *Prog. Energy Combust. Sci.* **34**. 499-550.

[2] A. Venestanos, et. al., 2003, *J. Hazard. Mater.* **105**, 1-25.

[3] Зельдович Я.Б., Баренблатт Г., Либрович В.Б., Махвиладзе Г. «Математическая теория горения и взрыва». М.:Наука, 1980.

[4] P.D. Ronney, 1990, *Combust. Flame.* **82**. 1-14.

[5] Shoshin Y., et. al., 2011, *Proc. Combust. Inst.* **33**. 1211-8.

[6] Zhou Z., et. al., 2017, *Combust. Flame.* **183**. 113-25.

ЧИСЛЕННОЕ ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ

Е.В. Михальченко^{1,2,@}, В. Ф. Никитин^{1,2}, Ю.Г. Филиппов¹

*¹Московский государственный университет имени
М.В.Ломоносова, г. Москва*

*²Федеральное государственное учреждение «Федеральный
научный центр Научно-исследовательский институт системных
исследований Российской академии наук», г. Москва*

@MikhalchenkoLena@yandex.ru

Двигатель с вращающейся детонационной волной представляет собой новый подход к достижению улучшения характеристик силовых установок. Наиболее часто перечисляемые его преимущества связаны с очень быстрым выделением энергии при детонационном сгорании. Зона детонационного сгорания меньше, чем при дефлаграции, поэтому камера потенциально может быть короче. Процесс сгорания в такой камере термодинамически ближе к процессу с постоянным объемом, который более эффективен, чем процесс с постоянным давлением (цикл Брайтона). Другими возможными преимуществами этого двигателя по сравнению с современными воздушно-реактивными двигателями являются низкий уровень выбросов NOx и простота конструкции [1].

Проводится полномасштабное моделирование таких камер сгорания с учетом многокомпонентности смеси, явлений переноса, турбулентности и химической кинетики. Моделируемая камера сгорания представляет собой коаксиальный полый цилиндр [2,3,4]. Расчеты основаны на модели многокомпонентной газовой динамики, уравнение баланса массы для каждой из компонент газовой смеси, а также уравнения для моделирования турбулентности и химической кинетики [5]. В работе рассмотрено численное трехмерное моделирование камеры сгорания двигателя с вращающейся детонационной волной питаемой кислородно-водородной смесью и углеводородным топливом. Для того, чтобы описать горение ацетилен, использовалась сокращенная химико-кинетическая схема,

вовлекающая в реакцию следующие компоненты: C_2H_2 , CO , CO_2 , H_2 , O_2 , H_2O , OH , O , H , N_2 . Всего между этими компонентами идет 13 химических реакций при том, что азот считается нейтральным. Для моделирования химической кинетики водородно-воздушной смеси был использован следующий набор компонент: H_2O , OH , H , O , HO_2 , H_2O_2 , O_2 , H_2 , N_2 . Всего 9 компонент и 20 реакций, с нейтральным азотом. Было рассмотрено влияние на тяговые характеристики таких параметров, как: состав топлива, количество инжекторов, их расположение и размер, ширина канала, длина внутреннего тела, выбор кинетического механизма. Получены варианты со стабильной детонационной волной, варианты одной, двух и трех волн. Для некоторых режимов подачи топливной смеси стабильного детонационного режима получить не удастся; детонационные волны в этом случае вырождаются в обычное горение.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-07-00889А).

[1] Wolanski P., 2013. Proceedings of the Combustion Institute. **34**, 125.

[2] Nikitin V.F., Filippov Y.G., Stamov L.I., Mikhalchenko E.V., 2018. Supercomputing Frontiers and Innovations. **5**, 2:76-85.

[3] N. N. Smirnov, V. F. Nikitin, L. I. Stamov, E. V. Mikhalchenko, V. V. Tyurenkova, 2019. Acta Astronautica, **163(A)**, 168-76.

[4] Zhdan S.A., Bykovskii F.A., Vedernikov E.F., 2007. Combustion, Explosion, and Shock Waves **43**, 4:449-59.

[5] Smirnov N.N., Betelin V.B., Nikitin V.F., Phylippov Y.G., Koo J., 2014. Acta Astronautica, том 104, с.134-146

КЛЮЧЕВЫЕ ФУНКЦИИ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МИ-ГРЮНАЙЗЕНА

Молодец А.М.[@]

Институт проблем химической физики РАН

[@]molodets@icp.ac.ru

Как хорошо известно, уравнение состояния Ми-Грюнайзена

$$P = P_x + \gamma \frac{E - E_x}{V} \quad (1)$$

предполагает, во-первых, что давление $P=P(V,T)$ и удельная внутренняя энергия $E=E(V,T)$ могут быть представлены в виде сумм $P=P_x+P_t$, $E=E_x+E_t$ холодных $P_x=P_x(V)$, $E_x=E_x(V)$ и тепловых $P_t=P_t(V,T)$, $E_t=E_t(V,T)$ составляющих (V – удельный объём, T – температура) и во-вторых, что тепловое давление связано с плотностью тепловой энергии посредством зависящего от объёма коэффициента Грюнайзена $\gamma=\gamma(V)$. Известно также, что уравнение состояния (1) широко применяется в различных задачах физики ударного сжатия твёрдых тел. При этом «рабочими» функциями в (1) следует считать только E_x и γ поскольку $P_x = -dE_x/dV$, то есть является производной по объёму от E_x .

Важно отметить, что между E_x и γ существует связь, определяемая, например, модельной формулой Слэтера

$$\gamma = -\frac{2}{3} - \frac{v (d^3 E_x / dv^3)}{2 (d^2 E_x / dv^2)}. \quad (2)$$

Следовательно, эффективность (1) определяется адекватностью объёмной зависимости только одной из двух ключевых функций: $E_x(V)$, или $\gamma(V)$. С этой точки зрения используемые приёмы построения многочисленных уравнений состояния (1) конкретных материалов можно разграничить в зависимости от того, какая из двух функций выбирается в качестве первичной. В большинстве случаев отправной функцией выбирается E_x , а γ получается дифференцированием в согласии с (2). Гораздо реже первичной функцией является γ , когда для получения E_x нужно интегрировать уравнение (2). В практике нередко встречается и третий вариант, в котором используются независимые друг от друга E_x и γ . Однако в этом случае игнорируется физический смысл формулы Слэтера (2) и подобных ей формул Дугдала–МакДональда и Ващенко-Зубарева.

Ниже обсуждаются ключевые функции для (1), полученные на основе адекватной (в области сжатия) формулы для $\gamma=\gamma(V)$ из [1]

$$\gamma = \frac{2}{3} + \frac{2V}{v_0 - V}. \quad (3)$$

Заметим, что (3) содержит лишь один, заранее известный, параметр v_0

$$v_0 = V_0 \left(1 + \frac{2}{\gamma_0 - 2/3}\right), \quad (4)$$

определяемый справочной величиной коэффициента Грюнайзена $\gamma_0=\gamma(V_0, T_0)$ при начальном объёме V_0 и начальной температуре T_0 . Определим далее объёмную зависимость $E_x(V)$ как решение уравнения

$$\frac{2}{3} + \frac{2V}{v_x - V} = -\frac{2}{3} - \frac{V}{2} \frac{(d^3 E_x / dV^3)}{(d^2 E_x / dV^2)}, \quad (5)$$

получающегося подстановкой (3) в (2), и где v_x единственный подгоночный параметр, первое приближение которого есть v_0 (4).

Решение дифференциального уравнения (5) имеет вид

$$E_x = -v_x \left(9C_1 x^{\frac{1}{3}} \left(\frac{1}{10} x^{-1} + 2 + \frac{3}{2} x - \frac{1}{7} x^2 + \frac{1}{70} x^3\right) + C_2 x\right) + C_3. \quad (6)$$

Переменная $x=V/v_x$ в (6) представляет собой нормированный объём, в котором параметру v_x придаётся смысл характеристического объёма материала. Константы интегрирования C_1, C_2, C_3 определяются величиной v_x и справочными теплофизическими свойствами рассматриваемого материала в начальном состоянии (V_0, T_0) . Значения этих констант могут быть вычислены, если подобно [1] соотношения (3) и (6) дополнить Эйнштейновским выражением для $E_t=E_t(V, T)$

$$E_t = 3R\Theta \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{(\exp(\Theta/T) - 1)}\right), \quad (7)$$

где характеристическая температура Θ определяется из $\frac{d \ln \Theta}{d \ln V} = -\gamma$ как

$$\Theta = \Theta_0 \left(\frac{v_0 - V}{v_0 - V_0}\right)^2 \left(\frac{V_0}{V}\right)^{2/3}. \quad (8)$$

Таким образом, коэффициент Грюнайзена $\gamma(V)$ (3) в роли первичной функции вместе с E_x (6) и константами C_1, C_2, C_3 , определяемыми согласно технике [1], позволяет сформировать адекватный комплект ключевых функций уравнения состояния Ми-Грюнайзена (1) для сжатой твёрдой фазы конкретного материала.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-00237.

[1] Молодец А.М., Шахрай Д.В., Голышев А.А., 2017, ТВТ. **55**. №4, 523-5.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ГОРЕНИЯ ИНГИБИРОВАННОГО ЗАРЯДА В УСТАНОВКЕ С ДОЖИГАТЕЛЬНОЙ КАМЕРОЙ

Немцев М.Ю.^{1,@}, Семенов И.В.¹, Ермолаев Б.С.²

¹*ФГУ ФНЦ НИИ Системных исследований РАН*

²*ФИЦ Химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН*

@ maks-ivant@mail.ru

Настоящая работа посвящена разработке математической модели и вычислительного алгоритма для моделирования конвективного горения зарядов, состоящих из спрессованных зерен, покрытых пленкой поливинилбутирала. Газопороховая смесь моделируется двухфазной неравновесной гетерогенной средой, состоящей из многокомпонентной газовой фазы продуктов горения воспламенителя, заряда и пленки, и полидисперсной конденсированной фазы элементов заряда. Начало пиролиза пленки определяется по достижению заданной температуры на поверхности полимерного покрытия путем решения одномерного уравнения теплопроводности. Скорость пиролиза пленки полимера определяется по тепловому потоку, поступающему на её поверхность от газовой фазы. Воспламенение порохового зерна начинается после пиролиза заданного количества поливинилбутирала, соответствующего пленке, находящейся в порах. Поры представляют собой полости между зёрнами, через которые может течь газ. Поверхность пор составляет заданную часть поверхности заряда и зависит от его объемной доли. В дальнейшем горящая поверхность зерна увеличивается в соответствии с эмпирическим законом [1] линейно по времени. После полного охвата зерна горением газоприход рассчитывается в соответствии с геометрическим законом горения.

Определяющая система уравнений движения двухфазной смеси относится к неконсервативным уравнениям Эйлера [2]. Для ее решения используется явная схема типа предиктор-корректор. Процесс перехода на новый временной слой строится путем разделения по физическим процессам и включает в себя расчет динамики газа, динамики дисперсной фазы и межфазный обмен.

Установка состоит из цилиндрической оболочки, в которой размещается заряд, и присоединенной к ней дожигательной камеры, в которой находится воспламенитель: смесь ДРП и пороха. В торце дожигательной камеры на оси симметрии имеется отверстие для сброса давления.

Задача решается в двумерной осесимметричной постановке. Рассмотрены случаи подвижного и неподвижного заряда, соответствующие предположению о раннем диспергировании заряда на отдельные зерна и позднем соответственно. Представлено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показаний датчиков давления, расположенных вдоль заряда и в дожигательной камере. Для неподвижного заряда варьирование начальной объемной доли заряда приводит к существенному различию в динамике роста давления внутри заряда за счет изменения межфазного взаимодействия. Использование зависимости для коэффициента сопротивления из [3] в расчетах даёт лучшее согласие с экспериментальными данными на начальной стадии для неподвижного заряда. Расчеты выполнены на многопроцессорной вычислительной системе «МВС-10П» МСЦ РАН.

1. *Ермолаев Б.С., Сулимов А.А.* Конвективное горение и низкоскоростная детонация энергетических материалов. М.: Торус пресс, 2017, 400 с.
2. *Меньшов И.С., Немцев М.Ю., Семенов И.В.* Численное моделирование волновых процессов при горении неоднородно распределенного заряда //Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2019. – Т. 59. – №. 9. – С. 1591-1604.
3. *Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З.* Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 255 С.

ВЛИЯНИЕ ВОДЯНОГО ПАРА НА ПРОДУКТЫ ГАЗИФИКАЦИИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ В ПОТОЧНОМ РЕАКТОРЕ

Никитин А.Д.^{1,@}, Рыжков А.Ф.¹, Бутаков Е.Б.², Бурдуков А.П.²

¹Уральский федеральный университет

²Институт теплофизики СО РАН

@nikitin.a.d@yandex.ru

В связи с ограниченностью ископаемых энергоресурсов и глобальными изменениями климата в результате антропогенного воздействия, фундаментальной проблемой энергетики является повышение эффективности выработки энергии при минимальном воздействии на окружающую среду. Перспективной технологией является парогазовый цикл с внутрицикловой газификацией твердого топлива (ПГУ-ВЦГ). В рамках совершенствования ПГУ-ВЦГ стоят задачи повышения эффективности работы узла ВЦГ как в части характеристик целевого продукта – топливного газа для ГТУ, так и в части протекания физико-химических процессов в газовом тракте узла ВЦГ. Механическая активация топлива позволяет повысить его реакционную способность и применять в газификаторе воздушное дутье вместо кислородного [1], что снижает затраты на собственные нужды ПГУ-ВЦГ. Подача водяного пара позволит повысить реакционную способность топлива в газификаторе, заблокировать реакции разложения сорбента в узле горячей сероочистки, что приводит к повышению температуры сероочистки и КПД ПГУ-ВЦГ в целом, уменьшить генерацию пара для шифт-реактора, увеличить полезную внешнюю работу расширения газовой турбины и снизить образование оксидов азота. С другой стороны, подача значительного количества пара ухудшит тепловой баланс газификатора и может снизить эффективность сероочистки до критического уровня (в соответствии с термодинамическим равновесием при увеличении концентрации пара в синтез-газе повышается остаточная концентрация соединений серы). В связи с этим требуется комплексное рассмотрение влияния водяного пара на работу узла внутрицикловой газификации.

Целью исследования является получение новых экспериментальных данных о влиянии водяного пара на динамику газообразования и изменение реакционных характеристик коксозольного остатка (КЗО) по ходу поточного реактора при газификации механоактивированного угля, и выбор на основании полученных данных оптимального режима поточной газификации для перспективной ПГУ-ВЦГ с горячей сероочисткой.

Исследования проводились на модернизированном поточном реакторе ИТ СО РАН мощностью до 1 МВт. Реактор состоит из камеры сжигания в виде улиточного завихрителя и камеры газификации в виде цилиндрического канала. Для размолта топлива установлены мельницы грубого и тонкого помола, что позволяет варьировать размер частиц. Подача перегретого пара после модернизации осуществлялась тангенциально через вставку, установленную перед камерой газификации. Для измерения температур по ходу реактора на стенде применялась автоматизированная измерительная система. Состав синтез-газа (CO, CO₂, H₂, O₂, NO, SO₂) определялся газоанализатором ТЕСТ-1. Реакционная способность проб КЗО определялась в результате неизотермических опытов на приборе синхронного термического анализа NETZSCH STA 449F1.

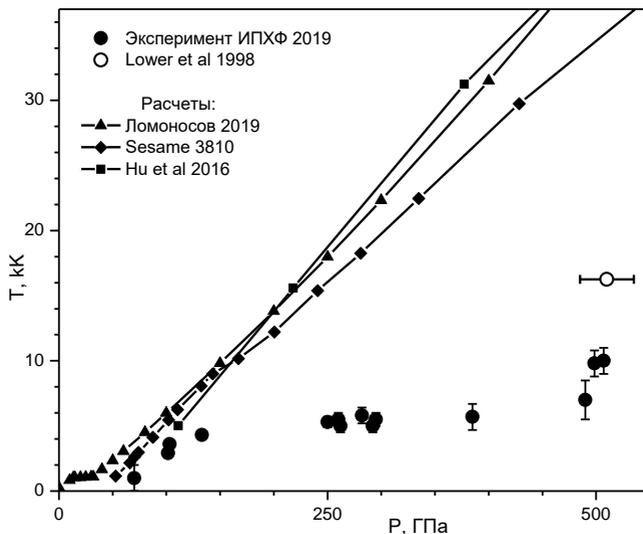
В результате получены зависимости состава синтез-газа от режимных параметров газификации механоактивированного угля (температура, размер частиц топлива, расход топлива, соотношение топливо-дутье, соотношение пар-воздух в дутье) и зависимость реакционной способности КЗО от соотношения пар-воздух в дутье. С увеличением содержания пара в дутье состав синтез-газа на выходе из реактора приближается к равновесному, что указывает на ускорение реакций газификации. Максимальная теплота сгорания синтез-газа для исследованного угля получена при соотношении 0,3 кг пара на кг топлива, при этом реакционная способность КЗО на выходе из реактора в два раза выше, чем при чисто воздушной газификации.

[1] Burdukov A.P., 2014, Appl. Therm. Eng. **74**. 174-181

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ СЖИМАЕМОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ УДАРНО-СЖАТОГО КРЕМНИЯ ДО ДАВЛЕНИЯ 490 ГПа

Д.Н.Николаев, М.И.Кулищ, С.В.Дудин, В.Б.Минцев, И.В.Ломоносов
Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия
nik@icp.ac.ru

В монокристаллическом кремнии существует окно прозрачности в ИК области 1.2 – 8 мкм. В то же время, существуют доступные детекторы излучения в области 0.9 – 2.6 мкм на базе кристаллов арсенида индия-галлия. Это позволяет выполнить регистрацию теплового излучения с фронта ударной волны в кремнии методом, аналогичным ранее использованному для измерения температуры ударного сжатия прозрачных веществ в видимом диапазоне излучения.



Диапазон давлений ударного сжатия 70 - 130 ГПа реализован с помощью традиционных взрывных систем, применение разработанных в ИПХФ РАН маховских кумулятивных генераторов [1] позволило достичь рекордных давлений до 490 ГПа. Измерения ударной сжимаемости осуществлялись по известной методике «отражения» путем регистрации волновых скоростей ~15-20 км/с с погрешностью менее 1%. Для измерения яркостных температур фронта ударной

волны был собран четырехканальный инфракрасный оптический пирометр с волоконным вводом излучения. Использовались полосы регистрации с центрами на длинах волн: 1.3, 1.5, 1.6, 1.8 микрона. В части экспериментов определялась степень черноты фронта ударной волны по оригинальной методике, где в качестве источника широкополосного излучения использовалась мощная ударная волна во взрывной аргоновой вспышке.

Впервые получены данные по ударной сжимаемости кремния в диапазоне 260 – 490 ГПа, что почти в два раза расширило исследованную область давлений [2]. Ход ударной адиабаты оказался «мягче», чем интерполяция данных [2], и хорошо согласуется с расчетами [6]. Подтвержден эффект непрозрачности фронта упругого предвестника ударной волны в кремнии при 70 ГПа [3]. Впервые измерены яркостные температуры ударного сжатия кремния в «окне прозрачности» инфракрасного диапазона спектра. В исследованной области давлений 70 – 490 ГПа обнаружен эффект существенного, от 2 до 5 раз, отличия температуры в меньшую сторону от расчетов по полуэмпирическим моделям [4,5] и DFT-MD расчета [6]. Данный факт не может быть объяснен низким значением излучательной способности фронта ударной волны. Предложен механизм частичного поглощения инфракрасного излучения фронта ударной волны при возникновении перед ним слоя носителей заряда вследствие внутреннего фотоэффекта. Подобное явление наблюдалось в [7], где температуру ударного сжатия кремния оценивали по регистрации всплеска оптического излучения в момент выхода ударной волны на поверхность. Эксперименты проведены с использованием приборной базы Московского регионального взрывного центра коллективного пользования ИПХФ РАН.

- [1] Nikolaev D. et al. Journal of Physics: Conference Series. v. 500. No 14. p. 1-5 (2014)
- [2] M.N. Pavlovskii. Soviet Physics-Solid state, Vol.9, No.11, p.2514 (1968)
- [3] V. Mintsev et al. Contrib. Plasma. Phys. 29, 4/5, 493 (1989)
- [4] I.V. Lomonosov et al. In: High Pressure Science and Technology - 1993. AIP Press, N. Y., Part 1. p.117 – 120 (1994)
- [5] B. I. Bennett et al. Los Alamos National Laboratory. Report LA-7130, 197818 (1978).
- [6] S. X. Hu et al. Phys. Rev. B 94, 094109 (2016)
- [7] T. Lower et al. Phys.Rev.Lett. 80, 18 (1998)

**МНОГОФАКТОРНОСТЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОНКИЕ
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТНЫЕ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ В УСЛОВИЯХ
ВЗРЫВЧАТОГО РАЗЛОЖЕНИЯ**

Нурмухаметов Д.Р., Адуев Б.П.

*Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
Институт углехимии и химического материаловедения,
650000, Кемерово, просп. Советский, 18,
@lesinko-iuxm@yandex.ru*

В работе представлен обзорный материал работ авторов на протяжении последних десяти лет. Получены значения критических плотностей энергий взрывчатого разложения композитов тэна с включениями ультрадисперсных частиц Al, Ni-C, Al-C, Co, Ni, и Fe в зависимости от концентрации включений в образце и определено значение оптимальной концентрации включений, при которой критическая плотность энергии взрывчатого разложения композита минимальна. Показано, что немонотонная зависимость порога лазерного инициирования от концентрации включений в композите на основе тэна коррелирует с оптоакустическими характеристиками образцов. Для сравнения количественного эффекта снижения порога взрывчатого разложения для различных композитных материалов необходимо указывать условия газодинамической разгрузки, применяемые в экспериментах, поскольку они также достаточно сильно влияют на порог взрывчатого разложения. Например, для композита тэн-алюминий (100 нм, 0,2% по массе) порог инициирования $1,15 \text{ Дж/см}^2$ при накрывании стеклянной пластиной и $0,3 \text{ Дж/см}^2$ при приложении к этой пластине давления $> 0,17 \text{ ГПа}$). Показано, что при лазерном инициировании взрывчатого разложения тонких образцов (1 мм) тэн-Al с уменьшением плотности образцов увеличиваются пороги лазерного инициирования взрыва, скорости и давление ударных волн в воздухе. Методом спектроскопии с высоким временным разрешением установлено, что первичным актом разложения при лазерном воздействии на образцы тэн-Al является

отрыв радикала NO_2 от молекулы тэна. Методом спектральной пирометрии установлено, что спектры свечения на стадии взрывчатого разложения образцов при лазерном иницировании имеют тепловой характер. Экспериментально установлено, что полученные экспериментальные результаты качественно согласуются с микроочаговой моделью лазерного иницирования тэна с включениями ультрадисперсных частиц металлов.

Физико-химические эффекты, приводящие к взрывчатому разложению, заключаются в поглощении лазерной энергии включениями, нагреву до высоких температур (возможно температур плавления включений). При этом за время лазерного импульса за счёт теплопроводности прогревается окружающая включение оболочка ВВ. Одно из следствий этого процесса – диссоциация молекулы тэна с отрывом NO_2 радикала и, по-видимому, экзотермическое разложение остова молекулы тэна. Такое образование в целом представляет собой «горячую точку».

Реакция распространяется от первичных очагов разложения, причем этому способствует давление газов образующихся в результате реакции. При разгрузке давления в очагах газы выходят к поверхности, вызывая деструкцию образцов. Если газодинамическую разгрузку не заблокировать, то взрыва не произойдет. Блокирование газодинамической разгрузки со стороны облучения приводит к повышению давления в облученном слое и образованию ударной волны, которая распространяясь в необлученную часть образца, дает вклад в дальнейшее развитие химической реакции, что в конечном итоге приводит к взрыву. Чем лучше заблокирована газодинамическая разгрузка образца, тем ниже порог взрывчатого разложения H_{cr} . Для пористых образцов небольшой плотности возможна реализация механизма взрывного горения [1].

Результаты приведенной работы позволяют научно-обосновано получить композитный состав для светодетонаторов штатных ВВ, а также в других практических применениях, где необходимо использование микровзрывов.

[1] Апин А.Я., 1945, Доклады АН СССР. **50**. 285

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ САПФИРА ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

Острик А.В.[@], Николаев Д.Н.

Институт проблем химической физики РАН

[@] ostrik@icp.ac.ru

Несмотря на широкое использование сапфира [1-8] в опытах по определению термодинамических и переносных (оптических и электропроводных) свойств веществ при высоких давлениях, механизмы переноса, вклад которых может меняться с ростом давления и температуры, все еще являются предметом многочисленных исследований. В частности, долгое время считалось, что перенос заряда в монокристалле сапфира обеспечивается потоком электронов и дырок [9]. Однако дальнейшие исследования показали существенную роль ионной составляющей проводимости в твердом состоянии [10], в том числе, и в кристаллах на основе оксидов. Поэтому лишь тщательное исследование электропроводности с привлечением экспериментальных данных может дать достоверную информацию об электронном и ионном транспорте в монокристалле сапфира.

При экспериментальных исследованиях проводимости в мегабарной области давлений для ударного сжатия использовались взрывные кумулятивные конические генераторы плоского однократного нагружения, принципиальное устройство которых описано в [11]. Генераторы были существенно доработаны (масса взрывчатого вещества возросла до 13 кг; часть генераторов изготовлялась в двухступенчатой конфигурации). Это позволило однородно и квазистационарно сжать сапфировый образец толщиной 1 мм и диаметром 10 мм до 250-550 ГПа (одноступенчатое устройство) и до 900-1350 ГПа (двухступенчатая конфигурация).

В результате проведенных экспериментов получены зависимости проводимости от плотности и давления. Показано, что при давлении до 550 ГПа электрическая проводимость сапфира не превышает 60 См/см. Это дает возможность применять сапфир как изоляционный материал при измерении электрических свойств ряда ударно сжатых веществ.

На основе полученных экспериментальных результатов и известных данных о физических свойствах сапфира предложена модель его электрической проводимости. В этой модели

предполагается, что при низких температурах ($T < 900^{\circ}\text{C}$) сапфир является несобственным полупроводником с одновременным присутствием доноров и акцепторов (с доминированием доноров). С ростом температуры преобладающим механизмом образования свободных электронов и дырок оказывается тепловой переход электронов из валентной зоны в зону проводимости, при котором концентрации электронов и дырок выравниваются, что упрощает модель. Кроме того, при высоких температурах и давлениях в модели учитывается вклад ионной составляющей.

В результате физических соображений и сравнения расчетных данных по модели и известных экспериментальных данных по зависимости проводимости сапфира от температуры и плотности подобраны параметры модели (только для тех параметров, для которых справочные данные отсутствуют). В представляющем для ударного сжатия интерес диапазоне температур ($T > 900^{\circ}\text{C}$) предложены аналитические соотношения для расчета проводимости сапфира.

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 18-08-00964-а с использованием оборудования Московского регионального взрывного центра коллективного пользования РАН.

- [1] Tan H., Ahrens T.J., 1990, High Press. Res. **2**. 3. 159-82
- [2] McQueen R.G., D.G. Isaak, 1990, J. of Geophys. Res. **95**. 21. 753-65
- [3] Anderson W.A., Ahrens T.J., 1996, J. of Geophys. Res. **101**. 5627-42
- [4] D.E. Hare, D.J. Webb, S.-H. Lee, N.C. Holmes, 2002, AIP Conf. Proc. **2**. 1231-34
- [5] D. Erskine, 1993, High-Press. Sci. Techn. 141-43
- [6] D.G. Hicks, P.M. Celliers, G.W. Collins, J. H. Eggert, S.J., 2003, PRL, **91**. 3. 035502
- [7] Root S., Magyar R., Lemke R., Mattsson T. Shock compression of cryogenic noble gas mixtures: Xenon – Krypton. Topical Conference on the Shock Compression of Matter 2013
- [8] Ozaki N, Nellis WJ, Mashimo T, et al., 2016, Sci. Rep. **6**. 26000
- [9] Fritz G. Will, Horst G. deLorenzi, Kevin H. Janora, 1992, J. Am. Ceram. Soc. **75** (2). 295-304
- [10] Kumar P.P., Yashonath S., 2006, J. Chem. Sci. **118**. 1. 135-154.
- [11] Nikolaev D., Ternovoi V., Kim V., Shutov A., 2014, J. of Physics: Conf. Ser. **500**. 14. 1-5

КОРОТКОФАКЕЛЬНОЕ ГАЗОГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО ВИХРЕВОГО ТИПА

Pavlov G.I.[@], Sabirzynov A.N., Nakorykov P.V.

*Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева - КАИ*

[@] Pavlov16mail.ru

Существующие паровые передвижные установки ППУА 1600/100 работают на дизельном топливе по ГОСТ 305-82 и вырабатывают пар, который используется для технических и технологических целей на объектах нефтегазодобывающих компаний. В штатном варианте эти установки требуют больших эксплуатационных затрат ввиду несовершенства горения топлива в топочном устройстве. Эти затраты связаны с неоправданно повышенным расходом дизельного топлива, вне регламентного обслуживанием змеевиков парогенератора из-за их закоксовывания, снижением к.п.д. котла. Затраты существенно можно уменьшить, если перевести ППУА на газовое топливо. Кроме того, значительно будут снижены удельные выбросы загрязняющих веществ, улучшены эксплуатационные характеристики установки. Следует отметить, что геометрические размеры топки ППУА имеют уменьшенные размеры по сравнению с топками других котлов той же мощности. Это обусловлено необходимостью соблюдения тех габаритных размеров, которые определены для специальной техники. Заниженный объем топки ППУА накладывает ряд ограничений на выбор требуемого газогорелочного устройства: по длине факела, габаритным размерам и массе; по режиму тепловой мощности. Анализ технических параметров газовых горелок, имеющихся на рынке России, свидетельствует о том, что существующие газовые горелки по тем или иным причинам не пригодны для использования в составе ППУА. Разработка газогорелочных устройств с коротким факелом пламени, удовлетворительными эмиссионными и эксплуатационными характеристиками является актуальной научно-технической задачей. В данной работе приведены результаты экспериментально-теоретических исследований горения горючего газа в вихревом потоке, позволившие создать эффективную газовую горелку. В ходе исследований разрабатывалась расчетная схема горелки, ее математическая модель и путем проведения численных исследований оптимизировалась конструктивная схема горелки. Первоначально

заданная конструктивная схема модели горелки приведена на рисунке 1.

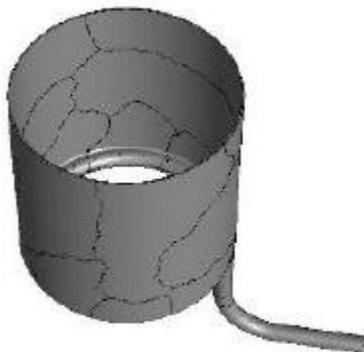


Рисунок 1. Конструктивная схема модели горелки

Геометрическая модель горелки включала в себя: газоотводящую трубку, коллектор с отверстиями и обечайку. Количество выходных отверстий на коллекторе варьировалось: 4, 8, 12, 16, 20, 24. Угол наклона оси отверстий к оси обечайки равнялся $a = 370^\circ$, угол наклона оси струи к радиусу – $b = 150^\circ$. Исследования проводились на пропане. В качестве модели горения использовалась модель диссипации вихря (Eddydissipation).

Исследования проводились средствами программного продукта *ANSYS-Fluent* в стационарной постановке в идеально-газовом приближении. Для решения сформированной системы уравнений применен совместный решатель Coupled. Результаты расчетных исследований проверялись экспериментами. В качестве сравниваемого параметра выбиралась температура газов. Температура измерялась в различных точках факела пламени. Расхождение значений температур, полученных численными расчетами и экспериментальным методом составляет от 8% до 23%, что позволяет сделать вывод об адекватности предложенной математической модели горения.

Геометрические параметры факела пламени определялись косвенным методом – по температурному полю. Допускалось, что на границе факела пламени окислительно-восстановительные процессы завершаются, и значение температуры достигает своего

максимального значения. Размеры факела пламени определялись для различных конструктивных схем, отличавшихся количеством отверстий. При этом расход пропана поддерживался постоянным. Оптимальным считалась та схема, которая позволяла получить факел пламени наименьших размеров. По результатам исследований создано опытно-промышленное газогорелочное устройство, которое успешно испытано на одном из ППУА 1600/100 в ООО ОренбургГазДобыча.

[1] Мингазов Б.Г., Явкин В.Б., Сабирзянов А.Н, Бакланов А.В. Анализ применимости моделей горения для расчета многофорсуночной камеры сгорания ГТД. Вестник СГАУ им. С.П. Королева. №5(29), 2011, с 208-214

[2] Gosman A.D., Ioannides E. Aspects of computer simulation of liquid-fuelled combustors. J. Energy, 1983, no. 7(6), pp. 482-490.

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕТОНАЦИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПЛОСКИХ ЗАРЯДОВ СМЕСЕЙ АММИАЧНОЙ СЕЛИТРЫ С ДИЗТОПЛИВОМ НА КАЧЕСТВО СОЕДИНЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ.

Первухина О.Л.^{1@}, Золотухин А.В.², Денисов И.В.³,
Первухин Л.Б.³

ИИСМАН, г.Черноголовка, Россия

2ФКП НИИ "Геодезия", г.Красноармейск, Россия

3ООО "Битруб Интернэшнл", г.Красноармейск, Россия

@ opervukhina@mail.ru

В России и за рубежом для сварки взрывом используются в качестве взрывчатых веществ (ВВ) смеси аммиачной селитры с дизельным топливом. Преимущества этих ВВ: невысокая стоимость, компоненты не являются взрывчатыми веществами, для их приобретения, хранения и перевозки не требуется получение специальных разрешений. В зарядах, которые используются при сварке взрывом крупногабаритных листов, необходимо обеспечить стабильную скорость детонации в пределах 2000-2800 м/с в толщине от 30 мм на площади до 30 м². Эта толщина близка или ниже критического диаметра заряда для смесей аммиачной селитры с дизельным топливом. Фронт детонации заряда может достигать нескольких метров, поэтому от стабильности детонации зависит качество сварки.

В результате комплекса исследований влияния типа аммиачной селитры, процентного содержания и качества дизельного топлива на свойства ВВ установлено:

1. Хорошо удерживает дизельное топливо молотая селитра. Однако при раскладке плоских зарядов практически невозможно обеспечить равномерную по площади плотность ВВ, что приводит к искривлению фронта детонации и появлению дефектов в сварном соединении.

2. Гранулированная селитра марки по ГОСТ 2-85 плохо пропитывается дизельным топливом, смесь имеет большой критический диаметр (больше 120 мм) и не может применяться для сварки взрывом.

3. Гранулированная микропористая по ТУ 2143-073-05761643-2013 имеет высокую пропитывающую способность (12%), что приводит к неравномерной пропитке гранул дизельным

топливом при его содержании 2,5-5% и как следствие не стабильной детонации заряда.

4. Гранулированная микропористая по ТУ 2143-036-002-3789-2003 обеспечивает получение качественной смеси с дизельным топливом и стабильность детонации плоских крупногабаритных зарядов. Эту селитру рекомендуется применять для промышленного производства крупногабаритного биметалла сваркой взрывом.

5. Применение забойки из песка позволяет стабилизировать процесс детонации, исключить разбрасывание верхнего слоя взрывчатого вещества и обеспечить детонацию зарядов в толщине 30 мм.

6. Стабильность детонации зависит от качества дизельного топлива, особенно в межсезонье. В частности, при понижении температуры окружающего воздуха в дизельном топливе возможно выпадение частиц парафина, которые препятствуют пропитываемости микропористой селитры, что приводит к нестабильности детонации. Показано, что при температуре ниже +5 градусов необходимо использовать только зимние сорта дизельного топлива.

Стабильность процесса сварки взрывом можно оценить по структуре волнообразного соединения. Исследования структуры на листах сталь+титан и сталь+нержавеющая сталь показали, что на оптимальных режимах обеспечивается волнообразная структура соединения, в которой высота и длина волн колеблется в узких пределах по всей площади соединения. Размеры исследованных биметаллических заготовок составляли сталь+титан 3300x3700 мм и сталь+ нержавеющая 2000x12900 мм.

Проведена экспериментальная проверка режима сварки взрывом на крупногабаритных зарядах с определением сплошности сварки, структуры и прочности соединения на отрыв. На листах биметалла марки 09Г2С+Тр321АISI размером 2000x12900 мм прочность соединения по всей длине листа превышает 600 МПа.

Исследования позволили до минимума сократить применение промышленных взрывчатых веществ механизировать процесс приготовления смеси, обеспечить высокое качество сварки за счёт стабильности состава и плотности заряда по всей его поверхности.

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ZrB_2 - $MoSi_2$ - MoB С ИСПЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ СВС И ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ

Погожев Ю.С.^{1,@}, Лемешева М.В.¹, Потанин А.Ю.¹,

Вершинников В.И.², Левашов Е.А.¹

¹*Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС», Москва, Россия*

²*Институт структурной макрокинетики и проблем
материаловедения им А.Г. Мерджанова РАН, Черногловка, Россия
@ yspogozhev@mail.ru*

Основной научно-технологической задачей современной ракетно-космической отрасли является создание новых конструкционных материалов для изготовления теплонагруженных элементов и конструкций высокоскоростных летательных аппаратов. Изделия из таких материалов должны сохранять геометрическую форму и размеры, обладать стабильными химическими, физико-механическими и теплозащитными свойствами в течение всего периода работы [1]. Обеспечение комплекса указанных характеристик позволит повысить коэффициент полезного действия двигательных установок, снизить уровень вредных выбросов в атмосферу за счет увеличения температуры сгорающих газов, повысить надежность и срок эксплуатации теплонагруженных конструкций.

В работе для получения высокотемпературной керамики ZrB_2 - $MoSi_2$ - MoB предложен комплексный подход, включающий получение узкофракционного микропорошка по схемам прямого элементного синтеза и магнийтермического восстановления из оксидов с их последующей консолидацией методом горячего прессования.

Термодинамический анализ химических реакций и фазовых превращений при синтезе керамики показал целесообразность использования магнийтермического восстановления для составов с большим содержанием Mo и Si , а для составов с большим содержанием Zr и B наиболее предпочтителен элементный синтез. Для элементных реакционных смесей установлена сильная зависимость тепловыделения от содержания Zr и B , которое увеличивается с

ростом их концентрации. Экспериментальные исследования кинетики горения показали практически линейные зависимости температуры (T_r) и скорости (U_r) горения от начальной температуры (T_0) СВС-процесса в интервале $T_0=20-550$ °С, что указывает на неизменную стадийность протекания химических реакций. Подогрев смесей до 450-550 °С приводит к увеличению U_r в 2-4 раза, которая также растет с увеличением доли Zr и В в смеси. Характер зависимостей $T_r(T_0)$ различен. Для составов в которых определяющим является взаимодействие Mo с Si с образованием $MoSi_2$ характерен линейный рост T_r с увеличением T_0 . Увеличение содержания Zr и В в смеси также способствует увеличению T_r , однако в данном случае она не зависит от T_0 . Это связано с увеличением количества расплава из-за плавления псевдобинарной эвтектики $MoSi_2-ZrB_2$. Эффективная энергия активации горения для исследуемых составов составила 50-190 кДж/моль, что подтверждает определяющее влияние на кинетику горения жидкофазных процессов. Изучение механизмов фазо- и структурообразования при горении показали, что формирование фаз ZrB_2 , $MoSi_2$ и MoВ происходит во фронте горения практически одновременно за время менее 0,25 с.

Морфология и гранулометрический состав порошков, полученных по различным схемам СВС практически идентичны. Они состоят из полиэдрических частиц со средним размером 5-8 мкм при максимальном размере до 30 мкм. Их фазовые составы также близки.

Структура консолидированных керамических образцов состоит из матрицы $MoSi_2$, в которой распределены игольчатые зерна ZrB_2 и полиэдрические включения MoВ. Они характеризуются пористостью 0,8-2,0 %, твердостью до 19,1 ГПа, трещиностойкостью до 8,3 МПа \times м^{1/2} и теплопроводностью до 46 Вт/(м \times К), скорость их окисления при 1200 °С за 30 ч составляет 1,21-3,02 \times 10⁻⁶ мг/(см² \times с).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (регистрационный номер проекта № 0718-2020-0034).

[1] Silvestroni L., Failla S., Neshpor I., Grigoriev O., 2018, J. Eur. Ceram. Soc. **38(6)**. 2467-2476

ТЕХНОЛОГИЯ ГАЗИФИКАЦИИ В РЕЖИМЕ СВЕРХАДИАБАТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТКО

Полианчик Е.В., Глазов С.В.[@].

Институт проблем химической физики РАН

[@] glazov@icp.ac.ru

Газификация отходов с использованием сверхadiaбатических режимов фильтрационного горения (ФГ), в дополнение к общим преимуществам утилизации через газификацию, как то: чистый дымовой газ и энергоэффективный котел [1,2], имеет дополнительные преимущества. Упомянем основные: фильтрация газа через свежее топливо обеспечивает условия для удержания частиц пыли и нейтрализации кислотных газов, длительное пребывание золы в потоке горячего воздуха обеспечивает полное окисление органических веществ. Противоточный режим обеспечивает энергоэффективность. Основой процесса становится окисление в зоне горения косового остатка пиролиза, оптимизации всего процесса становится оптимизация режима газификации кокса. Рассмотрение газификации кокса в зависимости от соотношения углерода и золы и водяного пара в газе-окислителе [3] показало, что возможно использовать твердый инертный теплоноситель, добавляемый к топливу. Этот оборотный кусковой материал усиливает рекуперацию тепла. Кроме того, он обеспечивает более равномерное распределение потока газа по сечению реактора. Очень высокий химический (cold gas) КПД газификации (более 90%) был подтвержден в лабораторных испытаниях. Это позволило нам построить экспериментальную установку промышленного масштаба (1500 мм).

Испытания подтвердили эффективность газификации и высокие экологические показатели процесса. Нормативы для CO, сажи, HCl и HF были соблюдены без какой-либо очистки; для пыли и тяжелых металлов, оксидов серы и диоксинов слабо превышены, дымовой газ требовал лишь незначительной очистки.

Испытания выявили существенные ограничения, связанные с механической неустойчивостью процесса. С кусковым или

брикетированным топливом процесс протекал в штатном режиме, с реальными ТКО развивалась неустойчивость фронта горения, что приводило к прогару с одной стороны. Это подтолкнуло к разработке реактора нового типа, наклонного вращающегося. Наклонный вращающийся реактор позволил совместить перемешивание топлива, как во вращающейся печи, и плотный слой с эффективным межфазным теплообменом, типичный для шахтной печи. Вращение на 2-3 об/мин. обеспечило надёжную стабилизацию фронта ФГ.

Испытания промышленного прототипа наклонного вращающегося газогенератора ГТТ-9 были проведены в октябре 2019г. Материал, для газификации - хвосты сортировки ТКО г. Москвы после аэробного компостирования. Влажность топлива ~35%, зольность ~35% сухой массы. Испытания подтвердили, что газогенератор обеспечивает устойчивость зоны горения на рабочем диаметре 1500 мм. Получаемый генераторный газ имел состав, приведённый в таблице (неконденсируемые компоненты, % об.).

CO2	Ar	O2	N2	CO	C2H4	CH4	H2
17.0	0.7	0.0	62.5	8.8	0.7	1.8	8.5

Кроме того, генераторный газ содержал водяной пар и значительное количество пиролизных смол. Газ устойчиво сгорал в вихревой горелке. Анализ продуктов сгорания подтвердил, что содержание ПХДД/ПХДФ (диоксинов) в дымовом газе (без газоочистки!) составило 18.4 пг/м³ TEQ при предельном нормативном значении 100 пг/м³. Содержание диоксинов в зольном остатке составило 28.6 нг/кг (норматив для почвы населенных мест 50 нг/кг).

- [1] Манелис Г.Б., Глазов С.В., Салганский Е.А., Лемперт Д.Б., 2012, Усп. хим., **81**, 855–873.
 [2] Arena U., Waste Management, 2012, **32**, 625-639.
 [3] Глазов С.В., Полианчик Е.В. ФГВ, 2015, №5, 34-43

Работа выполнена по теме Государственного задания, № гос. регистрации АААА-А19-119022690098-3 (тема 0089-2019-0018) и проекта РФФИ (19-03-00405).

ПОДАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ФЛЕГМАТИЗИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ

Александров А.О.¹, Алексеев В.И.¹, Вельмакин С.М.¹,
Гавриков А.И.¹, Ефименко А.А.¹, Зарецкий Н.П.¹, Мацуков И.Д.¹,
Привезенцев С.С.^{1, @}, Чайванов Б.Б.¹, Черненко Е.В.¹, Щепетов Н.Г.¹

¹НИИ «Курчатовский институт», Москва

@ Privezentsev_SS@nrcki.ru

Подавление процессов горения водорода - важная задача, решение которой необходимо как для эффективного развития водородной энергетики, так и для обеспечения безопасности АЭС. В ходе тяжелой аварии в помещениях защитной оболочки АЭС возможно образование взрывоопасных водородно-воздушных смесей. В марте 2011 года в Японии на нескольких энергоблоках АЭС Фукусима-1 именно это привело к последовательным взрывам, причинившим немалый ущерб. Имеется много способов подавления горения водорода в замкнутом объёме: создание инертной атмосферы, использование рекомбинаторов различного типа, добавление небольшого количества флегматизирующих веществ и т.д. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования возможности полного подавления горения водорода путем добавления различных флегматизирующих веществ и их смесей.

Работа проводилась на экспериментальных установках трёх масштабов (малого, среднего и большого). Исследования выполнены на бедной (10%) и стехиометрической водородно-воздушных смесях в диапазоне начальных температур от 20 до 120°C при нормальном начальном давлении.

Маломасштабные эксперименты проводились в трубе длиной 1м с внутренним диаметром 66мм. В поисковых экспериментах исследован ряд индивидуальных веществ. Минимальная концентрация наиболее эффективного из веществ, обеспечивающая полное подавление горения водорода, составляет 11% при 20°C и 14% при 120°C. Выбранные вещества далее использовались в качестве

компонентов смесевых флегматизирующих составов. Исследовалось шесть перспективных составов, из которых выбрано три, подавляющих горение стехиометрической водородно-воздушной смеси эффективнее каждого отдельного компонента.

Среднемасштабные эксперименты проводились в трубе длиной 8 м с внутренним диаметром 121 мм. 12% наиболее эффективного индивидуального вещества полностью подавляет горение при 20°C и 14% при 120°C. Уточнены соотношения компонентов выбранных смесевых составов, позволяющие достичь наименьшей минимальной флегматизирующей концентрации в диапазоне температур от 20°C до 120°C.

Крупномасштабные эксперименты проводились в кубе закрытом полиэтиленовой пленкой, полный объём которого составлял 10.6 м³. Эксперименты подтвердили возможность полного подавления горения добавлением 14% наиболее эффективного флегматизатора при 20°C. Минимальная концентрация наиболее эффективной флегматизирующей смеси составила 12 % при 20°C в крупномасштабных экспериментах. Было показано, что все составы, которые подавляют горение в экспериментах малого и среднего масштаба, также подавляют горение и в экспериментах крупного масштаба. Это служит обоснованием их применимости как в системах безопасности АЭС, так и в системах промышленной водородной безопасности.

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ В
КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ПРЯМОТОЧНОГО ВОЗДУШНО-
РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Размыслов А.В.[@], Султанов В.Г.

Институт проблем химической физики РАН

[@] sanaraz@mail.ru

В данной работе с помощью математического моделирования исследуются закономерности газификации и горения твердых горючих в типичной камере сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД). Используемая при расчетах математическая модель рассматривает течение воздуха через канал цилиндрического заряда горючего и основана на осредненных по Рейнольдсу уравнениях сохранения и учитывает турбулентность, горение и пиролиз твердого горючего. В работе приведены зависимости для интегральных параметров горения в камере сгорания ПВРД при использовании в качестве горючих полиметилметакрилата, полиэтилена и полибутадиена с концевыми гидроксильными группами. Отдельно рассмотрена структура теплового потока на поверхности заряда горючего.

ВЛИЯНИЕ КРИВИЗНЫ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ГОМОГЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Рашковский С.А.^{1,@}, Крупкин В.Г.², Маршаков В.Н.²

¹*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН*

²*ФИЦ химической физики им. Н.Н. Семенова РАН*

@ rash@ipmnet.ru

Впервые экспериментально исследована зависимость скорости горения гомогенных конденсированных энергетических материалов (ГКЭМ) от кривизны поверхности горения в широком диапазоне значений кривизны. Для этого использовались заряды баллиститного двухосновного твердого топлива с искусственно искривленной поверхностью горения: двухщелевые заряды и заряды в виде тонких клиновидных пластин с разными углами раствора. В результате экспериментов получены зависимости скорости горения гомогенного конденсированного энергетического материала от кривизны поверхности горения, которые сравнивались с теоретическими зависимостями [1], полученными в рамках феноменологической теории нестационарного горения Зельдовича-Новожилова.

Эксперименты показывают, что локальная скорость горения ГКЭМ с искривленной поверхностью горения может в 2 и более раз отличаться от скорости горения того же ГКЭМ с плоской поверхностью.

Исследованный эффект проявляется тогда, когда радиус кривизны поверхности горения соизмерим с толщиной прогретого слоя в конденсированной фазе энергетического материала (которая имеет порядок 0.1...0.2 мм), т.е. составляет менее 1 мм.

В обычных условиях этот эффект не сказывается на параметрах энергетической установки, однако, он может играть заметную роль в микроракетных двигателях, в которых поперечные размеры заряда могут быть порядка 1 мм. Кроме того, ГКЭМ используются в качестве энергетических связующих в смесевых твердых ракетных топливах. В этом случае ГКЭМ образует тонкие прослойки (толщиной менее 0.5 мм) между частицами окислителя и искривление его поверхности

горения может существенно влиять на горение смесового топлива в целом, что должно учитываться при моделировании процесса горения таких смесевых топлив.

Работа выполнена в рамках Госзаданий № АААА-А20-120011690135-5 и №АААА-А17-117040610346-5, а также была частично поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований, грант РФФИ № 18-08-01454 а.

[1] Рашковский С.А., 2011, ФГВ. **47** (6). 80-90.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СОЗДАНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР ВЫСОКОЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ

Розен А.Е.^{1@}, Грачёв В.А.², Киреев С.Ю.¹, Перельгин Ю.П.¹,
Зверовщиков А.Е.¹, Прыщак А.В.¹, Розен А.А.³

¹ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

²УРАН Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина

³ООО «Ромет» (Инновационный центр «Сколково»)

@aerozen@bk.ru

В мировом масштабе потери от коррозии составляют от 4 до 6 % национального дохода высокоразвитых стран. Потери, связанные с выходом конструкций из строя, остановкой технологических процессов, разгерметизацией оборудования, наносят большой экономический и экологический ущерб. Это приводит к необходимости совершенствования методов защиты от коррозии, разработке новых коррозионностойких материалов и изделий из них. Особенно остро вопрос коррозии стоит в атомной, химической и нефтегазовой промышленности.

Стандартный путь по использованию высоколегированных сталей и сплавов с повышенным содержанием хрома и никеля, во-первых, значительно удорожает стоимость таких материалов, а во-вторых, – провоцирует интенсивный рост питтингов в материале, которая может достигать свыше 10 мм в год. Одним из путей решения указанной проблемы является применение нового класса слоистых металлических материалов с внутренним протектором (СММ с ВП).

Предварительные результаты лабораторных исследований свидетельствуют о возможности многократного увеличения ресурса оборудования по сравнению с применяемыми в настоящее время материалами.

Рассмотрены основные способы получения СММ с ВП. К их числу относятся пакетная прокатка, сварка взрывом (СВ), гибридные технологии, включающие в себя сварку взрывом и последующую прокатку (СВ+П), электродуговая наплавка, электрошлаковая наплавка, газодинамическое и газотермическое напыление, электроосаждение, аддитивная технология послойного синтеза. Рассмотрены преимущества, недостатки, ограничения по применению и стоимость указанных технологий.

Показано, что по своим технологическим возможностям, производительности и себестоимости наибольший интерес вызывают СВ, а также гибридная технология, включающая СВ+П.

Экспериментальными исследованиями установлено, что ресурс работы оборудования, выполненного из СММ ВП, может быть повышен в 10 раз и более в сравнении с высоколегированными нержавеющими сталями аустенитного класса.

Задача повышения коррозионной стойкости наиболее актуальна для химической и нефтегазодобывающей отраслей промышленности. Химическая промышленность имеет наибольшие потери от коррозии. Оборудование работает в условиях щелочных и кислых сред, в средах с повышенным содержанием галогенидов, в широком диапазоне температур и давления. Установлена возможность при применении СММ с ВП сократить остановки на текущий и капитальные ремонты в 11 и 8 раз соответственно. Определён ресурс работы большого спектра технологического оборудования.

В связи с разработкой новых месторождений и добычей газо- и нефтепродуктов с больших глубин увеличилась степень коррозионной активности нефтепромысловых сред, что привело к существенному снижению (в 5 раз и более) средней наработки лифтовых колонн, собранных из насосно-компрессорных труб. Основная причина преждевременных отказов – коррозионно-механическое разрушение, обусловленное повышением агрессивности извлекаемого флюида. Установлена возможность получать из СММ с ВП бесшовные трубы, ресурс работы которых может быть увеличен в 10 раз и более.

Показано, что композиционный материал по коррозионной стойкости сопоставим с палладием, молибденом, никелем и хастеллоем, а по ценовой категории находится в одном ряду с широко распространёнными коррозионностойкими нержавеющими сталями аустенитного класса. Его потребительская стоимость может быть многократно увеличена.

Работа выполнялась по проекту № 0748-2020-0013 «Научные принципы формирования гетерогенных структур методами физико-химического диспергирования» (государственное задание вузу в сфере научной деятельности, Заказчик Министерство науки и образования РФ).

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МАССОПЕРЕНОСА СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОВ В ВОЛНЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ

Салганский Е.А. [@], Подлесный Д.Н., Цветков М.В., Зайченко
А.Ю.

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, РФ
[@] sea@icp.ac.ru

Редкие металлы имеют важное значение в стратегическом, научном, промышленном и экономическом плане. Из-за большого спроса на редкие металлы, низкого содержания в земной коре, а также неравномерного залегания в мире, существует риск истощения природных источников редких металлов и перебоев их поставок в будущем. Основная сложность при извлечении металлов заключается в том, что, как правило, их концентрация в сырье очень низкая. При фильтрационном горении твердых топлив высокотемпературная область с интенсивными процессами межфазного теплопереноса в противотоке может привести к образованию зональной структуры [1]. В результате технологии, основанные на фильтрационном горении, могут быть очень перспективными для извлечения некоторых металлов, особенно тех, которые могут образовывать относительно летучие продукты.

Для теоретического обоснования выбора значений управляющих параметров процесса фильтрационного горения проведен термодинамический анализ поведения металлсодержащих систем в условиях волны горения. Химический состав равновесной смеси рассчитывали с помощью стандартной пользовательской программы «TERRA» [2]. По результатам расчетов металлы поделили на две группы, образующие как конденсированную, так и газообразную фазу в продуктах и вторая группа – металлы, находящиеся только в конденсированной фазе. По некоторым металлам был проведен аналогичный расчет в [3], полученные результаты согласуются. К первой группе относятся металлы: Bi, Cd, Cs, Ge, In, Rb, Se, Te, Tl, W. В случае наличия соединений металлов в газовой фазе, как правило, это следующие соединения: металлы,

оксиды, гидроксиды, сульфиды и сульфаты металлов. В условиях волны фильтрационного горения за счет постоянного испарения и конденсации возможно организовать массоперенос соединений металлов первой группы с целью концентрирования их в определенной зоне реактора. Ко второй группе относятся металлы: Be, Co, Hf, Ga, Li, Nb, Ni, Sc, Sr, Ta, Ti, V, Y, Yb, Zr. Металлы второй группы не могут быть подвергнуты массопереносу в условиях волны фильтрационного горения и будут оставаться в твердых продуктах сгорания (в золе). Их концентрирование будет возможно лишь при наличии большого количества горючей составляющей в исходной смеси. В этом случае за счет выгорания горючей части и сохранения соединений металлов в зольном остатке будет происходить их концентрирование. Концентрирование металлов позволит проводить их дальнейшее извлечение традиционными методами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-24029-мк.

[1] Салганский Е.А., Полианчик Е.В., Манелис Г.Б., 2006, Химическая физика. **25(10)**. 83-91.

[2] Трусов Б.Г., 2012, Инженерный журнал: наука и инновации. **1**. 21-30. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-1-31.

[3] Заславский Г.Е., Лемперт Д.Б., Манелис Г.Б., 2014, Химическая физика. **33(1)**. 14-19.

**СИНТЕЗ ЛИТЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ
В РЕЖИМЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГОРЕНИЯ: ХИМИКО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА И
ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА**

В.Н. Санин[@], Д.М. Икорников, Д.Е. Андреев, В.И. Юхвид

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г.

Мержанова Российской академии наук,

142432 г. Черноголовка, М.О., ул. Академика Осипьяна д.8

[@] svn@ism.ac.ru

Благодаря быстро нарастающим потребностям развивающейся промышленности в различных конструкционных и функциональных металлических материалах непрерывно создаются новые марки сплавов и разрабатываются новые экономически эффективные технологии их получения. Постепенно увеличивается число легирующих элементов, так и их доля в общей массе материалов. Некоторые марки современных сплавов, прежде всего нержавеющей, жаропрочных, высокопрочных, сейчас уже содержат 4–5 контролируемых легирующих элементов массой до 30–40%, кроме того интенсивно применяется введение микро легирующих добавок.

Расширяя спектр вводимых легирующих добавок разработчикам удается достичь набора физико-химических характеристик сплавов, востребованных при создании перспективных образцов техники. Однако, это одновременно приводит к усложнению технологии получения современных высоколегированных сплавов и повышению, их стоимости. Поэтому непрерывно ведется поиск новых технологических процессов и материалов, позволяющих существенно снизить затраты их получение и последующую обработку.

Одним из таких технологических процессов является СВС-металлургия, которая является одним из важных технологических направлений из семейства технологий, основанных на методе самораспространяющейся высокотемпературный синтез (СВС). Отличительной особенностью СВС-металлургии является использование оксидов металлов и неметаллов и металла восстановителя в качестве исходных реагентов. Горение таких высококалорийных многокомпонентных систем, обеспечивающих высокие температуры процесса с образованием жидких конечных продуктов, а проведение синтеза в условиях воздействия высоких

гравитационных полей обеспечивает уникальное качество получаемых многокомпонентных сплавов. Характерным для СВС-металлургии является протекание процесса в 4 основные стадии: горение, фазоразделение, кристаллизация и остывание конечных продуктов.

Однако для организации управляемого химико-технологического процесса синтеза, направленного на получения материалов с нужным составом, структурой и свойствами необходимо иметь четкие знания о процессах, протекающих на каждой технологической стадии.

Содержание доклада будет включать: обобщение исследований влияния каждой из стадий на синтез литых многокомпонентных металлических сплавов с заданным составом, выбор оптимальных химических схем синтеза (на примере отдельных систем), выбор оптимальных технологических условий синтеза (на примере отдельных систем), примеры практического применения полиметаллических сплавов, полученных методами центробежной СВС-металлургии.

Будет представлен положительный опыт по синтезу литых высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) методами СВС-металлургии [1-3]. Анализ полученных данных позволяет сделать заключение о перспективности одностадийного метода СВС для получения литых металлических материалов на основе нового принципа формирования полиметаллических сплавов (ВЭС).

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ,
проект 19-08-01108.*

1. В. Н. Санин, В. И. Юхвид, Икорников Д.М, Д. Е. Андреев, Сачкова Н.Д, М. И. Алымов. СВС-металлургия литых высокоэнтропийных сплавов на основе переходных металлов. ДАН, 2016, том 470, № 4, с. 421-426. DOI: 10.7868/S0869565216280124.
2. Sanin V.N., Ikornikov D.M., Andreev D.E., Sachkova N.V., Yukhvid V.I. Synthesis of cast high entropy alloys with a low specific gravity by centrifugal metallothermic SHS-methods. Advanced Materials and Technologies. 2017. № 3. с. 24-33. DOI: 10.17277/amt.2017.03.pp.024-033
3. Nikolai Kashaev, Volker Ventzke, Nikita Stepanov, Dmitry Shaysultanov, Vladimir Sanin, Sergey Zherebtsov. Laser beam welding of a CoCrFeNiMn-type high entropy alloy produced by self-propagating high-temperature synthesis. Intermetallics. Volume 96, May 2018, Pages 63. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2018.02.014>.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА В ПРОЦЕССАХ СВЕРХАДИАБАТИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ

Седов И.В.^{1,®}, Макарян И.А.¹, Зимин Я.С.¹, Никитин А.В.^{1,2},
Арутюнов В.С.^{1,2}

¹*Институт проблем химической физики РАН*

²*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н.
Семенова РАН*

® isedov@icp.ac.ru

В наши дни водород пользуется растущим спросом на мировом рынке и находит широкое применение во многих отраслях народного хозяйства. Более того, в долгосрочной перспективе водород может стать универсальным экологически чистым энергоносителем в новой отрасли мировой экономики – водородной энергетике. Основой практически всех крупнотоннажных технологий получения H_2 является переработка природного газа/метана в синтез-газ, которые характеризуются повышенной сложностью, низкой энергоэффективностью и высокой капиталоемкостью, что требует их усовершенствования и создания более рентабельных процессов.

Альтернативой традиционным способам получения H_2 могут быть процессы некаталитического газофазного окисления углеводородов, проводимые, в том числе, в сверхадиабатических режимах, которые основаны на частичной рекуперации тепла продуктов сгорания, что позволяет повысить температуру реагентов, не прибегая к дополнительным внешним источникам тепла. В частности, примерами таких процессов являются матричная конверсия природных газов и проведение процесса в режиме фильтрационного горения.

Матричная конверсия углеводородных газов основана на процессе беспламенного приповерхностного горения, что обеспечивает частичную рекуперацию тепла продуктов окислительной конверсии [1]. Сама матрица разогревается до 800 – 900 °С и становится интенсивным источником видимого красного и невидимого инфракрасного теплового излучения, при этом реализуется режим идеального сверхадиабатического горения. Основные преимущества матричной конверсии: метод технологически прост, не требует применения внешних источников тепла и катализаторов, поэтому резко снижаются затраты на очистку и подготовку газа, а главное –

процесс имеет очень высокую удельную производительность (в 10 раз выше производительности паровой конверсии). Все это принципиально упрощает технологию и существенно снижает капиталоемкость процесса.

Для осуществления фильтрационного горения также применяют реакторы различной конструкции [2], например, реактор с отдельным вводом реагентов в противоточном реакторе фильтрационного горения с подвижным слоем инертного теплоносителя. Отличительная особенность таких реакторов – наличие теплообменного устройства, которое позволяет более эффективно использовать тепло инертного теплоносителя за счет предварительного подогрева воздуха, а также наличие разнообразных вариантов ввода окислителя в систему.

Представленные варианты некаталитического парциального окисления открывают конкурентоспособные перспективы для повышения эффективности процессов конверсии природного газа в синтез-газ и водород.

Исследования выполнены в ИПХФ РАН в рамках ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы” при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 05.607.21.0311, уникальный идентификатор проекта - RFMEFI60719X0311) и проекта РФФИ 19-31-90022.

[1] Nikitin A., Ozersky A., Savchenko V., Sedov I., Shmelev V., Arutyunov V. 2019. CEJ. **377**. 120883

[2] Dorofeenko S.O., Polianczyk E.V. 2016. CEJ. **292**. 183–189.

СЖИГАНИЕ ГАЗА С ЭКСТРЕМАЛЬНО ВЫСОКОЙ ДОЛЕЙ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В ДУТЬЕВОЙ ВОЗДУХ

Сидоркин В.Т.^{1@}, Тугов А.Н.², Берсенев К.Г.¹, В. Верещетин², Штегман² А.В.

1. *ENTEH Engineering AS, г. Кохтла-Ярве (Эстония)*

2. *ОАО «ВТИ», г. Москва*

@vladimir@enteh.ee

Представлены результаты экспериментов на паровом котле Е-135-3,2-420ДГ номинальной паропроизводительностью 135 т/ч, оснащенный шестью горелками тепловой мощностью по 20 МВт, в которых сжигается пиролизный газ сланцепереработки. Теплота сгорания этого газа составляет $Q_1^r = 45,0 - 55,0$ МДж/м³. Котел успешно эксплуатируется на электростанции VKG Energia OÜ (Кохтла-Ярве, Эстония) с 2017 года.

Проектная технология сжигания газа на этом котле, обеспечивающая нормативную концентрацию NO_x в дымовых газах (100 мг/нм³ в пересчете на 3 % O₂), предполагает использование комбинации двух известных приемов снижения NO_x - рециркуляцию дымовых газов в дутьевой воздух горелок и ступенчатое сжигание [1]. Доля рециркуляции в режиме номинальной паропроизводительности составляет 25-35 %, доля воздуха, подаваемого в сопла вторичного дутья, примерно 20 – 25 %.

Конструкция горелок позволяет эффективно сжигать горючий газ и с более высокой степенью рециркуляции. Результаты первых опытов, выполненных в процессе режимной наладки, показали, что нормативные концентрации NO_x могут достигаться без организации ступенчатого сжигания только за счет рециркуляции при ее доле около 45 %. При этом ухудшения горения и увеличения химического недожога не наблюдалось.

Результаты последующих экспериментов на режимах с еще большей долей рециркуляции и большим балластированием дутьевого воздуха инертными компонентами продуктов сгорания приведены в [2]. Режимы характеризуются достаточно низким содержанием кислорода в смеси дутьевого воздуха и дымовых газов рециркуляции (до 12 – 13 %) и низкими выбросами оксидов азота (до 50 – 60 мг/нм³),

В данном докладе обсуждаются экспериментальные результаты режимов, при которых содержание кислорода в смеси дутьевого воздуха и дымовых газов рециркуляции, подаваемых в горелки,

опускается до 10 – 12 %, что позволяет снизить концентрацию NO_x в уходящих газах до 30 – 35 мг/нм³. Указанные режимы горения анализируются с использованием разработанной адаптированной модели котла и CFD-моделирования работы горелки. Приводятся значения температур продуктов сгорания в зоне горения и на выходе из топки, оценивается предельно-допустимое значение кислорода в смеси воздуха и дымовых газов по условию диффузионного горения газа.

[1] Тугов А.Н., Верещетин В.А., Сидоркин В.Т. и др. Мероприятия для снижения выбросов оксидов азота на котле Е-135-3,2-420ДГ при сжигании газообразных продуктов сланцепереработки //Электрические станции. – 2018. - №5. - с 46-49.

[2] Сидоркин В.Т., Берсенева К.Г., Тугов А.Н. и др. Образование оксидов азота при сжигании пиролизных газов в воздухе, сильно забалластированном дымовыми газами рециркуляции // Теплоэнергетика. – 2019. - №1. - с.65-74.

КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ НЕРАВНОВЕСНОСТЬ И ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТ В РЕАКЦИИ ВОДОРОДА С КИСЛОРОДОМ ЗА ОТРАЖЕННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Скребков О.В. [@], Костенко С.С., Смирнов А.Л.

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

[@] skreb@icp.ac.ru

Исследование процессов воспламенения и горения в системе водород-кислород имеет практическое значение, связанное с использованием водорода в качестве эффективного и экологически чистого энергоносителя. Важность исследования этой системы с точки зрения фундаментальной науки состоит в том, что она является центральной модельной системой, содержащей все ключевые детали кинетики процессов воспламенения, горения и детонации.

После работ Семенова и Хиншельвуда (1927 г. – Нобелевская премия 1957 г.) реакция водорода с кислородом является объектом пристального исследования. Однако, проблема количественного описания кинетики в этой системе остается нерешенной как с точки зрения согласования между результатами различных экспериментов, так и с точки зрения согласия между теоретическими моделями и экспериментом.

Все кинетические расчеты, проводившиеся при интерпретации экспериментов, основаны на использовании предположения о наличии равновесия по степеням свободы молекул и радикалов. Использование этого предположения избавляет от необходимости учета зависимости сечения реакции от энергии внутренних степеней свободы молекул; кинетические уравнения записываются только для концентраций. Между тем, характерные времена релаксации внутренних состояний, а именно времена колебательной релаксации, зависят от условий, сравнимы или даже превышают характерные времена быстрых химических реакций. В результате учета в неявном виде влияния колебательной неравновесности приходят к различным формальным кинетическим схемам (механизмам), которые наряду с элементарными (в одну стадию) химическими реакциями включают “брутто” реакции,

детальный механизм которых неизвестен, а их эффективные константы скорости зависят от условий.

Альтернативный подход, учитывающий на элементарно-кинетическом уровне колебательную неравновесность молекул и радикалов, возникающих при окислении водорода за ударной волной, был реализован в наших работах (см., например, [1]), применен для изучения процесса ингибирования этой реакции добавками многоатомных газов [2] и механизма образования электронно-возбужденного радикала $\text{OH}^*(^2\Sigma^+)$ [3].

В данной работе колебательно неравновесная модель кинетики в реагирующей смеси $\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ [1-3] за отраженной ударной волной сформулирована как неизотермический процесс, протекающий при постоянном объеме [4]. Уравнения для концентраций и средних энергий мод молекул и радикалов решаются совместно с уравнениями состояния и сохранения энергии. Учитывается колебательная неравновесность исходных молекул H_2 и O_2 , молекулярных интермедиатов HO_2 , OH , $\text{O}_2(^1\Delta)$, а также основного продукта реакции H_2O . Анализируются результаты расчетов, моделирующих эксперименты по измерению времен индукции воспламенения в водород-кислородных смесях за отраженными ударными волнами методами абсорбционной спектроскопии (по радикалу OH в основном электронном состоянии) и эмиссионной спектроскопии (по радикалу OH^* в возбужденном электронном состоянии) при температурах $1000 < T < 1300$ К и давлениях $p < 3$ атм. Показано, что колебательная неравновесность определяет механизм и скорость процесса. Продемонстрировано влияние саморазогрева реагирующей смеси, значительное даже при концентрациях реагирующей добавки ≤ 5 %. Работа выполнена по теме Государственного задания, № государственной регистрации 0089-2019-0002 и проекта РФФИ 12-03-00526.

[1] Skrebkov O.V., 2015, Comb. Theory and Modeling. **19**. 131-58

[2] Скрбков О.В., Костенко С.С., 2017, Кин. и кат. **58**. 3-10

[3] Скрбков О.В., Смирнов А.Л., 2018, Кин. и кат. **59**. 531-38

[4] Skrebkov O.V., Kostenko S.S., Smirnov A.L., 2020, Int. J. of Hydrogen Energy. **45**. 3251-3262

МЕХАНИЗМ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ И ИОНИЗАЦИИ В СРЕДЕ ВЫХЛОПНЫХ СТРУЙ ТОРМОЗНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛУННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Смирнов А.Л.[@], Скребков О.В. , Павлов Г.А.

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

[@] asm@icp.ac.ru

Согласно Лунной программе РФ в 2021 планируется запуск КА к Луне. При посадке на Луну возможно применение системы тормозных двигателей на смеси N_2O_4 — НДМГ. Для адекватного моделирования факелов выхлопных струй системы двигателей, в т.ч. определения факторов, влияющих на СВЧ-излучение радаров, в настоящей работе предложен компактный кинетический механизм химических реакций и ионизации. Использование компактного механизма позволяет учесть все основные особенности 3D- течения струй, характеризующегося, как правило, высокими температурами, многокомпонентностью и развитой турбулентностью [1].

Были выполнены термодинамические расчеты равновесных составов, включая продукты ионизации, использована программа и база данных NASA. Исходный состав с температурой в камере сгорания 3440 К, давлением 40 атм и соотношением элементов Н/С/О/Н 0.343/0.086/0.248/0.323 соответствует оптимальной смеси N_2O_4 + НДМГ. Ориентируясь на параметры характерных областей поля течения, еще ряд составов получены из исходного как результат изэнтропического расширения (течение по соплу), а также сжатия расширившихся продуктов в ударной волне, неподвижной относительно космического аппарата, в том числе и с добавлением примесей из реголита.

По этим результатам проведен отбор значимых компонентов. Механизм из примерно 200 реакций собран из различных источников. На полученных составах рассчитаны скорости реакций и проведен отбор наиболее быстрых. Оценены параметры обратных реакций.

В итоге получен механизм, включающий следующие компоненты: основные: CO, CO₂, H, H₂, H₂O, N₂, NO, N, O, O₂, OH;

«малые»: HO_2 , NO_2 , H_2O_2 , HNO , COOH , NH , HNO_2 , HCO , NH_2 , NH_3 , HCOOH , N_2O ; заряженные: NO^+ , H_3O^+ , e^- , OH^- ; примеси: KOH , K^+ , K .

Отобранные 43 реакции можно разделить на группы: диссоциация - тримолекулярная рекомбинация, быстрые бимолекулярные реакции обмена основных компонентов, механизм NO и N , аммиак, малочисленные многоатомные молекулы, ионизация.

Группа реакций основных компонентов практически совпадает с хорошо известным механизмом [2], признанным адекватным для топливных смесей произвольного состава H/C/O/N при расчетах удельного импульса реактивных двигателей.

Основной вклад в ионизацию в выбранных условиях и составах (ниже критического сечения) вносят ионы H_3O^+ и NO^+ . Реакции с главным отрицательным ионом OH^- мало влияют на кинетику, но существенны для переноса зарядов в пространстве (связывание электронов). При добавлении лунной пыли основной вклад в ионизацию внесет калий, содержащийся в реголите в количестве около 0.1%, предположительно в виде силикатов. Это добавляет три компонента и три реакции в газе.

Пригодность разработанного механизма для целевых задач сложного реалистичного моделирования [1] и особенности его использования продемонстрированы простыми кинетическими расчетами.

Работа выполнена по теме Государственного задания, № гос. регистрации 0089-2019-0002 и проекта РФФИ 12-03-00526.

[1] Deryugin Yu.N., Zelensky D.K., Zhuchkov R.N., Yemel'yanova Y.V., Pavlov G.A., Smirnov A.L., 2019, Int. J. Heat and Mass Transfer. 134. 1084-1090.

[2] Васильев В.М., Сафарян М.Н., Скрёбков О.В., 1968. Отчет ФИХФ АН СССР, № 1818, Черноголовка.

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДА И СИНТЕЗ-ГАЗА В ДВИГАТЕЛЕ С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ

Смыгалина А.Е.[@], Киверин А.Д., Зайченко В.М., Цыплаков А.И.

Объединенный институт высоких температур РАН

[@] smygalina-anna@yandex.ru

Проведены эксперименты по сгоранию водорода и синтез-газа в двигателе с искровым зажиганием со степенью сжатия 10,0, а также двумерные расчеты с учетом условий проведенных экспериментов. Коэффициент избытка воздуха (λ) варьировался в диапазоне от 1,5 до 3,0. Получено удовлетворительное согласие экспериментальных индикаторных диаграмм с расчетными. Результаты экспериментов показали, что использование синтез-газа приводит к более высоким значениям основных показателей работы двигателя, чем использование водорода при одинаковом значении коэффициента избытка воздуха, а также, что индикаторный КПД слабо зависит от коэффициента избытка воздуха. При этом наибольший КПД при использовании водорода составил 35,0%, синтез-газа – 42,5%. На основе расчетов показано, что при использовании существенно бедных составов смесей как на основе водорода, так и на основе синтез-газа наблюдается существенное недогорание водорода, при $\lambda=3,0$ составившее 67,5 и 61,1%, соответственно (см. рисунок). При горении синтез-газа с $\lambda=3,0$ имеет место также недогорание СО – до 66,0%.

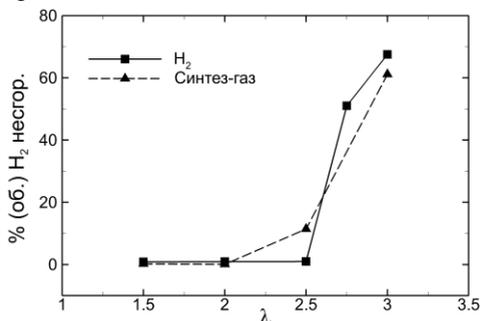


Рисунок. Процент несгоревшего водорода от первоначального объема при различных коэффициентах избытка воздуха

Таким образом, на основе комплексного подхода, состоящего в проведении совместного экспериментального и расчетно-теоретического анализа, показано, что выбор оптимальных составов газообразных горючих смесей для использования в двигателях с искровым зажиганием следует делать, не ограничиваясь исключительно анализом энергетических характеристик. С учетом производительности двигателя и степени недогорания, оцененных в настоящей работе, рекомендуемыми составами представляются водородно-воздушные и синтез-газ-воздушные смеси с коэффициентом избытка воздуха в диапазоне 1,5 – 2,0, поскольку при достаточно высоком КПД сгорание таких смесей оказывается наиболее полным. В работе также проводится анализ образования оксидов азота NO_x , подтверждающий выбор оптимальных составов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-38-20079.

**МАХОВСКОЕ ОТРАЖЕНИЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
ДЕТОНАЦИОННОГО ФРОНТА
С УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЛИНЗОЙ**

Султанов В.Г. [@], Зайцев В.Ю., Дудин С.В., Сосиков В.А.,
Торунов С.И.

Институт проблем химической физики РАН
[@] sultan@icp.ac.ru

Работа описывает интересную и практически важную особенность поведения детонационного фронта вблизи поверхности ударно-волновой линзы, - переход от регулярного режима отражения к нерегулярному, а именно маховскому. Эта особенность оказывает существенное влияние на геометрию фронта ударной волны до и после линзы и должна быть учтена при построении таких линз.

Данная работа выполнена в рамках экспериментов по получению осесимметричного цилиндрического сходящегося детонационного фронта при многоточечном инициировании (18 точек, диаметр основного заряда 200 мм). Исследовалась симметричность выхода ударной волны для построенной авторами линзы на поверхность основного заряда.

Цилиндрическая ударная волна при выходе из линзы получена на ширине 14.5 мм. (из 35 мм. линзы). Невозможность получения более широкого (на всю ширину линзы) цилиндрического фронта объясняется переходом от регулярного к маховскому отражению движущегося вдоль поверхности линзы в инициирующей раструбе детонационного фронта.

Экспериментальная часть выполнена при поддержке программы Президиума РАН №6 «Новые подходы к созданию и изучению экстремальных состояний вещества».

Расчетная часть выполнена в рамках госпрограммы "Экспериментальное и теоретическое исследование теплофизических характеристик и процессов в веществе в экстремальных состояниях" №АААА-А19-119071190040-5 и при поддержке проекта РФФИ №20-08-00654.

Все эксперименты проведены с использованием приборной базы Московского регионального взрывного центра коллективного пользования ИПХФ РАН.

Математическое моделирование теплофизических и термохимических процессов, приводящих к секвестрованию оксидов азота при зажигании частиц водоугольного топлива

Сыродой С.В.^{1,@}, Кузнецов А.А.^{1,2}, Саломатов В.В.²

¹*Томский политехнический университет*

²*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе*

@ ssyrodoy@yandex.ru

Статистические данные [1] показывают, что доля угля в производстве электрической энергии в мире будет составлять в 2040 году 35-40%. Но стоит отметить, что это приводит к существенному насыщению атмосферы земли парниковыми и высокотоксичными газами (SO_x , NO_x). Одним из наиболее перспективных технологических решений по существенному снижению выбросов SO_x и NO_x на настоящее время является технология водоугольного топлива (ВУТ) [2]. Однако на настоящее время не сформулировано гипотезы, объясняющей снижение интенсивности образования NO_x и SO_x при горении ВУТ. По этой причине основной целью работы является математическое моделирование комплекса совместно-протекающих процессов термической подготовки и воспламенения частиц водоугольного топлива, с учетом образования и секвестрования оксидов азота.

На рисунках 1 (а-с) приведены поля концентраций NO_2 в момент воспламенения частицы угольного и водоугольного топлив при различных температурах внешней среды. Можно отметить, что температуры формирования оксидов азота при зажигании частиц угольного и водоугольного топлив сопоставимы. Хорошо видно (рис. 1), что при зажигании частиц водоугольного топлива формируется гораздо меньше оксидов азота, чем при зажигании угля. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что водяные пары, формирующиеся при испарении внутривещной влаги ВУТ, выступают в роли компонента, связывающего NO_2 . Образуется азотная кислота, которая вступает в термохимическое взаимодействие с железом минеральной части топлива. Необходимо отметить, что при зажигании капель ВУТ водяных паров образуется по массе в десятки раз (при

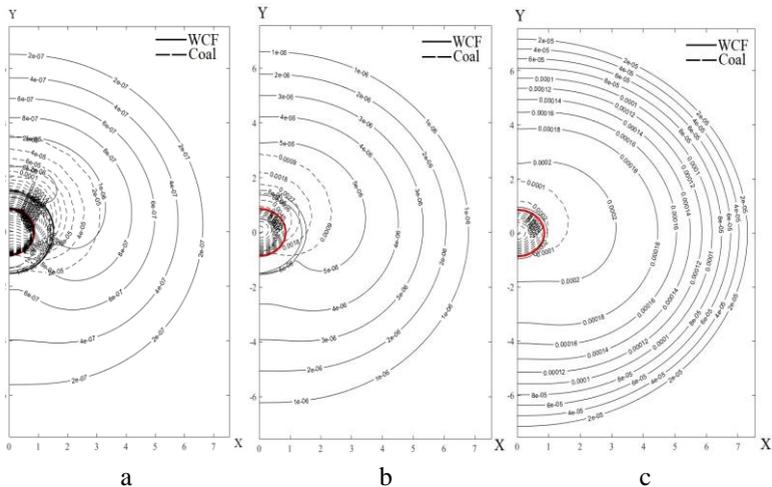


Рис.1. Поля концентрации NO_2 в период зажигания частиц угля и водоугольного топлива:

a - $T_g = 1273\text{K}$; b - $T_g = 1073\text{K}$; c - $T_g = 873\text{K}$.

определённых условиях даже сотни) больше, чем при зажигании частиц сухого угля. Это обусловлено высокой обводненностью водоугольного топлива. Источником воды при горении сухого угля является только адсорбционно-связанная влага и продукты реакций горения углеводородсодержащих (C_nH_m) соединений в составе газообразных продуктах пиролиза.

По результатам численного моделирования установлено, что в идентичных по температуре внешней среды T_g условиях при воспламенении каплей ВУТ образуется значительно меньше NO_x (в сотни раз), чем при зажигании угольного топлива.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №18-79-10015)

[1] Miller B.G., 2017. Clean Coal Engineering Technology. United States.

[2] Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Zhakharevich A.V., Gutareva N.Y., Salomatov V.V. Combust. Flame. **180**. 196-206

**РАСЧЕТ СОСТАВА, ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И
СКОРОСТИ ПЛАМЕНИ ПРИ КОНВЕРСИИ ПРОДУКТОВ
ПИРОЛИЗА ПОЛИПРОПИЛЕНА И АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН**

Тереза А.М.^{1,2,@}, Агафонов Г.Л.¹, Медведев С.П.^{1,2}, Хомик С.В.^{1,2},

Брыков Н.А.², Петров С.К.², Чернышов М.В.²

¹*Федеральный исследовательский центр химической физики
им. Н.Н. Семенова Российской академии наук*

²*Балтийский государственный технический университет
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова*

@ tereza@chph.ras.ru

Детонационное сжигание газообразных продуктов пиролиза полимерных и каучуксодержащих материалов представляет важный элемент перспективной экологически безопасной технологии утилизации промышленных и бытовых отходов. Для оптимизации процесса инициирования и распространения детонации необходимы сведения о составе и кинетических характеристиках горючих смесей. В работе проведен анализ результатов численного моделирования возможных путей конверсии прямых продуктов пиролиза полипропилена (ПП) и автомобильных шин (АШ) и определены параметры их воспламенения и горения до и после конверсии.

Численное моделирование выполнено с использованием детального кинетического механизма [1], обеспечивающего из имеющихся в литературе наиболее достоверные результаты при $T < 1200$ К. Исходный состав газообразных продуктов пиролиза ПП и АШ соответствует [2,3]. Сравнение данных работ [2] и [3] показывает, что состав продуктов пиролиза ПП и АШ практически одинаков по компонентам, но сильно отличается по их концентрации. На первом этапе моделировалась конверсия продуктов пиролиза в температурном диапазоне $600 \text{ K} < T_0 < 1100 \text{ K}$ при давлении 0.1 МПа. Установлено, что на начальной стадии конверсия продуктов пиролиза ПП проходит с понижением температуры, а в случае АШ с повышением температуры. Расчеты показали, что основным продуктом конверсии в случае ПП и АШ является метан и водород, при этом скорость конверсии сильно отличается.

На втором этапе была определена задержка воспламенения τ и нормальная скорость горения u_n исследуемых топливных смесей. Установлено, что величины τ для кислородных смесей исходных продуктов пиролиза ПП и АШ и продуктов их высокотемпературной конверсии практически не отличаются при начальном давлении 0.1 МПа в температурном диапазоне 800 К – 2000 К. Не было установлено и значимых различий в значениях u_n . Сравнение результатов расчетов с хорошо исследованными простейшими углеводородами даёт основание сделать вывод, что детонационная способность смесей продуктов пиролиза ПП и АШ с воздухом имеет те же характеристики, что и смесь пропана с воздухом. Данный результат позволяет, с одной стороны, значительно упростить многомерные газодинамические расчеты инициирования и распространения детонации и, с другой стороны, использовать пропан в качестве модельного топлива при отладке макетов установок детонационного сжигания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития Российского научно-технического комплекса на период 2014-2020»; грант № 075-15-2019-1843, идентификатор проекта RFMEFI60719X0307 и проекта РФФИ 12-08-01266.

[1] Ranzi E., Frassoldati A., Grana R., et al., 2012, Prog. Energy Combust. Sci. **38** (4). 468–501.

[2] Фролов С.М., Звегинцев В.И., Аксёнов В.С. и др., 2018. Горение и взрыв. **11**(4). 44–60.

[3] Williams P.T., 2013, Waste Management. **33**. 1714–1728.

ПРИМЕНЕНИЕ СМЕСЕВЫХ ТВЁРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ В КОНСТРУКЦИИ ГОЛОВНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ РАКЕТЫ- НОСИТЕЛЯ ДЛЯ ЕГО СЖИГАНИЯ ПОСЛЕ ВЫПОЛНЕНИЯ МИССИИ

¹Трушляков В.И., ²Лемперт Д.Б., ³Михайловский К.В.

¹*Омский Государственный технический университет, Омск, Россия*

²*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия*

³*АО «Композит»*

vatrushlyakov@yandex.ru

Предложена концепция создания сжигаемого головного обтекателя (ГО) ракеты-носителя вместо традиционного ГО, представляющего собой трехслойную конструкцию, состоящую из углепластиковых обшивок на основе углеродной ленты и заполнителя с детонационными компонентами, в виде двухстворчатой оболочки переменной кривизны, содержащей внешний и внутренний несущие слои оболочки ГО из связующего и углеродной ленты, заполнитель из алюминиевых сот, размещённый между внешним и внутренним несущими слоями оболочки ГО [1].

Основным содержанием концепции является использование научно-методического и технологического подходов, разработанных для создания ракетных двигателей на твёрдом топливе (РДТТ) для создания конструкции сжигаемого ГО, в частности, замена традиционного сотового алюминиевого заполнителя ГО на аналог сгораемого заряда РДТТ, обладающего значительной прочностью, рассчитанной на величины нагружения, соответствующие активному участку выведения ракеты-носителя, а также замену внешнего и внутреннего слоёв оболочки ГО (аналог несгораемого корпуса РДТТ) на сгораемый одновременно с зарядом (заполнителем) материал.

Предлагаемая концепция предполагает решение следующих задач:

а) определение возможных типов смесевых твёрдых ракетных топлив (СТРТ) и массы для изготовления конструкции заполнителя с обеспечением требуемой прочности и выделении заданного количества теплоты;

б) обеспечение условий движения продуктов сгорания заполнителя (заряда СТРТ) внутри заполнителя и максимальной передачи теплоты внешнему и внутреннему несущим слоям оболочки створки ГО (обшивке) для их нагрева до температуры воспламенения в слоях набегающего потока воздуха;

в) использование в качестве материала обшивки полимерного композиционного материала, обладающего близкими теплофизическими и прочностными характеристиками к используемому связующему и углеродной ленте, но с меньшей энергией активации воспламенения;

г) выбор параметров трёхслойной конструкции демонстратора створки сжигаемого ГО из условия подобия процессов тепло - массообмена при проведении теоретических и экспериментальных исследований.

Показано, что существующие теплофизические характеристики материалов внешнего и внутреннего слоёв несущей оболочки ГО, заполнителя являются завышенными, что затрудняет решение проблемы их сжигания на траектории спуска.

Рассмотрены основные задачи, возникающие при адаптации теории и методов проектирования РДТТ, для разработки заполнителя сжигаемого ГО. Проведены оценки теплового и прочностного нагружения сжигаемого демонстратора, показана принципиальная возможность создания ГО с заданными характеристиками с использованием СТРТ для изготовления заполнителя.

[1] V. Trushlyakov, D. Davydovich, A. Panichkin, D. Lempert, Ya. Shatrov Method of providing thermal loading of the separated parts of launch vehicle during the atmospheric phase of the descent trajectory//Acta Astronautica Volume 157, April 2019, Pages 1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.12.015>

Нестационарные режимы воспламенения и стабилизации горения в сверхзвуковой камере сгорания

Федорова Н.Н.[@], Гольдфельд М.А.

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН

[@] nfed@itam.nsc.ru

Известно, что в сверхзвуковой камере сгорания как прямые процессы воспламенения топлив и перехода к устойчивому горению, так и обратный процесс срыва горения, сопровождающийся запирианием канала, имеют нестационарный характер. В результате срыва горения происходит падение тяги двигателя и значительное увеличение давления, температуры и тепловых потоков при высоком уровне пульсации параметров.

В докладе представлены результаты совместных экспериментально-расчетных исследований течений в модельной сверхзвуковой камере сгорания, представляющей собой плоский канал с уступом, при многоструйной поперечной инжекции водородных струй. Нестационарные процессы изучены путем измерений статического давления и тепловых потоков на стенках канала, а также визуализации пламени с помощью высокоскоростной фотосъемки, выполненных в импульсной аэродинамической установке ИТ-302М при числе Маха на входе в камеру сгорания $M=4$, статическом давлении и температуре $P_{st}=0.06 - 0.25$ МПа, $T_{st} = 350 - 600$ К и коэффициенте избытка топлива в диапазоне $0.25 - 1.2$. Математическое моделирование процессов в камере сгорания проведено для условий экспериментов на основе нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, дополненных $k-\omega$ SST моделью турбулентности и детальной кинетической схемой.

Комплексный подход к исследованию трехмерных нестационарных течений с тепло- массо-обменом позволяет получить подробную информацию о процессах смешения, воспламенения водородно-воздушной смеси, развития и стабилизации пламени в канале. Показано, что при достижении подходящего уровня смешения происходит самовоспламенение смеси с распространением фронта пламени вверх по течению. Процесс стабилизации горения происходит

в три этапа. Первый этап с небольшим повышением давления соответствует локальному воспламенению в отрывных зонах, образованных на стенках канала в результате воздействия генерированных струями ударных волн. На втором этапе наблюдается интенсивное горение и соответствующее ему повышение давления по всей камере сгорания. Вследствие распространения пламени вверх по течению происходит существенное расширение пристенного горящего слоя, толщина которого превышает высоту уступа. Увеличение тепловыделения приводит к интенсификации перемешивания и дальнейшему распространению пламени вверх по течению. Третья стадия процесса характеризуется устойчивым горением и высоким уровнем давления во всей камере сгорания, при этом ядро потока остается сверхзвуковым.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-08-00959.

УПРАВЛЕНИЕ ГОРЕНИЕМ ОБЕДНЕННОЙ ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ КОРОННЫМ РАЗРЯДОМ В КОМПРЕССИОННОМ ДВИГАТЕЛЕ

Филимонова Е.А. [@], Добровольская А.С., Бочаров А.Н., Битюрин В.А.
*Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия
[@] helfil@mail.ru*

Проведено моделирование распространения волны горения, которая формируется благодаря воздействию филаментированного импульсно-периодического неравновесного разряда на смесь, изначально не воспламеняемую в результате сжатия. Разряд в течение короткого времени активировал смесь при разных углах поворота коленвала на стадии сжатия смеси в цилиндре двигателя, описанного в [1]. Учитывался нагрев разрядной области и химически активные компоненты, образующиеся в результате диссоциации и возбуждения молекул воздуха и топлива электронным ударом, а также наличие многостадийного воспламенения в смеси.

Полученные состав и температура в активированной зоне были начальными условиями для моделирования волны горения вдоль радиуса цилиндра. Расчет проводился на основании решения уравнений Навье-Стокса с многокомпонентной диффузией со специальными членами, отвечающими за сжатие вдоль оси цилиндра.

Показано, что задержка времени воспламенения смеси зависит от величины удельного энерговклада в стримерный канал, доли объема активированной зоны, занятой стримерами, радиуса активированной области, и от момента инициации разряда по отношению к верхней мертвой точке. Скорость волны горения и возникновение автовоспламенения в большей степени определяются моментом инициации разряда и удельным энерговкладом. Значительное влияние разряда объясняется стимуляцией кинетического механизма окисления при низких и промежуточных температурах.

[1] Filimonova E., Bocharov A., Bityurin V., 2018, Fuel. **228**. 309-22

ПОВЕДЕНИЕ ЗОЛЫ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ

Цветков М.В.^{1,@}, Подлесный Д.Н.^{1,2}, Салганский Е.А.²
Цветкова Ю.Ю.¹, Зайченко А.Ю.¹, Салганская М.В.^{1,2}

¹ *Институт проблем химической физики РАН*

² *Московский государственный университет*

им. М.В. Ломоносова

@ tsvetkov@icp.ac.ru

Одним из перспективных методов термической переработки муниципальных отходов является газификация в режиме фильтрационного горения, которая предполагает твердое золоудаление. Независимо от способа термической переработки отходов существует проблема механического удаления золы. В коммунальных отходах содержится значительное количество Na_2O и K_2O (4-8%), которые снижают температуру плавления золы, ограничивая максимальную рабочую температуру газификации.

Целью работы является изучение температур плавления золы отходов, а также выяснение минеральных преобразований компонентов золы в условиях термической переработки.

Модельный состав ТКО состоял из: бумаги и картона (40%), пищевых отходов (22%), пластмассы (10%), стекла (7%), алюминиевых банок (5%), железной проволоки (3%), древесины (7%), текстиля (3%), кожи и резины (3%). Осадок сточных вод (ОСВ) был предоставлен очистными сооружениями г. Черноголовка.

Химический состав золы ОСВ в пересчете на оксиды: SiO_2 – 27.13%, Al_2O_3 – 4.99%, Fe_2O_3 – 13.11%, CaO – 29.47%, MgO – 2.67%, Na_2O – 1.75%, K_2O – 3.29%, P_2O_5 – 14.06%, SO_3 – 3.53%. Химический состав золы ТКО в пересчете на оксиды: SiO_2 – 24.21%, Al_2O_3 – 12.09%, Fe_2O_3 – 3.01%, CaO – 42.41%, MgO – 2.32%, Na_2O – 3.25%, K_2O – 1.5%, P_2O_5 – 2.53%, CO_2 – 4.59 %, остальные (SO_3 , TiO_2 и др.) – 4.09%.

Определены основные критерии шлакуемости золы: основнокислотное соотношение, индекс вязкости шлака, коэффициент

обрастания стенок, которые характеризуют золу ТКО и ОСВ как склонную к шлакованию.

Для золы ОСВ экспериментально измеренная температура деформации составила 1190°C (DT); температура образования сферы – 1220°C (ST); температура образования полусферы – 1240°C (HT). При температуре 1270°C наблюдали полное плавление образца (FT). Кроме того, выше 900°C наблюдается уменьшение образца в 3–4 раза с сохранением исходной формы, связанное с плавлением легкоплавких компонентов.

Для ТБО экспериментально измеренная температура деформации составила 1210°C (DT); температура образования сферы – 1290°C (ST); температура образования полусферы – 1320°C (HT). При температуре 1360°C наблюдали полное плавление образца (FT).

С помощью программы «TERRA» проведены термодинамические расчеты превращений компонентов золы в диапазоне температур 600-1400°C и давлении 0.1 МПа. Проведен РФА и ИК-спектроскопия экспериментальных образцов золы ТКО и ОСВ. Показано сравнение расчетов и экспериментальных данных.

Характеристики золы ТКО и ОСВ и знание характерных температур плавления золы будут полезны при эксплуатации энергетических установок по сжиганию отходов.

Измерения химического состава, РФА и ИК-спектроскопия золы ТКО и ОСВ выполнены в АЦКП ИПХФ РАН.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-08-00244 и Государственного задания №0089-2019-0018.

ДВУХСТАДИЙНАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА

Карпов А.И., Шаклеин А.А.[@]
УдмФИЦ УрО РАН, г. Ижевск, Россия
[@]shaklein@udman.ru

Работа посвящена изучению процесса распространения пламени по поверхности горючего материала. При численном решении математическая модель общепринято формулируется в предположении макрореакции газофазного горения вида $F + O \rightarrow P$, где F представляет газообразные продукты пиролиза материала. Данный подход эффективен с точки зрения снижения вычислительных затрат на решение задачи по сравнению с применением детальных механизмов, а также позволяет адекватно оценивать макроскопические параметры распространения пламени (скорость распространения, массовую скорость горения, длину области пиролиза). С другой стороны, при детальном сравнении результатов расчетов с использованием макрореакции газофазного горения с измерениями [1] по тепловой структуре газовой фазы в области кромки пламени показано, что максимумы расчетных значений температуры (при рассмотрении распределений вдоль нормали к поверхности горения) смещены ближе к поверхности. Данное наблюдение свидетельствует о том, что зона реакции газофазного горения в экспериментах находится дальше от твердого материала по сравнению с результатами проведенных расчетов.

На основании анализа результатов предложена двухстадийная реакция газофазного горения продуктов пиролиза полимерного материала [2]. Первая стадия заключается в термическом разложении газообразных продуктов пиролиза ($F1$) на низкомолекулярные компоненты ($F2$) в виде $F1 \rightarrow F2$, в рамках второй стадии рассматривается окисление низкомолекулярных компонентов (собственно горение) в виде $F2 + O \rightarrow P$. Кинетические параметры предложенной первой реакции определялись следующим образом. В программном пакете Cantera проведены расчеты по термическому разложению в инертной среде газообразных продуктов пиролиза рассматриваемого полимерного материала с использованием детального кинетического механизма. По зависимости скорости изменения концентрации исходного вещества от температуры определены предэкспонент и энергия активации рассматриваемой

реакции. Также в рамках рассматриваемой постановки задачи получен тепловой эффект реакции.

Проведенные расчеты распространения пламени по поверхности горючего материала (полиметилметакрилата) с использованием двухстадийного механизма реакции газофазного горения показали хорошее согласование с экспериментальными данными как по макроскопическим параметрам, так и по структуре пламени, при этом максимум температуры в распределениях по нормали к поверхности горения оказывается ближе к результатам измерений по сравнению с результатами расчетов в предположении одностадийного механизма горения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-00097).

[1] Korobeinichev O.P., 2019, Proc. Combust. Inst. **37**. 4017-4024

[2] Shaklein A.A., 2019, Fuel. **255**. 115878

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВ В ВОЗДУХЕ

Яновский Л.С.^{1,2}, Байков А.В.^{1,2}, Суриков Е.В.¹, Шаров М.С.^{1,2,@},
Алексеева О.М.¹, Коломенцев П.А.^{1,2}

¹ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», г. Москва, Авиамоторная ул., д. 2

²ФГБУН ИПХФ РАН, г. Черноголовка, М.О., Проспект акад.

Семенова, д. 1

@dep00904@yandex.ru

В докладе представлены результаты анализа огневых испытаний образцов твердого топлива, которые могут быть использованы в летательном аппарате с воздушно-реактивным двигателем. Испытания проводились на стендовой установке с симметричным четырехканальным подводом воздуха в камеру сгорания. Твердое топливо включало в себя окислитель (перхлорат аммония), горюче-связующее вещество (натуральный каучук) и металлическое горючее (сплав бора и алюминия). В качестве критерия эффективности рабочего процесса в камере сгорания принят коэффициент полноты сгорания топлива.

В результате проведенных исследований показана возможность обеспечения эффективного сжигания соединений бора в воздухе. Установлено значительное влияние относительной длины камеры сгорания на эффективность рабочего процесса. При относительной длине камеры сгорания $L/D=9$ и коэффициенте избытка воздуха около 2, коэффициент полноты сгорания достиг значения равного 0,95. Анализ полученных результатов подтвердил правильность выработанных технических решений по повышению полноты сгорания топлива на основе бора в камере сгорания воздушно-реактивного двигателя.

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ БОГАТЫХ МЕТАНОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

Глухов И.С.¹, Шебеко Ю. Н.^{1,@}, Шебеко А. Ю.¹, Зубань А. В.¹
¹ФГБУ ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха Московской области
[@yn_shebeko@mail.ru](mailto:yn_shebeko@mail.ru)

Экспериментально определены характеристики горения богатых смесей CH_4 - воздух при повышенных давлениях. Показано, что максимальное давление взрыва P_{max} вблизи верхнего концентрационного предела распространения пламени (ВКПР) слабо меняется в зависимости от начального давления P_0 . Для содержания метана 15,6% (об.) P_{max} значительно изменяется с увеличением P_0 . Определен состав продуктов горения для смесей вблизи ВКПР для различных P_0 . Найдено, что с ростом содержания CH_4 в смеси концентрации водорода, диоксида углерода и кислорода меняются слабо, в то время как концентрации водяного пара и оксида углерода падают, а концентрация CH_4 значительно растет. Приведено качественное объяснение наблюдаемых результатов, заключающееся в следующем. С ростом P_0 уменьшается пороговая температура, начиная с которой скорость сажеобразования существенно возрастает. При увеличении P_0 удельное (на 1 моль CH_4) содержание O_2 , необходимое для достижения этой пороговой температуры, падает, а величина ВКПР возрастает. Отмечено, что кинетика химических превращений для составов вблизи ВКПР существенно иная, чем для бедных и околостехиометрических составов.

$P_0 \cdot 10^{-2}$, кПа	CH_4 , % (об.)	$\Delta P_{max}/$ P_0	Длительность процесса роста давления τ , с
1	15,0	4,4	0,16
11	20,0	4,7	2,40
21	24,0	4,5	4,00
30	28,0	4,6	6,10

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭМУЛЬСИЙ (РАСПЛАВОВ) В УСЛОВИЯХ ГРАВИТАЦИОННОГО СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Шкадинский К.Г.¹, Озерковская Н.И.²

¹Институт проблем химической физики РАН,

²Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
РАН

shkad@icp.ac.ru

Теоретически изучается влияние гравитационных сил на процессы экзотермического химического превращения (горения) порошковой смеси сжатой в твердый образец. При горении высокая температура разрушает твердое состояние из-за плавления компонент смеси. В таких условиях формируется и распространяется фронт расплава жидких частиц компонентов смеси. Под воздействием гравитационных сил (или центробежных сил в реакторе, помещенном в центрифугу) возникает относительное движение компонент. Процесс высокотемпературного синтеза происходит в условиях сепарации продуктов горения (керамики и целевого металла), которые влияют на состав и макрокинетику химического взаимодействия.

С помощью разработанной математической модели изучаются процессы, которые используются в высокотемпературном синтезе для производства целевых продуктов в волне горения исходного состава. Для них характерно объединение в одном технологическом приёме высокотемпературного горения с образованием жидких продуктов, их сепарации и последующего охлаждения. Предложенная математическая модель описывает горение двухкомпонентного расплава (керамики и металла) в условиях гравитационного воздействия. Предполагалось, что каждая из компонент смеси имеет двухкомпонентный химический состав. В качестве “физического ориентира” рассматривается алюмотермическое взаимодействие в смеси: $3\text{NiO} + 2\text{Al} \rightarrow \text{W, Q} \rightarrow 3\text{Ni} + \text{Al}_2\text{O}_3$. Учитывалось активное поглощение кислорода расплавленным алюминием, скорость поглощения от температуры описывалась законом Аррениуса.

Математическая модель учитывает основные силовые воздействия при движении компонент смеси: объёмные силы гравитационного воздействия с ускорением \mathbf{g} (или центробежные силы), силы вязкого трения из-за разноскоростного движения

керамики и металла, изменение импульса, обусловленное массообменом между керамикой и металлом, наличие градиента давления. В модели используется упрощенная модель фазовых переходов (ступенчатая зависимость от температуры), затраты тепла на фазовый переход пренебрежимо малы по сравнению с экзотермическими процессами химического взаимодействия. В процессе горения не учитываются внешние теплотери и возможная газификация компонент смеси при экстремально высоких температурах.

Предложен метод приближенного обобщенного решения системы, позволяющей исследовать пространственно–временную динамику температуры, скоростей движения металла и керамики, концентраций компонент смеси в процессе инициирования и распространения фронта. Изучены процессы сепарации многокомпонентной смеси в процессе инициирования горения. Показано, что на этом этапе во фронте создаётся избыток энтальпии, который сохраняется и передвигается вместе с фронтом в многокомпонентной смеси. По мере движения фронта синтеза меняется химический состав среды, её плотность, которые в свою очередь, изменяют распределение силового воздействия на многокомпонентную среду. В зависимости от дальнейшего температурного состояния продуктов осуществляется их сепарация, т.е. расслоение. Более тяжелая группа металла центробежными силами прижимается к фронту, ее экранирует от внешней среды более легкая группа керамики. Алюминий плавится в зоне прогрева фронта, вытесняет внутривещной газ и активно взаимодействует с ним по мере роста температуры во фронте. Образовавшийся в зоне реакции окисел алюминия, выталкивается более тяжелым сплавом никеля и алюминия в приповерхностную зону. В результате сепарации после сгорания смеси в придонной части реактора сосредоточена тяжелая металлическая фаза. За ней располагается керамика, которая защищает металлическую фазу от контакта с газовой средой. Будучи самой легкой, газовая фаза вытесняется из расплава.

Представленная математическая модель позволяет оценить условия процесса наплавки продуктов горения на материал, предварительно помещенный в качестве основания на дно реактора. Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ №19-03-00088.

МАТЕРИАЛООБРАЗУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ: СВС-МЕТАЛЛУРГИЯ

Юхвид В.И.[@], Андреев Д.Е., Вдовин Ю.С.

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мерджанова РАН*

[@]yukh@ism.ac.ru

В середине 19 века Н.Н. Бекетов провел исследование активности металлов в химических процессах, результаты которого стали основой алюминотермии. Одним из приложений этих работ стало получение ферросплавов и лигатур. В России эти работы были обобщены в монографии академика Н.П. Лякишева с коллегами. В 60 – 70 годы прошлого столетия на основе работ по безгазовому горению академик А.Г. Мержанов и его научная школа разработали технологию Самораспространяющегося Высокотемпературного Синтеза тугоплавких неорганических соединений (СВС). Одним из научных направлений СВС является СВС-металлургия, основанная на достижениях металлотермии и СВС [1].

В СВС-металлургии используют высокоэкзотермические смеси оксидов металлов с активными восстановителями и неметаллами (смеси термитного типа). Такие смеси способны гореть. Целевыми продуктами горения смесей являются карбиды, бориды, силициды, оксиды металлов, композиционные материалы на их основе и сплавы. Температура горения смесей может превышать температуру плавления конечных продуктов, что позволяет получать их в литом виде. СВС-металлургия включает 3 последовательные стадии: 1 – горение, 2 – гравитационная сепарация металлического и оксидного продуктов горения, 3 – формирование состава и структуры литых продуктов. Образование и удаление из расплава газообразных продуктов (пары металлов, субоксиды и др.) при горении сопровождается разбросом смеси. Разброс подавляется воздействием давления газа или перегрузкой, поэтому процессы СВС-металлургии осуществляют в реакторах или центробежных установках. Ниже приведены результаты последних лет по исследованию возможности получения литых композиционных материалов (ЛКМ) на основе NiAl, TiAl и Mo-Si-B методами СВС-металлургии [2-4]. Согласно зарубежным и российским публикациям эти материалы обладают высокими жаропрочностью и жаростойкостью и перспективны для создания новой техники различного назначения.

Термодинамический анализ.

Для синтеза NiAl, TiAl и Mo-Si-B используют смеси NiO+Al, TiO₂+Al и MoO₃+Al. Термодинамические расчеты по программе «Термо» показали, что температура горения смесей NiO+Al и MoO₃+Al высокая, 3100 К и 3800 К соответственно. Высокая температура позволяет вводить в смеси легирующие и функциональные добавки и получать литые композиционные материалы. Напротив, расчетная температура смеси TiO₂+Al не велика (T_г = 1500 К) и для получения литых композиционных материалов на основе Ti в нее необходимо вводить высокоэнтальпийные добавки.

Результаты экспериментальных исследований.

При изложении результатов исследований основное внимание уделено горению и автоволновому химическому превращению. Эксперименты проводили в центробежных установках различных конструкций под воздействием перегрузки от 10 до 400 g, где g – ускорение свободного падения. Смесей сжигали в прозрачных кварцевых стаканчиках, графитовых или стальных футерованных тугоплавкими оксидами формах. Масса смеси в кварцевых стаканчиках составляла 20 – 40 г, а в графитовых и стальных формах – от 1 до 5 кг. Кварцевые стаканчики использовали для проведения видеосъемки и определения скорости горения, изучения закономерностей и механизмов СВС-металлургии. Графитовые и стальные формы для наработки опытных партий.

В рассмотренных ниже примерах составы на основе NiO/Al, TiO₂/Al и MoO₃/Al являются базовыми для проведения исследований. На основе базовых составов формировались исходные смеси для получения ЛКМ.

Синтез ЛКМ на основе NiAl. Для синтеза ЛКМ на основе NiAl, легированного Cr и Co использовали смеси NiO, Cr₂O₃, CoO и Al, с соотношением реагентов, рассчитанных по стехиометрическим уравнениям. В атмосферных условиях горение смеси сопровождается интенсивным разбросом продуктов горения (диспергированием). При горении под воздействием перегрузки (в центрифуге) разброс подавляется, а продукты горения имеют вид литого двухслойного слитка с четким разделением слоев: верхний (более легкий слой) оксид алюминия, нижний (более тяжелый слой) – целевой продукт – ЛКМ (Ni-Al-Cr-Co). С ростом перегрузки скорость горения и выход целевого продукта в слиток возрастают, а разброс уменьшается, рис. 1. По данным химического анализа ЛКМ, полученный при a = 100 g,

содержит 55,9 % Ni, 19,9% Al, 15,2% Cr и 8,5 % Co (вес. %) Рентгенофазовый и микроструктурный анализы показали, что Ni и Al образуют фазу NiAl, а Co растворяется в Cr с локализацией по границам зерен NiAl.

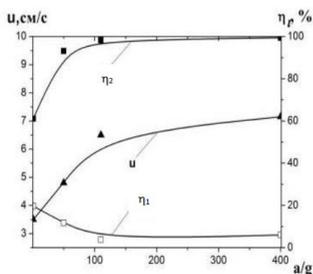


Рис. 1. Влияние перегрузки (а/г) на скорость горения (u), выход ЛКМ в слиток (η₁) и разброс смеси при горении (η₂). Исходная смесь: NiO/Cr₂O₃/CoO/Al

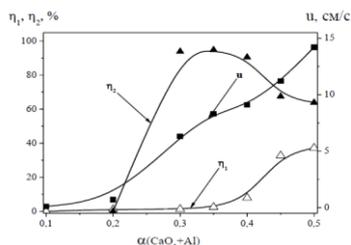


Рис. 2. Влияние содержания (CaO₂/Al) (α) на скорость горения (u), выход ЛКМ в слиток (η₁) и разброс смеси при горении (η₂). Исходная смесь: TiO₂/Cr₂O₃/Nb₂O₅/Al/Ca+A (CaO₂/Al).

Синтез ЛКМ на основе TiAl. Термитная смесь для синтеза ЛКМ на основе TiAl включает базовый и высокоэнергетический состав: TiO₂/Cr₂O₃/Nb₂O₅/Al/Ca+α(CaO₂/Al). При введении энергетического состава более 10% смесь приобретает способность к горению, а при достаточном его содержании продукты горения, ЛКМ (Ti–Al–Cr–Nb) и оксидный раствор (Al₂O₃×CaO), плавятся. С ростом доли Ca в составе базовой смеси полнота восстановления TiO₂ возрастает. При оптимальном соотношении Ca и Al в смеси выход целевых элементов в слиток близок к расчетному значению. С увеличением доли энергетического состав скорость горения возрастает, а полнота выхода ЛКМ в слиток проходит через максимум, рис. 2, достигая в максимуме 90 вес. %. Введение энергетической смеси более 50 % не целесообразно, поскольку горение протекает с большим разбросом смеси.

Синтез ЛКМ на основе Mo, легированного Si и В. Горение смеси (MoO₃/Al/Si/B) в атмосферных условиях без перегрузки протекает с полным выбросом продуктов горения из кварцевого стаканчика. Разброс удается подавить, воздействием перегрузки, а также используя комбинацию «высокоэкзотермической» термитной и «низкоэкзотермической» элементной смесей, (MoO₃/Al/Si/B)+α(Mo/Si/B), Предел горения этой смеси достигается

при $\alpha = 80\%$, а предел гравитационной сепарации при $\alpha = 60\%$. С ростом перегрузки от 1 до 400 g скорость горения u и выход ЛКМ в слиток возрастают, а разброс заметно уменьшается, рис. 3а. Перегрузка слабо изменяет химический состав ЛКМ: с увеличением a/g от 1 до 400 можно отметить слабый рост содержания Mo и B и слабое падение всех других элементов, рис. 3б.

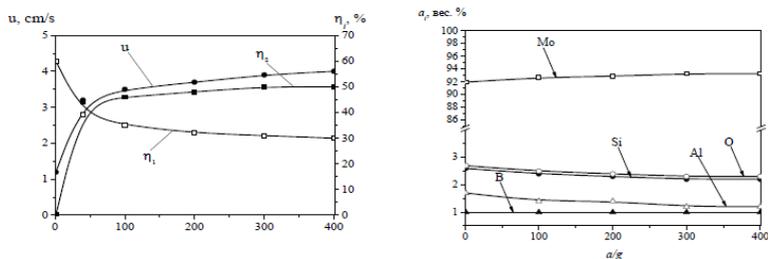


Рис. 3. Влияние перегрузки на параметры горения (а) и химический состав ЛКМ (б). (u) – скорость горения, (η_1) – выход ЛКМ в слиток, η_2 – разброс смеси при горении. Исходная смесь: $\text{MoO}_3/\text{Al}/\text{Si}/\text{B}+30\%(\text{Mo}/\text{Si}/\text{B})$

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 18-08-00228.

- [1] Yukhvid V.I., 1992, Modification of SHS - processes. Pure and Appl.Chem., no. 7, p. 977-988.
- [2] Yuhvid V.I., Alymov M.I., Sanin V.N, Andreev D.E., 2016, SHS Metallurgy of NiAl Based Alloy. Key Engineering Materials, Vol. 684, pp 353-358.
- [3] Юхвид В.И., Андреев Д.Е., Икорников Д.М., Санин В.Н., Сачкова Н. В., Ковалев И.Д., 2019, Горение термитных систем на основе оксида титана с комплексным восстановителем и энергетической добавкой под воздействием перегрузки. ФГВ, №6, с. 43-49.
- [4] Vdovin Yu.S., Andreev D.E., and Yuhvid V.I., 2019, Mo-Based Composites Reinforced with Nb, Si, and B by Metallothermic SHS under Artificial Gravity. Int. J. SHS, no. 4, pp. 274-275.

О МЕХАНИЗМЕ ГОРЕНИЯ МИКРОННЫХ И НАНОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ БОРА В ВОЗДУХЕ

Шпара А.П., Д.А. Ягодников[@], А.В. Сухов
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
[@]daj@bmstu.ru

Создание летательных аппаратов с улучшенными характеристиками требует решения целого ряда задач, в том числе связанных с разработкой новых рецептур топлив ракетных и ракетно-прямоточных двигателей. Одним из способов повышения характеристик топливных составов является использование металлов (магния, алюминия, бора) и их соединений, что, однако, имеет свои недостатки, обусловленные большими значениями характерных времен преобразования и, соответственно, невысокой полнотой их сгорания, особенно борсодержащих горючих компонентов. Поэтому одно из основных направлений решения задачи сжигания бора с требуемой полнотой сгорания в ограниченных габаритах, которое представляется наиболее перспективным, - уменьшение размера частиц до минимально возможного с точки зрения технологии изготовления, вплоть до нанодиапазона.

С целью снижения затрат на дорогостоящую экспериментальную отработку новых топливных композиций с высоким содержанием соединений металлов представляется целесообразным дополнять ее имитационным моделированием и численными расчётами на ЭВМ. В связи с этим является обоснованной разработка необходимой для составления источниковых членов в системе уравнений баланса массы, энергии, импульса расчетной модели процесса горения частиц с размерами, лежащими на нижней границе микронного и в нанодиапазона.

Большинство известных физических моделей и созданные на их базе расчетные методики основаны на допущении сплошной среды, в рамках которой предполагается, что процессы переноса массы и тепла между газовой средой и твердыми либо жидкими частицами определяются столкновениями между собой молекул реагентов, находящихся в газовой фазе, поскольку длина свободного пробега этих молекул много меньше характерного размера частиц. Однако механизм переноса тепла и массы в процессе горения изменяется, если размер частиц становится сопоставим с длиной свободного пробега молекул реагентов, находящихся в газообразном состоянии.

В данной работе поставлена цель создания простой инженерной методики расчета характеристик горения одиночных частиц бора, учитывающей изменение механизма передачи тепла и массы при уменьшении размера частиц от микро- до нанодиапазона.

В соответствии с поставленной целью разработана математическая модель процесса горения в воздухе одиночной частицы бора микронного и нанодиапазона размеров с учетом изменения механизма тепло- и массообмена при уменьшении размера частиц. В качестве границы перехода от свободномолекулярного механизма теплообмена к другому – моделируемого с помощью положений механики сплошной среды- принято число Кнудсена. Выполнена оценка размеров частиц, при которых реализуется характерный режим, применительно к условиям горения бора в воздухе при давлениях 0,1 - 4 МПа. Получены значения времен горения частицы бора в условиях допущения сплошной среды ($Kn < 0,01$), при свободномолекулярном режиме ($Kn > 10$), которые для последнего более чем на два порядка больше, а также на переходном режиме ($0,01 < Kn < 10$). Показано, что расчетные модели определения времени горения частиц бора с начальными размерами, близкими и микронным и нанодисперсным, должны учитывать изменение механизма переноса тепла и массы при изменении текущего радиуса частицы при выгорании.

Работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ, проект №19-38-90124.

Распространение горения в газовых смесях с взвешенными микрокаплями воды

Киверин А.Д.¹, Яковенко И.С.^{1,@}

¹Объединенный Институт Высоких Температур РАН

@ yakovenko.ivan@bk.ru

Исследование возможных путей ослабления волн горения, вплоть до их полного тушения, является первостепенной задачей физики горения и взрыва. На сегодняшний день, использование огнетушащих веществ, зарекомендовало себя как одно из наиболее эффективных средств по прекращению горения. В качестве огнетушащего вещества, благодаря высокой удельной теплоемкости и теплоте парообразования, наибольшее распространение получила вода [1]. В ряде работ была продемонстрирована высокая эффективность использование капель воды для ослабления широкого спектра возможных режимов распространения пламени. Так, распыл капель воды в горючей газовой смеси позволяет добиться тушения дефлаграционного горения [2], уменьшает темпы ускорения пламени и замедляет процесс перехода от медленного горения к детонации [3].

Для успешного тушения пламени путем добавления в газовую смесь капель воды необходимо обеспечить наибольшую длительность пребывания капель в области зоны реакции. В этом случае испарение капель происходит непосредственно во фронте реакции и таким образом достигается наиболее эффективное разбавление свежей смеси водяным паром и теплоотвод. Мелкие капли легко подхватываются потоком, формируемым перед фронтом горения, и практически не взаимодействуют с зоной реакции. В то же время крупные капли обладают большой инерцией, и пламя обгоняет капли, что снижает время нахождения капель в зоне реакции. Испарение крупных капель протекает в области продуктов горения, что обеспечивает их охлаждение, но не всегда приводит к тушению пламени. Таким образом, эффективность тушения волн горения каплями воды во многом определяется газодинамическими особенностями процесса, а оптимальные параметры распыления капель индивидуальны для различных условий протекания процесса горения.

При использовании капель воды возможен также и обратный эффект увеличения интенсивности горения. Так, впрыск капель воды и их обтекание потоком сопровождается генерацией газодинамических возмущений, которые могут вызвать крупномасштабную турбулизацию среды, и тем самым обеспечить ускорение пламени. Ускорение пламени может быть вызвано и непосредственно взаимодействием капель с фронтом горения. Так, численные эксперименты показали, что присутствие капель в газовой смеси приводит к интенсификации развития газодинамической неустойчивости фронта пламени и генерации мелкомасштабных возмущений на его поверхности [4]. Данный механизм обеспечивает рост скорости распространения пламени, вне зависимости от конкретного способа добавления капель в газовую среду. В рамках настоящей работы были проведены детальные двухмерные вычислительные эксперименты по взаимодействию пламени с массивом водных капель в замкнутом объеме. Результаты расчетов показывают, что присутствие взвешенных микрокапель воды в обеденной смеси водорода с воздухом (15% H_2) приводит к существенной интенсификации процесса сгорания газовой смеси. Интенсификация горения происходит наиболее существенно, в том случае если характерное расстояние между каплями соответствует критической длине волны гидродинамической неустойчивости, что согласуется с механизмом ускорения пламени за счет интенсификации неустойчивости на фронте горения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-38-20079

[1] Grant G., Brenton J., Drysdale D., 2000, Prog. Energy Combust. Sci. **26**. 79-130.

[2] Thomas G.O., Jones A., Edwards M.J., 1991, Combust. Sci. Technol. **80**. 47-61.

[4] Boek L., et. al., 2015, Int. J. Hydrogen Energy, **40**, 6995-7004.

[5] Nicoli C., Haldenwang P., Denet B., 2019, Combust. Sci. Technol. **191**. 197-207.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЯЧЕЙСТЫХ ПЛАМЕН В УЗКОМ ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ПЛАСТИНАМИ

Алексеев М.М.¹, Семенов О.Ю.¹, Якуш С.Е.^{2@}, Борисов В.Е.³

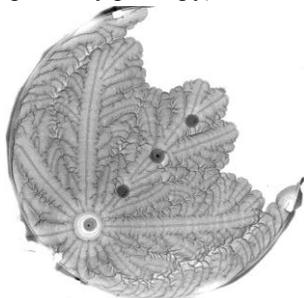
¹Сургутский государственный университет

²Институт проблем механики им. А.Ю.Иилинского РАН

³Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН
@yakush@ipmnet.ru

Распространение пламени по предварительно перемешанной смеси сопровождается образованием ячеек вследствие проявления неустойчивостей различного типа (гидродинамической, диффузионно-тепловой и др). Изучение ячейчатых пламен при горении между параллельными пластинами дает уникальные возможности визуализации динамической картины образования, распространения и исчезновения ячеек по сравнению с трехмерными конфигурациями.

В работе приведены результаты экспериментов по горению пропановоздушных смесей в зазоре шириной 2-6 мм между стеклянными пластинами диаметром 60 см при искровом зажигании в одной или двух точках. Методом фотографии с длительной выдержкой получены снимки, позволяющие наблюдать ячейчатую структуру пламени и траектории движения угловых точек (складок). Обработка результатов экспериментов позволила установить статистические характеристики ячеек (скорость распространения, распределение по поперечному размеру) в зависимости от ширины зазора.



Траектории угловых точек

На основе детальной кинетической схемы горения метана выполнено численное моделирование распространения пламени в зазоре между близко расположенными холодными пластинами, получена концентрационно-тепловая структура ячеек пламени и рост амплитуды возмущений.