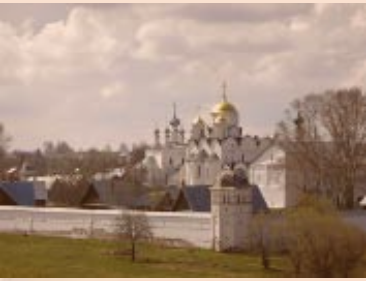
Российская академия наук
Научный Совет РАН по горению и взрыву

ТЕЗИСЫ
XVIII Всероссийского симпозиума по горению и взрыву

Суздаль 2026







Российская академия наук
Научный Совет РАН по горению и взрыву

ТЕЗИСЫ

XVIII Всероссийского симпозиума по горению и взрыву

Тезисы XVIII Всероссийского симпозиума по горению и взрыву

В сборнике представлены тезисы докладов XVIII Всероссийского симпозиума по горению и взрыву (Суздаль, 20 – 25 сентября 2026 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 быстропротекающих процессов в реагирующих средах; промышленные и технологические процессы на основе горения и взрыва; проблемы безопасности и экологии.

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

Научный партнер Симпозиума - журнал "Химическая физика".

ISBN 978-5-91845-133-5

ISBN 978-5-91845-133-5

9 785918 451335 >

ОГЛАВЛЕНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

ТЕРМОДИНАМИКА ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА, КИНЕТИКА ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Астахов А.М. КРИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА АЗАКУБАНОВ 13
Голуб ВВ. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ФРОНТА ПЛАМЕНИ В КАНАЛЕ СУБКРИТИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ С ШЕРОХОВАТЫМ ПОКРЫТИЕМ 15
Пашкевич Д.С. ПОЛУЧЕНИЕ ФТОРИДА ВОДОРОДА ПРИ ФАКЕЛЬНОМ ГОРЕНИИ ПОЛИФТОРИДА АММОНИЯ В КИСЛОРОДЕ 16
Капустин В.В. СТАБИЛЬНОСТЬ ФТОРИДА ВОДОРОДА ВО ФРОНТЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ УГЛЕРОДА В КИСЛОРОДЕ В ПРИСУТСТВИИ ПАРОВ ВОДЫ 18
Кожевин Д.Ф. ФУРЬЕ-АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ «КОРОННОГО» ПЛАМЕНИ И ИХ СВЯЗЬ С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ ЦИКЛОИДЫ 20
Моногаров К.А. ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЕ ПОЛИМЕРЫ КАК ОСНОВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ 22
Назаров Д.В. СЖАТИЕ МЕТАЛЛОВ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ 24
Николаева Е.В. МЕХАНИЗМЫ ТЕРМОРАСПАДА 2-, 3- и 4-НИТРОФЕНОЛОВ ПО ДАННЫМ КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА 26
Солодовникова Ж.А. УСЛОВИЯ И ХРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ДРЕВЕСНО-УГОЛЬНЫХ ПЕЛЛЕТ ПРИ КОМБИНИРОВАНОМ НАГРЕВЕ 28
Солодовникова Ж.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОХВАТА ПЛАМЕНЕМ ЧАСТИЦ БИОТОПЛИВ 29
Тереза А.М. САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ СМЕСЕЙ H2-O2-AR В ПРИСУТСТВИИ МАЛЫХ ДОБАВОК КАРБОНИЛОВ МЕТАЛЛОВ ЗА ОТРАЖЕННЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ 31
Усанов В.А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТВЕРДОГО ЛЕГКОПЛАВКОГО

ТОПЛИВА С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ РЕАКТОРА ИДЕАЛЬНОГО СМЕШЕНИЯ 33
Яковлев С.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ ИЗ ДЕФЛАГРАЦИИ В ДЕТОНАЦИЮ 36

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ, ГОРЕНИЕ И ДЕТОНАЦИЯ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ, СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ
Варламов Е.С. ОСОБЕННОСТИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ДИАЗОДИНИТРОФЕНОЛА ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ 39
Ватницкий О.А. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ С ПЕРХЛОРАТНЫМ ОКИСЛИТЕЛЕМ В ТРУБКЕ ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ, ОТКРЫТОЙ С ОДНОГО ТОРЦА 41
Вилков В.В. УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ И ДЕТОНАЦИЯ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОЙ СМЕСИ НИТРОМЕТАНА С АЗОТНОЙ КИСЛОТОЙ 43
Волкова Н.Н. СОЛИ КЛАСТЕРНЫХ БОРОВОДОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КАК КОМПОНЕНТЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ 44
Герасимов С.И. КИНЕТИКА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ АЛЮМИНСОДЕРЖАЩЕГО ЗАРЯДА ВВ 46
Димухаметов Р.Р. ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ХИНОНДИАЗИДА НА ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ ФОСФОРСОДЕРЖАЩИХ СМЕСЕЙ 47
Долгобородов А.Ю. МЕХАНОАКТИВАЦИЯ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ СОСТАВОВ ОКИСЛИТЕЛЬ – ГОРЮЧЕЕ 49
Жуков А.Н. УДАРНО-ВОЛНОВОЙ СИНТЕЗ ВЫСШЕГО БОРИДА ВОЛЬФРАМА 50
Зубарева А.Н. СТРУКТУРА ФРОНТА УДАРНЫХ ВОЛН В ЭМУЛЬСИОННЫХ ВВ ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ 51
Зубачева Е.К. ПОЛУЧЕНИЕ СОКРИСТАЛЛОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ СУБЛИМАЦИИ 53
Карпова А.А. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОЙ СМЕСИ ПОРИСТЫЙ КРЕМНИЙ — ПЕРХЛОРАТ БАРИЯ В ОТКРЫТЫХ КАНАЛАХ ДЛИНОЙ 15 И 17 СМ 54
Козулин А.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ ТЯЖЕЛОГО БЕТО-

НА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ 56
Котов Н.О. КИНЕТИКА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДНЫХ ФУРАЗАНА 58
Крыкин М.Д. ПЛАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ..... 60
Левшенков А.И. ДЕТОНАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ТРИНИТРОАРОМАТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗАРЯДАХ ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ 61
Манахова Е.С. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРГАНИЧЕСКИХ ХЛОРСОДЕРЖАЩИХ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ..... 63
Михайлов А.В. ДЕТОНАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ СМЕСЕЙ АММИАЧНОЙ СЕЛИТРЫ С ДИЗЕЛЬНЫМ ТОПЛИВОМ ПРИ РАЗЛИЧНОМ СООТНОШЕНИИ КОМПОНЕНТОВ 64
Михальченко Е.В. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРАТИФИКАЦИИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ..... 66
Мочалова В.М. ВЛИЯНИЕ МИКРОСФЕР И ДИЭТИЛЕНТРИАМИНА НА ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В НИТРОМЕТАНЕ 68
Мочалова В.М. ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ СЖИМАЕМОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ..... 70
Назарова А.А. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ..... 72
Ниезбеков Н.Н. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ УДАРНО-СЖАТОГО ГАЗА В СВАРОЧНОМ ЗАЗОРЕ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ..... 73
Николаев Д.Н. УДАРНОЕ СЖАТИЕ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА ДО ДАВЛЕНИЯ 650 ГПА 75
Озеров А.Ю. ВЗРЫВЫ АНДЕЗИТОВЫХ МАГМ: ВЕЩЕСТВО, ДИНАМИКА, МЕХАНИЗМ..... 76
Рапота Д.Ю. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА МНОГОТОЧЕЧНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕХОДА К ТРЁХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ОБЖАТИЯ МНОГОВИТКОВОГО СОЛЕНОИДА..... 78
Синдицкий В.П. МЕХАНИЗМ ГОРЕНИЯ НИТРОСОДЕРЖАЩИХ ОКИСЛИТЕЛЕЙ..... 80
Смирнова А.Д. ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ N-АЗАПРОИЗВОДНЫХ ПИРАЗОЛА 82
Ткаченко В.В. РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ СВАРКИ ВЗРЫВОМ ЗА СЧЁТ ПЕРЕМЕННОЙ ВЫСОТЫ ЗАРЯДА 84

Устинов С.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В ВВ АЗИД ТАЛЛИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 86
Федоров А.В. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ 88

МАКРОКИНЕТИКА И ГАЗОДИНАМИКА РЕАГИРУЮЩИХ СИСТЕМ, НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА
Антипов М.С. ВЛИЯНИЕ НИХРОМА И ВОЛЬФРАМА НА ТЕМПЕРАТУРУ И СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ В СИСТЕМЕ Ti+C 89
Бакешко А.В. РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ ТРЁХКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ CuO – Ti – Al 91
Бакешко А.В. СИНТЕЗ БОРИДОВ И СИЛИЦИДОВ ЖЕЛЕЗА, КОБАЛЬТА И НИКЕЛЯ В ВОЛНЕ ГОРЕНИЯ ГЕКСОГЕНА 93
Забавин Е.В. ПРИМЕНЕНИЕ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ... 95
Иванов А.С. ПРИМЕНЕНИЕ СВС-ЭЛЕКТРОДОВ НА ОСНОВЕ TIC-NICR-W, ПОЛУЧЕННЫХ СВС-ЭКСТРУЗИЕЙ, В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ 96
Кириллов А.О. ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СТЕРЖНЕЙ ГОРЯЧЕЙ ГАЗОВОЙ ЭКСТРУЗИЕЙ МЕХАНИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОЙ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ nNi+Al 98
Куликова А.Е. ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Ti-Si-C С ДОБАВЛЕНИЕМ ZrC МЕТОДОМ СВОБОДНОГО СВС-СЖАТИЯ 100
Лазарев П.А. ПРИМЕНЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОНСОЛИДАЦИИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА Ti20Al3Si9, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СВС 102
Пашкевич Д.С. ПОЛУЧЕНИЕ ТРИФТОРИДА КОБАЛЬТА В САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕМСЯ ТЕПЛОВОМ ФРОНТЕ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ФТОРА СКВОЗЬ НЕПОДВИЖНЫЙ СЛОЙ ДИФТОРИДА КОБАЛЬТА 104
Ромазева К.А. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ДИФФУЗИОННОЕ АЛЮМИНИРОВАНИЕ КАК МЕТОД МОДИФИКАЦИИ СВС-ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРЕКУРСОРОВ КАТАЛИЗАТОРОВ 108

Садикова Е.В. ИССЛЕДОВАНИЕ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ТЕПЛОВОГО ФРОНТА ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ЭТИЛЕНА СКВОЗЬ НЕПОДВИЖНЫЙ СЛОЙ ТРИФТОРИДА КОБАЛЬТА 110
Семенчук И.Е. ПОЛУЧЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОГО ПОРОШКА УЛЬТРАТУГОПЛАВКОГО КАРБИДА Ta_4HfC_5 МЕТОДОМ СВС И ПЛАЗМЕННОЙ СФЕРОИДИЗАЦИИ 112
Сивакова А.О. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ Fe-Mn И Cu-Mn, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АЛЮМИНОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ .. 114
Смирнов А.В. ЗАЖИГАНИЕ ВТОРОГО РЕАКЦИОННОГО СЛОЯ ПРИ ТЕРМИЧЕСКИ СОПРЯЖЕННОЙ СВС-НАПЛАВКЕ 116
Столин П.А. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ 2Ti-Al-C С ДОБАВКОЙ БОРА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СВОБОДНОГО СВС-СЖАТИЯ 118
Царев М.В. ПРИМЕНЕНИЕ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ 120

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЗИКИ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА
Беляев П.Е. ВАЛИДАЦИЯ БАРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРИ ДЕТОНАЦИИ В ВОДОРОД-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ 121
Боровик К.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЁРДОГО ПОРИСТОГО ГОРЮЧЕГО В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРАХ С ПЕРЕМЕННЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ... 123
Ванькова О.С. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ АММИАКА И ВОДОРОДА 125
Гришунов В.В. МЕХАНИЗМ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ В КОНТАКТЕ С ОКИСЛИТЕЛЕМ 127
Забусов П.В. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕТОДИКЕ ЛЭГАК ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАДИАЛЬНОМУ И ТОРЦЕВОМУ МЕТАНИЮ МЕДНОЙ ОБОЛОЧКИ ВЗРЫВОМ АЛЮМИНИЗИРОВАННОГО ВВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА 129
Калабин Е.В ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКТОРА ПАРОКИСЛОРОДНОЙ КОНВЕРСИИ МЕТАНА 131
Касьяненко Д.Л. УПРАВЛЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕМ ДЕТОНАЦИИ В СКВАЖИННОМ ЗАРЯДЕ ВВ 133

Киселев В.Г. ТЕРМОХИМИЯ И КИНЕТИКА РАЗЛОЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ: КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ РАСЧЕТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МОДИФИКАЦИЙ МЕТОДА СВЯЗАННЫХ КЛАСТЕРОВ 135
Кошлаков В.В. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА БАЗЕ НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ ОСОБЕННОСТЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ 136
Крайнов А.Ю. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА 138
Лемперт Д.Б. КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ГАЗОФАЗНЫХ ЭНТАЛЬПИЙ ОБРАЗОВАНИЯ РЯДА ПРОИЗВОДНЫХ БИС(ТЕТРАЗОЛО)1,2,4-ТРИАЗИНОВ 139
Мельников И.Н. ТЕСТИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНТАЛЬПИИ СУБЛИМАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ 141
Моисеева К.М. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ МИКРОСТРУЙ ВОДОРОДА 142
Размыслов А.В. АНАЛИЗ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА РЕАКТОРА МАТРИЧНОЙ КОНВЕРСИИ МЕТАНА В СИНТЕЗ-ГАЗ МЕТОДАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ 143
Сальников С.Е. МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ ИСТЕЧЕНИЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА ИЗ ВОДЫ В АТМОСФЕРУ ПРИ АВАРИЯХ ПОДВОДНЫХ НЕФТЕГАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ 144
Самойленко Н.Г. О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА СИСТЕМ С ПОЛИХРОННОЙ КИНЕТИКОЙ 148
Смирнов Н.Н. ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ 149
Смыгалина А.Е. ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ВОДОРОДНО-МЕТАНОВЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ В ПРОСТРАНСТВО С ПРЕГРАДОЙ 151
Султанов В.Г. ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ В ФИЗИКЕ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ В ГАЗОВЫХ И КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ 153
Сыродой С.В. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА ХАРАКТЕР ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ЧАСТИЦЫ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ 154

Титова В.Б. КАЛИБРОВКА УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА НА ОСНОВЕ ТРИАМИНОТРИНИТРОБЕНЗОЛА НА ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО РАЗЛЕТУ МЕДНЫХ ТРУБОК ДИАМЕТРОМ 20 ММ 156
Тропин Я.В. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ВЫХОДЕ ИЗ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ..... 157
Трутнева Л.И. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 159
Тюренкова В.В. ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ ЖИДКОГО КИСЛОРОДА В АТМОСФЕРЕ ГАЗООБРАЗНОГО ВОДОРОДА 160
Федорова Т.А. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ФРОНТА ПЛАМЕНИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА С ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ И КИСЛОРОДОМ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ ГОРЕНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМ ФТОР-АММИАЧНЫМ ФАКЕЛОМ..... 161
Часовской А.П. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ЗАРЯДА ТВЁРДОГО ТОПЛИВА С ПОМОЩЬЮ УРАВНЕНИЯ ЭЙКОНАЛА..... 163
Ширшова М.О. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПОРОХОВ В ПРОГРАММНОМ МОДУЛЕ «ЛОГОС ПРОЧНОСТЬ» ПАКЕТА ПРОГРАММ «ЛОГОС» 165
Ягодников Д.А. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ГАЗОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ ПОРОШКООБРАЗНОГО МАГНИЯ В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ 166
Яковенко И.С. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ФРОНТА ГОРЕНИЯ ОБЕДНЕННЫХ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ 169
Якуш С.Е. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЯЧЕИСТОГО ПЛАМЕНИ В КАНАЛЕ ХЕЛЕ-ШОУ 170

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В РЕАГИРУЮЩИХ СРЕДАХ

Бородин Д.В. СУБМИКРОСЕКУНДНАЯ 16-ТИ КАДРОВАЯ ВИДЕОКАМЕРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРЫХ ПРОЦЕССОВ..... 172
Воронин А.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПАРОКИСЛОРОДНОГО РИФОР-

МИНГА МЕТАНА 174
Головастов С.В. САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ СТРУИ ВОДОРОДА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ИСТЕЧЕНИИ В ПОЛУОТКРЫТОЕ ПРОСТРАНСТВО 175
Губарев Ф.А. СКОРОСТНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ 176
Калашников Д.А. СПОСОБЫ УВЕЛИЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ БАЗЫ РЕГИСТРАЦИИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА .. 178
Кондрашов Д.А. КОМПЛЕКС МЕТОДОВ ПРОНИКАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭУ ПРИ ОСИ 180
Медведев С.П. ОЦЕНКА НОРМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ УЛЬТРА- БЕДНЫХ СМЕСЕЙ ВОДОРОД-ВОЗДУХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВСПЛЫВАЮЩЕГО ПЛАМЕНИ 182
Мееров Д.Б. ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К УДАРУ 183
Янковский Б.Д. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЗОНЫ РЕАКЦИИ ТЕРМИТНОЙ СМЕСИ Al/CuO 185

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ НАУКИ О ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

ГОРЕНИЕ В АВИАЦИОННЫХ, РАКЕТНЫХ И ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Иванов В.С. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ В СИСТЕМАХ РЕАКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ 187
Кириленко В.Г. МИКРОТРАСТЕРЫ С ТОПЛИВОМ НА ОСНОВЕ НАНОТЕРМИТОВ 189
Сметанюк В.А. ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННАЯ ФОРКАМЕРА ДЛЯ ЗАЖИГАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОТОКА 191
Шостов А.К. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОНДЕНСИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ С ДИБОРИДОМ АЛЮМИНИЯ СВЧ-МЕТОДОМ 193

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Алымов М.И. СИНТЕЗ ГОРЕНИЕМ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ 195

Анцев Г.В. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ..... 196
Ворожцов А.Б. СВОЙСТВА СУБМИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКОВ ГОРЮЧИХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ В ТОМ ЧИСЛЕ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ ПО ТЕХНОЛОГИИ СВС 200
Зимин А.Р. ПОЛУЧЕНИЕ ФТОРОВОДОРОДА ИЗ ОБЕДНЕННОГО ГЕКСАФТОРИДА УРАНА В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ..... 201
Комаров А.А. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ И ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПВВ ДЛЯ ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ 203
Лавров В.В. О ВЗРЫВООПАСНОСТИ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ НИТРАТА АММОНИЯ И МЕТОДАХ ЕЕ ОЦЕНКИ 206
Маркович Д.М. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТУ И ГТД..... 207
Садыков И.А. КУМУЛЯЦИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В КОНУСЕ 209
Соснин В.А. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ..... 211
Стрижак П.А. ГАЗОГИДРАТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ 213
Фецов С.С. О ВЛИЯНИИ ПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ НА ФИЛЬТРАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ ПОРИСТЫХ СРЕД..... 215

НАУКА О ГОРЕНИИ В ИНТЕРЕСАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
Богданова В.В. ОГНЕСТОЙКОСТЬ ТЕРМОВСПЕНИВАЕМОГО СТИРОЛ- АКРИЛОВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, НАПОЛНЕННОГО ИНТЕРКАЛИРОВАННОЙ СЛЮДОЙ..... 216
Болодьян И.А. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ АВАРИЙНЫХ СТРУЙНЫХ ВЫБРОСАХ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ..... 218
Давыдова Л.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНТАКТНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ ГОРЕНИЯ КОМПОЗИТНОГО ОБРАЗЦА УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ МАЛОГО ОБЪЕМА 220
Копылов Н.П. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВИАЦИОННОГО ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ ВОДНЫМИ РАСПЫЛЕННЫМИ СОСТАВАМИ ОГНЕТУШАЩИХ ВЕЩЕСТВ..... 222

Кудашев Ш.Р. ПРЕДЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ЗАЖИГАНИЯ ОБРАЗЦОВ БИТУМА 224
Михалкин В.Н. СКОРОСТЬ ВЫГОРАНИЯ АЦЕТОНА: ЭКСПЕРИМЕНТ И АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ 225
Полетаев Н.Л. О ПРОГНОЗЕ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ВСПУЧИВАЮЩЕЙСЯ ПРИ НАГРЕВАНИИ ПЫЛИ 227
Полетаев Н.Л. ОСОБЕННОСТЬ ВЗРЫВООПАСНОСТИ АЭРОВЗВЕСИ МЕЛАМИНА 229
Рахметулин Б.Ж. ПОВЫШЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ 231
Стаханов В.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СМЕСЕЙ 235
Хасанова Г.Ш ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКТИВНЫХ И ДЕКОРАТИВНО-ОТДЕЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ БЫСТРОВОЗВОДИМЫХ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ (ЮРТ) 238
Шебеко Ю.Н. ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ПОТОКЕ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ 242

НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВ, ЗАНЯТЫХ РАЗРАБОТКОЙ, ПРОИЗВОДСТВОМ И ПРИМЕНЕНИЕМ ВМ
Купцов П.В. ОСОБЕННОСТИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ 244
Муравьев Н.В. ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ: НОВАЯ ХИМИЯ, СТАРЫЕ ВОПРОСЫ 245
Романова Е.В. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ВНЕДРЕНИИ В ПРОИЗВОДСТВО ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТАВОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ 246
Савин П.И. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ДОБЫЧИ СУЛЬФИДСОДЕРЖАЩИХ ГОРНЫХ ПОРОД 249

КРИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА АЗАКУБАНОВ

Астахов А.М.[1,@], Хакимов Д.В.[2], Лемперт Д.Б.[3], Пивина Т.С.[2]

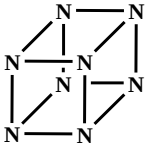
[1]*Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия*

[2]*Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН, г. Москва, Россия*

[2]*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, г. Черноголовка, Россия*

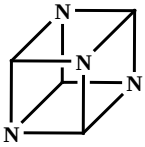
[@] alexastachov@mail.ru

Азакубаны и, в частности, гипотетический октаазакубан (ОАС) давно привлекают внимание как потенциальные ВВ с экстремально высокими энергетическими характеристиками [1, 2]. Ранее, в целом ряде работ уже проводились оценки как детонационных параметров ОАС, так и возможности его применения в качестве основного компонента СТРТ.



ОАС

d 1.546 г/см^3, ΔH^0_f 1809.1 кДж/моль



ТАС

d 1.502 г/см^3, ΔH^0_f 798.8 кДж/моль

В недавней работе [3] получены новые, более надежные, расчетные данные по плотности и энтальпиям образования всех возможных 22 азакубанов. Они заметно отличаются от ранее сделанных оценок. Так, плотность ОАС существенно ниже (1.546 г/см^3), чем заявлялась ранее (2.28-2.69 г/см^3). Величина энтальпии образования (1809.1 кДж/моль) ближе к верхней границе ранее приводимого разными авторами широкого диапазона значений (629.2-2217.5 кДж/моль).

Для ОАС, состоящего только из атомов азота, энтальпия образования фактически равна теплоте взрывчатого превращения – 16.14 МДж/кг (3858.7 ккал/кг). Это очень большая величина, почти в два раза (!) превосходящая теплоту взрыва таких мощных ВВ как тетразинотетразинтетраоксид (TTTO), фуразанотетразиндиоксид (FTDO), динитроазофуроксан (DNAF) или октанитрокубан (ONC).

В настоящей работе представлены результаты оценки энергетических возможностей ОАС с учетом уточненных данных по

плотности и энтальпии образования соединений. Детонационные параметры оценивались термодинамическим методом с уравнением состояния BKW и несколькими корреляционными методами. Также проведен термодинамический расчет составов СТРТ на основе ОАС и пороховых композиций для ствольных систем.

На сегодняшний день не предложено каких-либо разумных путей синтеза ОАС, но можно ожидать, что гораздо менее энергетически напряженный 1,3,5,7-тетраазакубан (ТАС), несомненно, будет получен. Для этого соединения тоже выполнены аналогичные расчеты.

Несмотря на сравнительно низкую для энергоемких соединений плотность, за счет рекордной теплоты взрыва ОАС характеризуется очень высоким значением скорости детонации (до 12 км/с). При этом давление в точке Чепмена-Жуге находится на уровне, характерном для вышеназванных мощных ВВ. Для ТАС результаты значительно скромнее и близки к тротилу, хотя величина его энтальпии образования 7.39 МДж/кг превышает теплоту взрыва таких ВВ, как гексанитрогексаазаизовюрцитан (CL-20), октоген (HMX) или нитроглицерин. Это обусловлено не только низкой плотностью, но и невысоким газообразованием.

Двухкомпонентные композиции ОАС со связующими позволяют в пределе достигнуть очень больших удельных импульсов (до 383 с при $p_c : p_a = 40 : 1$), но ценою совершенно недопустимой для ракетного двигателя температуры в камере сгорания (до 6800К). Увеличивая содержание связующего, можно добиться уменьшения температуры до приемлемого уровня в 3700К. Удельный импульс при этом сильно падает, но все же остается достаточно высоким (до 295.7 с) по сравнению с классическими СТРТ. Для ряда составов наблюдаются проблемы, связанные с образованием значительных количеств конденсированного углерода, источником которого является связующее при недостатке кислорода в системе.

Похожая ситуация наблюдается и для пороховых метательных композиций.

[1] Östmark H. 2006, NTREM. **9.** 231-250.

[2] Колганов Е.В., Смирнов С.П., Смирнов А.С. 2007, IX Харитоновские чтения. 38-46.

[3] Khakimov D.V., Svitanko I.V., Pivina T.S 2024, J. Molec. Model. **30.** 93/1-9.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ФРОНТА ПЛАМЕНИ В КАНАЛЕ СУБКРИТИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ С ШЕРОХОВАТЫМ ПОКРЫТИЕМ

Бивол Г.Ю., Головастов С.В., Голуб В.В.[@]
Объединённый институт высоких температур РАН
[@] victor.v.golub@gmail.com

Распространение фронта пламени в горючих газах определяется рядом факторов, в том числе, шероховатостью покрытия. Особенно этот параметр важен при распространении пламени в канале субкритического сечения, то есть в таком канале, поперечный размер которого сравним с шириной детонационной ячейки. В таких каналах шероховатость влияет не только на степень турбулентности потока несгоревшей смеси и продуктов горения, но и на гидравлическое сопротивление. В настоящей работе изучалось влияние степени шероховатости на распространение горения и детонации в водородно-воздушных смесях в канале, длина которого варьировалась от 480 до 800 калибров. Поперечные размеры канала прямоугольного сечения составляли 5*5 мм.

В зависимости от количества водорода определены скорости фронта пламени и детонации, а также давление на фронте волны. С помощью скоростной камеры получены пространственно-временные диаграммы распространения горения. Приведена динамика скорости для каналов с различной шероховатостью. С помощью теневого метода определены ударно-волновые структуры течения в области горения при измерении состава и шероховатости покрытия

Результаты работы позволили установить нестационарные формы распространения горения и распада детонации. Определена связь между шероховатостью, степенью покрытия, составом смеси и сценарием горения, в том числе его гашением.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00270-26-00).

ПОЛУЧЕНИЕ ФТОРИДА ВОДОРОДА ПРИ ФАКЕЛЬНОМ ГОРЕНИИ ПОЛИФТОРИДА АММОНИЯ В КИСЛОРОДЕ

Пашкевич Д.С.[1,2,@], Капустин В.В.[1,2,5], Баженов Д.А.[3,4], Петров В.Б.[2,5], Камбур П.С.[1,2,5], Олисов М.А.[1], Алексеев Ю.И.[2], Мухортов Д.А.[2], Смолкин П.А[3].

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

[2]ООО «Новые химические продукты». г. Санкт-Петербург, Россия

[3]АО «Сибирский химический комбинат». г. Северск, Россия

[4]ООО «Центротех-Инжиниринг». г. Санкт-Петербург, Россия

[5]РНЦ «Прикладная химия», г. Санкт-Петербург, Россия

[@]pashkevich-ds@yandex.ru

Фторид водорода (HF) является основным сырьём при производстве всех промышленных соединений фтора – фторидов урана, фторполимеров, фторсолей лития, хладонов и др. В настоящее время HF производят из высококачественного природного плавикового шпата CaF_2, запасы которого имеются не во всех странах. Перспективным сырьевым источником HF может быть полифторид аммония $NH_4F{\cdot}nHF$, который можно получать гексафторкремниевой кислоты, побочного продукта производства фосфоной кислоты из фторапатаита. Регенерация фтора в виде целевого HF возможна при взаимодействии различных фторидов с водородсодержащими соединениями и кислородом в режиме горения.

В случае использования в качестве источника фтора полифторида аммония водородсодержащее топливо (NH_3) присутствует в самом исходном веществе, а тепловой эффект окисления бифторида аммония кислородом достаточно высок – адиабатический разогрев продуктов составляет 2350 К:

$$NH_4F{\cdot}HF_{жидк} + 0{,}75O_{2,газ} \rightarrow 0{,}5N_{2,газ} + 1{,}5H_2O_{газ} + 2HF_{газ} - 294кДж. \quad (1)$$

Расчёты в ПК «АСТРА-4» показали, что если число атомов водорода больше или равно числу атомов фтора в группах элементов N-H-F-O и N-H-F-O-C, то единственным фторсодержащим продуктом в термодинамически равновесной смеси веществ является HF. В условиях избытка кислорода циановодород в термодинамически-равновесной смеси отсутствует.

На лабораторной установке с вертикальным реактором типа туннельной горелки внутренним диаметром 41 мм было исследовано влияние HF на стабильность горения аммиака в кислороде, когда соотношение аммиака и фторида водорода соответствует $NH_4F{\cdot}HF$:

$$NH_{3,газ} + 2HF_{газ} + 0{,}75O_{2,газ} \rightarrow 0{,}5N_{2,газ} + 1{,}5H_2O_{газ} + 2HF_{газ} - 316\ кДж. \quad (2)$$

Для процесса (2) сформировать стабильный фронт горения не удалось, несмотря на то, что адиабатический разогрев в (2) составляет 1900 К. Возможно, что это связано с ингибирующим влиянием HF на процесс окисления аммиака или образованием капель жидкого полифторида аммония. Для стабилизации фронта пламени в исходные компоненты смеси добавили метан:

$$NH_{3,газ} + 2HF_{газ} + (0{,}75+m)O_{2,газ} + mCH_{4,газ} \rightarrow$$
$$\rightarrow 0{,}5N_{2,газ} + 1{,}5H_2O_{газ} + 2HF_{газ} + mCO_{2,газ}. \quad (3)$$

При m>0,25 достигнуто устойчивое горение, конверсия аммиака составила 98%, а единственным фторсодержащим соединением в продуктах реакции был HF.

В пилотном реакторе типа туннельной горелки (диаметр 143 мм) реализовано пламенное окисление расплава $NH_4F \cdot nHF$:

$$NH_4F \cdot HF_{жидк} + (0{,}75+m)O_{2,газ} + mCH_{4,газ} \rightarrow$$
$$\rightarrow 0{,}5N_{2,газ} + (1{,}5+m)H_2O_{газ} + (n+1)HF_{газ} + mCO_{2,газ} + Q. \quad (4)$$

Расплав подавали при температуре 140-150°C, распыляя потоком кислорода, средний размер капель - 300 мкм. Инициировали горение с помощью самовоспламеняющейся пары NH_3-F_2.

При расходах компонентов $NH_4F \cdot HF$ – 0,90 г/с, CH_4 – 0,096 г/с, O_2 – 0,81 г/с была получена плавиковая кислота с концентрацией около 50%, содержание аммиака в которой составило около 1%. Таким образом, конверсия аммиака в составе подаваемого в реактор типа туннельной горелки расплава бифторида аммония составила 99 %.

Фторид водорода можно получить из плавиковой кислоты, например, при её обработке во фронте горения углерода в кислороде.

Таким образом, с помощью термодинамических расчётов, экспериментов на лабораторном и пилотном реакторах типа туннельной горелки показана возможность и целесообразность регенерации фтора в форме HF из $NH_4F \cdot nHF$ при его взаимодействии с CH_4 и O_2 в режиме горения.

Предложенный метод может позволить сформировать новую сырьевую базу для производства HF, основанную на фторсодержащих побочных продуктах производства экстракционной фосфорной кислоты разложением фторапатита.

СТАБИЛЬНОСТЬ ФТОРИДА ВОДОРОДА ВО ФРОНТЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ УГЛЕРОДА В КИСЛОРОДЕ В ПРИСУТСТВИИ ПАРОВ ВОДЫ

Пашкевич Д.С.[1,2], Капустин В.В.[1,2,3,@], Талалов В.А.[1], Мухортов Д.А.[2], Алексеев Ю.И.[2], Петров В.Б.[2,3], Камбур П.С.[1,2,3].

[1]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия*

[2]*ООО «Новые химические продукты». г. Санкт-Петербург, Россия*

[3]*РНЦ «Прикладная химия», г. Санкт-Петербург, Россия*

[@] Valentin.Kapustin.2014@yandex.ru

Безводный фторид водорода (БФВ) с содержанием воды в товарном продукте не более 0.06% является наиболее распространенным фторирующим агентом в промышленности соединений фтора. С его использованием получают фториды урана в ядерном топливном цикле, фторполимеры, озонобезопасные хладоны, электронные газы и т. д. В некоторых современных производствах побочным продуктом являются водные растворы фторида водорода, именуемые плавиковой кислотой (ПК). Например, при конверсии гексафторида урана, обедненного по изотопу U-235 (ОГФУ) по технологии французской компании Орано, которая в России внедрена на АО "ПО "Электрохимический завод", используют избыток воды:

$$UF_{6газ}+2H_2O_{газ} \rightarrow UO_2F_{2тв} + 4HF_{газ};$$

$$3UO_2F_{2тв} + 4.5H_2O_{газ} + H_{2газ} \rightarrow U_3O_{8тв} + 6HF_{газ} + 2.5H_2O_{газ}.$$

и одним из продуктов этого процесса является ПК с содержанием фторида водорода 70%. Смесь ректификуют и получают БФВ и 40%-й водный азеотропный раствор фторида водорода.

В работе рассмотрен метод получения БФВ из водных растворов фторида водорода при высокотемпературном взаимодействии водяного пара и углерода (реакция получения водяного газа, далее РПВГ):

$$C_{тв}+H_2O_{газ} \rightarrow H_{2газ} + CO_{газ} + 132кДж.$$

В современной промышленности РПВГ проводят при температуре 1000−1500 K, подавая в зону реакции параллельно или последовательно с водой кислород для поддержания необходимой температуры:

$$C_{тв} + H_2O_{газ} + x_i\, O_{2газ} \rightarrow H_{2газ} + x_j\, CO_{газ} + x_k\, CO_{2газ}.$$

Для реализации предлагаемого способа необходимо исследовать термическую стабильность и химическую инертность HF в данных условиях, т. е. возможность проведения процесса по схеме:

$C_{тв} + H_2O_{газ} + HF_{газ} + O_{2газ} \rightarrow H_{2газ} + CO_{газ} + CO_{2газ} + HF_{газ}$.

Для подтверждения стабильности HF в условиях РПВГ с помощь собственной программной разработки проведены расчеты равновесного состава веществ для группы элементов C–H–F–O при избытке твердой фазы углерода и при давлении P=0,1МПа. Расчеты показали, что во всем исследуемом диапазоне изменения температуры HF является единственным фторсодержащим соединением в системе, а CF_4 и COF_2 отсутствует в продуктах реакции. Это подтверждает высокую термическую стойкость HF в условиях РПВГ.

Экспериментальное исследование было проведено на лабораторном реакторе объемом 23 литра, заполненным измельченным искусственным графитом марки ГИИ-А (16 кг). Для подачи исходных компонентов смеси в реактор использовали двухкомпонентную толстостенную медную форсунку диаметром 28 мм расположенную под углом в 45^o к верхнему фланцу реактора. По кольцевому каналу форсунки с заданным расходом подавали испаренную плавиковую кислоту, а по кольцевому каналу кислород, разогретый до температуры 250 ^{o}C.

При подаче 40%-й плавиковой кислоты (40 мг/с) и O_2 (120 мг/с) в слое графита формировалась стабильная асимметричная высокотемпературная зона с максимальными значениями температуры 1150-1400°C.

Анализ продуктов реакции показал, что в никелевом фильтре зафиксированы лишь следовые количества гексафторсиликатов металлов (10^{-3} г на 1 г HF), вызванные связыванием примесей кремния и железа из исходного графита. Образования фторграфита не обнаружено. Анализ конденсируемых при –60 °C продуктов реакции показал, что раствор представлял собой высококонцентрированную плавиковую кислоту 50-90%. До 10% HF оставалось в графите за счет адсорбции и интеркаляции. Газохроматографический и ИК-анализ газообразных продуктов реакции подтвердил отсутствие CF_4 и COF_2 в продуктах реакции с точностью до 0.01%. Характерный состав газовой фазы был следующим - 70 об. % CO, 20 об. % CO_2 и 10 об. % H_2.

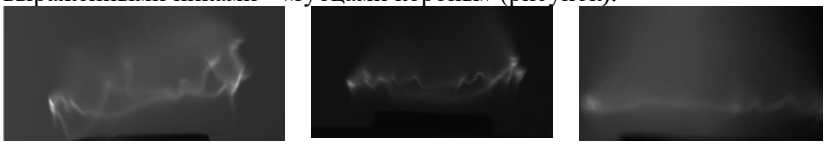
Таким образом, HF остается стабильным при его контакте с углеродом в присутствии водяного пара и O_2 при температуре 1000−2000 K, а фториды и оксифториды углерода не образуются.

Предложенный способ может быть рассмотрен в качестве основы промышленного обезвоживания водных растворов HF, в том числе азеотропных, с целью получения БФВ в режиме горения.

ФУРЬЕ-АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ «КОРОННОГО» ПЛАМЕНИ И ИХ СВЯЗЬ С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ ЦИКЛОИДЫ

Кожевин Д.Ф.[1,@],
[1]*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России*
[@]kozhevin_df@igps.ru

При горении жидких топлив в специальной коаксиальной горелке возникает устойчивый режим, названный «коронным» пламенем. Его отличительной чертой является замкнутый фронт, имеющий в развертке на плоскость вид периодической кривой с явно выраженными пиками - «зубцами короны» (рисунок).



а б в

а – гептан, б-октан, в-нонан

Рисунок – «Коронное» пламя зафиксированное высокоскоростной камерой

В работе [1] установлено, что пространственно-временная развертка «коронного» пламени хорошо описывается параметрическими уравнениями трохоиды. В простейшей безразмерной форме после соответствующего масштабирования и сдвига начало отсчета она имеет вид:

$$\begin{aligned} X(\varphi) &= \varphi - A\sin\varphi \\ Y(\varphi) &= 1 - A\cos\varphi \end{aligned} \qquad (1)$$

где параметр $\varphi \in [0,2\pi)$ соответствует одному полному периоду структуры, $A \in [0,1)$ - безразмерная амплитуда, характеризующая высоту пиков. Переменная X пропорциональна физической длине дуги x, а Y - безразмерной высоте фронта. При $A=0$ кривая вырождается в прямую линию; с ростом A она приобретает волнообразный характер, а при $A \to 1$ появляются точки возврата.

Если рассматривать Y как функцию параметра φ, то ее тригонометрический ряд Фурье выражается:

$$Y(\varphi) = 1 - A\cos\varphi = 1 - \frac{A}{2}e^{i\varphi} - \frac{A}{2}e^{-i\varphi} \qquad (2)$$

Следовательно, спектр по φ содержит только нулевую и первую гармоники. Однако на практике фазовый портрет регистрируется как функция X - равномерно распределенной по длине дуги координаты. Переход от φ к X как независимой переменной коренным образом меняет спектральный состав.

Уравнение $X(\varphi)=\varphi-A\sin\varphi$ при $0\leq A<1$ монотонно и, следовательно, обратимо. Явное выражение для $\varphi(X)$ отсутствует, однако его можно разложить в ряд Фурье–Бесселя, аналогично кеплеровскому уравнению в небесной механике [2]:

$$\varphi = X + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} J_n(nA) sin(nX) \tag{3}$$

где J_n - функция Бесселя первого рода порядка n. Подставляя разложение для $\cos\varphi$ в $Y(\varphi)=1-A\cos\varphi$, получаем:

$$Y(X) = 1 - \frac{A^2}{2} - 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_n(nA)}{n} cos(nX) \tag{4}$$

Здесь учтено изменение среднего значения, необходимое для согласования с исходной формулой.

Таким образом, **ряд Фурье наблюдаемой функции $Y(X)$ содержит бесконечный набор косинусоидальных гармоник**, амплитуды которых равны:

$$A_n = \left|\frac{2}{n} J_n(nA)\right|, n = 1,2,3 \ldots \tag{5}$$

Предложенное математическое описание устанавливает прямую взаимосвязь между геометрической моделью модифицированной циклоиды и разложением в ряд Фурье фазового портрета «коронного» пламени.

[1] Кожевин Д.Ф. Определение параметров процессов горения в «Коронном» пламени // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2023. № 3. С. 28–35. DOI: 10.61260/2218-130X-2023-3-28-35.

[2].Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. Т. 2. - М.: Наука, 1974.

ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЕ ПОЛИМЕРЫ КАК ОСНОВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

Моногаров К.А.[1,@], Назарова А.А.[1], Крыкин М.Д.[1], Котов Н.О.[1], Пивкина А.Н.[1]

[1] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук*

[@] kostyk3d@mail.ru

Использование энергетических композитных составов в 3D-печати, представляет собой многообещающий способ повышения безопасности процесса производства сгораемых элементов, обладающих сложной геометрической конфигурацией, контролируемым составом и необходимыми баллистическими и механическими характеристиками.

В общем случае, материалы, используемые в 3D-печати методом послойного наплавления (FDM) – это термопластичные полимеры, обладающие достаточной прочностью, термостабильностью и влагостойкостью, а температура начала деструкции этих полимеров должна превышать температуру переработки [1]. Кроме того, факторами, определяющими пригодность материала для печати методом FDM, являются: (1) низкие значения температуры стеклования и плавления (2) достаточная вязкость расплавленного материала для обеспечения способности к течению, (3) достаточная скорость кристаллизации, (4) низкая усадка при затвердевании. Дополнительно, для изготовления энергетического композита необходимо, чтобы полимер имел способность растворятся в органических растворителях, в которых не растворяется наполнитель.

Целью работы является выбор наиболее перспективных коммерчески доступных термопластичных полимеров для использования в качестве основы энергетических композитов и определение возможного рабочего диапазона температуры 3D-печати таких составов, содержащих, в качестве энергетического наполнителя, перхлорат аммония.

Для выбора матрицы энергетического композита исследован ряд коммерческих термопластичных полимеров: полилактид, термопластичный полиэфирный эластомер, поливиниловый спирт, шеллак, поливинилбутираль, этилцеллюлоза, этиленвинилацетат, поликапролактон и полиизобутилен.

Поиск оптимальных энергетических композитов на основе термопластичных полимерных материалов, пригодных для 3D-печати методом послойного наплавления, проведен на основе исследования термических и реологических свойств выбранных полимеров. Оптимальное соотношение компонентов в композициях определялось по максимальной адиабатической температуре сгорания, полученной в результате термодинамического расчета. Возможный рабочий диапазон температуры печати определялся, с одной стороны, термической стабильностью компонентов, а с другой – температурой начала течения при нагрузке 3 МПа, определенной экспериментально с помощью экструзионного пластометра.

Для термодинамического расчета экспериментально определены элементный состав и энтальпия образования выбранных образцов термопластичных полимеров. Для оценки термической стабильности использовался синхронный термический анализ.

Таким образом, в результате выполнения работы выбраны наиболее перспективные коммерческие полимеры для создания энергетических композитов на их основе и определены возможные температурные диапазоны безопасной печати.

[1] ГОСТ Р 57558-2017, Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы, часть I

СЖАТИЕ МЕТАЛЛОВ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Назаров Д.В[1,2@]., Симаков В.Г[1]., Терешкина И.А[1,2].,
Ткаченко М.И[1,2]., Трунин И.Р[1,2]., Федотова А.В[2], Гнутов И.С.[1]
[1]Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Российская Федерация
[2]Саровский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Саров, Российская Федерация
[@]postmaster@ifv.vniief.ru

Представлен экспериментально-расчётный подход, позволяющий рассмотреть картину волновых взаимодействий вблизи свободной поверхности ударно-нагруженных образцов и исследовать влияния этих взаимодействий на движение свободной поверхности [1,2].

Проведены ударно-волновые эксперименты, в которых образцы из алюминиевого сплава Д16 и стали Ст3 различной толщины нагружались ударниками из того таких же материалов. Опыты проводились на нагружающей пневматической установке пушечного типа (рабочий газ – гелий), ударник разгонялся до скоростей ~ 400 м/с, диагностика волновых процессов проводилась по регистрации скорости движения свободной поверхности с помощью методики PDV (Photon Doppler Velocimeter). На фронтальном участке зависимости скорости поверхности образца из Ст3 от времени зарегистрированы особенности в виде «ступенек», которым соответствуют времена выхода на свободную поверхность первой упругой волны, распространяющейся по образцу с продольной скоростью звука (упругий предвестник), и второй волны, образованной в результате отражения первой упругой волны разрежения от ударной волны. Предложено оценивать значение скорости ударной волны в случае её упругопластической конфигурации по регистрации времен выхода упругих предвестников на свободную поверхность образца. Для образцов из сплава Д16 вторая «ступенька» не зарегистрирована, поэтому скорость ударной волны оценивалась по наклону фронта пластической волны.

Построены ударные адиабаты сплава Д16 и Ст3: зависимость скорости ударной волны от массовой скорости за фронтом волны,

зависимость напряжения от плотности в диапазоне нагружения до давления ~13 ГПа.

1. Grady D.E. Steady-Wave Risetime and Spall Measurements on Uranium (3-15 GPa). Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena. N-Y and Basel. 1986. P. 763-780.

2. Назаров Д.В., Трунин И.Р., Баженов Д.А., Шестаков Е.Е., Гнутов И.С. Сжатие стали марки Ст3 «слабой» ударной волной. Проблемы Прочности и Пластичности. ННГУ. т. 87, № 2, с. 241-252. 2025 г.

МЕХАНИЗМЫ ТЕРМОРАСПАДА 2-, 3- и 4-НИТРОФЕНОЛОВ ПО ДАННЫМ КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА*

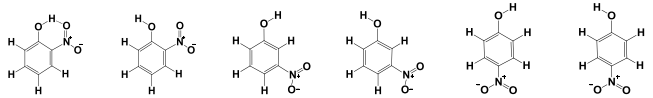
Николаева Е.В.[1,@], Чачков Д.В.[2], Сапегин А.Е. [1], Храпковский Г.М.[1]

[1] *Казанский национальный исследовательский технологический университет*

[2] *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»*

[@] nikol_ek@mail.ru

Методом функционала плотности B3LYP/6-31+G(2df,p), хорошо зарекомендовавшим себя при изучении ароматических нитросоединений [1,2], были исследованы механизмы газофазного терморапада 2-, 3- и 4-нитрофенолов. Для каждого из них были рассмотрены по два конформера – с углом поворота гидроксильной группы по отношению к нитрогруппе (∠HOCC(N)) или реакционного центра реакций первичного акта газофазного термического распада (табл. 1) равным 0^o и 180^o:

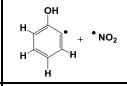
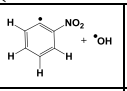
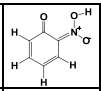
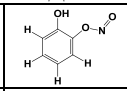
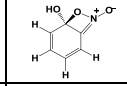
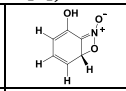
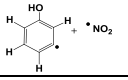
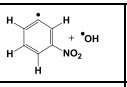
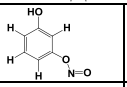
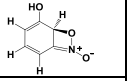
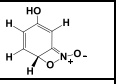
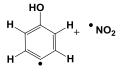
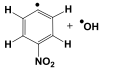
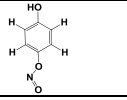
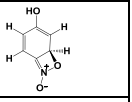


1 **1'** **2** **2'** **3** **3'**

Барьеры вращения группы OH для реакций **1** ⇆ **1'**, **2** ⇆ **2'**, **3** ⇆ **3'** имеют значения 59.0, 13.8 и 16.6 кДж/моль соответственно. Из этих данных, а также данных табл.1, следует, что положение группы OH в большей степени влияет на значения энтальпии активации ($\Delta H^{\neq}$) изученных реакций для структуры **1**, что закономерно из-за наличия в ней очень сильной внутримолекулярной водородной связи между атомами H группы OH и O группы NO_2. Для пар конформеров **2** и **2'**, **3** и **3'** влияние поворота группы OH незначительное. Сравнение данных табл. 1 с имеющимися экспериментальными значениями [3] подтверждает, что для 3-нитрофенола терморапад вероятнее всего протекает через радикальный отрыв группы NO_2 (*7*) на первой стадии. Вместе с тем не следует исключать и альтернативные процессы (*9*), (*10*) и (*11*). При определенных условиях (например, снижение температуры) возрастает вероятность реализации нитро-нитритной перегруппировки (*9*). Похожая картина наблюдается и для 4-нитрофенола. Но здесь наиболее вероятным при изменении условий реакции становится процесс образования бициклического интермедиата (*15*). Для 2-нитрофенола лишь $\Delta H^{\neq}$ перегруппировки нитро ⇆ *аци*-нитро (*3*) значительно меньше (≈ 60 кДж/моль) экспериментального значения. Существенная разница говорит об определяющей роли вторичных процессов. Однако исследование их всевозможных вариантов показало, что данный канал вероятнее

всего является «тупиковым», а ответы на неясные вопросы следует искать в изучении новых нетривиальных механизмов реакций [2].

Таблица 1 – Энтальпии ($\Delta H^{\neq}$, кДж/моль) и предэкспоненциальные множители (lg$A$, л.е.) альтернативных реакций первичного акта газофазного мономолекулярного термораспада 2-, 3- и 4-нитрофенолов.[a]

2-нитрофенол (Эксп. знач. $\Delta H^{\neq}$ = 199.0 кДж/моль, lg$A$ = 12.3 л.е. [3])						
Прод. реакц.						
№ реакц	(*1*)	(*2*)	(*3*)	(*4*)	(*5*)	(*6*)
$\Delta H^{\neq}$	304.9(267.3)	475.5(431.0)	132.6	275.6(241.1)	267.9(233.5)	271.5(234.6)
lg$A$	-	-	13.58	13.87(13.09)	12.94(12.30)	13.02(12.32)
3-нитрофенол (Эксп. знач. $\Delta H^{\neq}$ = 291.8±12.5 кДж/моль, lg$A$ = 17.4±0.5 л.е.[3])						
Прод. реакц.						
№ реакц.	(*7*)	(*8*)	(*9*)	(*10*)	(*11*)	
$\Delta H^{\neq}$	283.2 (283.8)	449.1 (447.1)	259.3 (256.8)	265.2 (263.7)	268.1 (271.1)	
lg$A$	-	-	13.48 (13.42)	12.63 (12.43)	12.54 (12.66)	
4-нитрофенол						
Прод. реакц.						
№ реакц.	(*12*)	(*13*)	(*14*)	(*15*)		
$\Delta H^{\neq}$	294.7 (294.7)	454.6 (454.6)	267.9 (269.9)	251.2 (255.4)		
lg$A$	-	-	13.40 (13.45)	12.45 (12.53)		

[a] Вне скобок приведены значения для структур **1**, **2**, **3** с ∠HOCC(N) = 0°, в скобках – для структур **1'**, **2'**, **3'** с ∠HOCC(N) = 180°.

Вклад Чачкова Д.В. финансируется в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

*Посвящается памяти Шамова А.Г. (1961-2020).

[1] Николаева, Е.В., Чачков, Д.В., Шамов, А.Г., Храпковский, Г.М., в сб. тр. Всер. конф. АКС-2019. М., 2019. С. 156-163.

[2] Николаева, Е.В., Храпковский, Г.М., Шамов, А.Г. *Вестник технол. ун-та*, 2020, Т. 23, №12, С. 12-16.

[3] Манелис, Г.Б., Назин, Г.М., Рубцов, Ю.И., Струнин, В.А. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов, М.: Наука, 1996, 223 с.

УСЛОВИЯ И ХРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ДРЕВЕСНО-УГОЛЬНЫХ ПЕЛЛЕТ ПРИ КОМБИНИРОВАНОМ НАГРЕВЕ

Солодовникова Ж.А.[1], Некрасов С.С.[1], Баранова А.А.[1,@]
[1]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*
[@]nastia.kostoreva@yandex.ru

Смесевые топлива из угля и биомассы перспективны для экологически чистой энергетики. Совместное сжигание угля и древесины осложняется различиями в теплофизических характеристиках. Пеллетирование композита позволяет прогнозировать зажигание по средневзвешенным параметрам. Цель: экспериментальное определение режимов зажигания и горения древесно-угольных пеллет при радиационно-конвективном нагреве в зависимости от температуры и состава топлива.

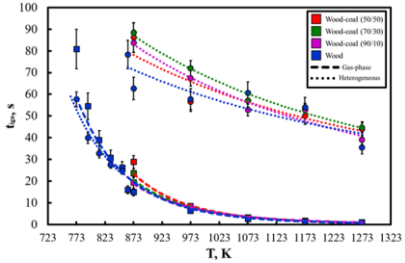


Рис. 1 – Зависимость времён задержек зажигания от температуры для газофазного и гетерогенного режимов при разных составах древесно-угольных пеллет.

Результаты, представленные на рисунке 1, демонстрируют следующее:

– Зажигание происходит в газофазном режиме из-за высокого выхода летучих из древесины.

– Добавление угля незначительно влияет на время задержки зажигания (различие 10-15 %), но существенно повышает теплотворную способность.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-79-00127).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОХВАТА ПЛАМЕНЕМ ЧАСТИЦ БИО-ТОПЛИВ

Кузнецов Г.В.[1,@], Некрасов С.С.[1], Солодовникова Ж.А.[1,@]

[1]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

[@] zhanna.kostoreva@yandex.ru

Время полного охвата пламенем частицы (t_{eif}) определяет устойчивость горения биомассы и композитных пеллет. Цель – установить зависимости t_{eif} от температуры окислителя (873–1273 К), размера частиц, породы древесины и состава пеллет.

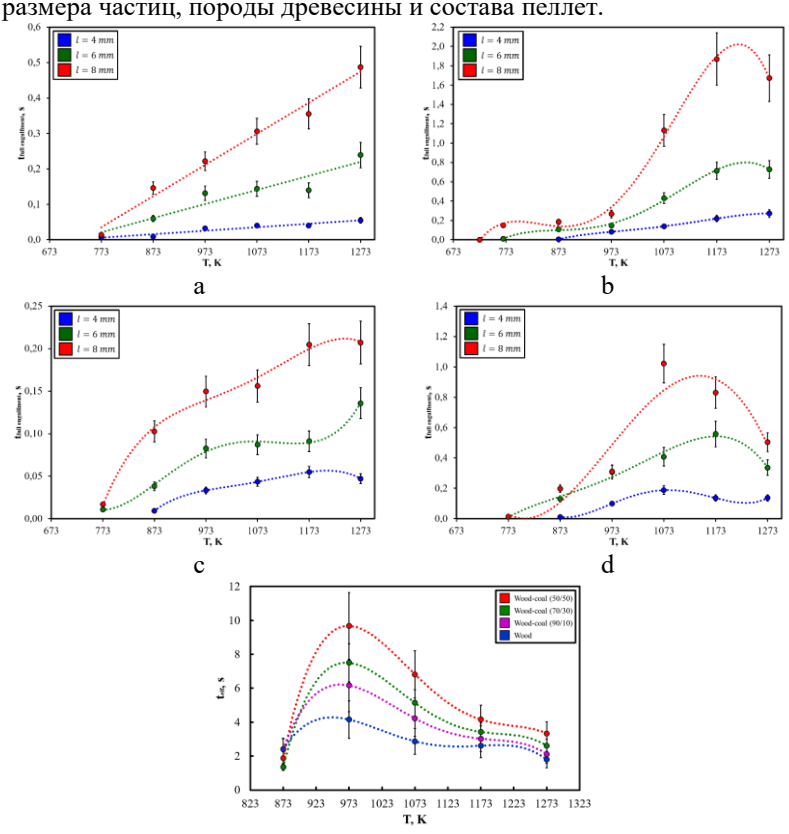


Рис. 1. Зависимости времени полного охвата пламенем древесных частиц (a – сосна, b – береза, c – кедр, d – лиственница) и древесно-

угольных пеллет (f) от температуры внешней среды для различных характерных размеров

Результаты, представленные на рисунке 1, демонстрируют следующее:

1. Для древесных частиц с ростом T t_{eif} снижается, но при L=8 мм и T>1073 К возрастает в 5-10 раз (эффект перехода к медленному горению летучих).
2. Для пеллет увеличение доли угля с 10 до 50 % повышает t_{eif} на 40% при 873 К и лишь на 12-15% при 1273 К.
3. Вспучивание пеллет (до +20 % размера) дополнительно замедляет охват пламенем.

Таким образом, режимы охвата пламенем немонотонны и зависят от состава, температуры и размера частиц, что необходимо для расчёта камер сгорания.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-79-10045).

САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ СМЕСЕЙ H_2-O_2-AR В ПРИСУТСТВИИ МАЛЫХ ДОБАВОК КАРБОНИЛОВ МЕТАЛЛОВ ЗА ОТРАЖЕННЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Тереза А.М.[1@], Смирнов В.Н..[1], Черепанова Т.Т.[1],
Медведев С.П.[1]

[1]*Федеральный исследовательский центр химической физики РАН им. Н.Н. Семенова*

[@] tereza@chph.ras.ru

Самовоспламенение водородно-воздушных смесей представляет значительный интерес в связи с проблемами пожаровзрывобезопасности в водородной энергетике и других отраслях, связанных с производством, транспортировкой, хранением и использованием водорода. Установлено, что высокая реакционность смесей H_2-O_2приводит к огромному разбросу фундаментальной характеристики данного процесса, а именно, времени задержки самовоспламенения τ [1]. Одним из объяснений такого результата является наличие примесей в исходной смеси [2, 3]. Предварительные численные расчеты с использованием детального кинетического механизма показали сильное влияние примесей атомов и радикалов на температурную зависимость значения τ в области конкуренции реакций разветвления ($H + O_2 = OH + O$) и обрыва ($H + O_2 + M = HO_2 + M$) цепи [3]. Экспериментальное подтверждение данного результата осложнено рядом трудностей, возникающих при измерении времени τ в этих условиях [2].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования воспламенения смесей H_2–O_2–Ar в присутствии малых добавок $Mo(CO)_6$, $Cr(CO)_6$ и $Fe(CO)_5$ за отраженными ударными волнами. Эксперименты проводились за отраженными ударными волнами в диапазоне температур 950-1600 К при общей концентрации [M] $\approx 10^{-5}$ моль/см^3. Доля карбонилов металлов в смесях 1,5% H_2–1,5% O_2–Ar и 3% H_2–3% O_2–Ar составляла от ~80 до 600 ppm. Воспламенение смесей ~~контролировали~~ наблюдали путем одновременной регистрации давления за отраженной ударной волной, ИК-излучения воды при $\lambda \approx 1{,}5$ мкм (вторая гармоника ассиметричных колебаний), поглощения гидроксильными радикалами в основном состоянии $OH(X^2\Pi)$ (λ = 306,77 нм) и излучения электронно-возбужденными радикалами $OH^*(A^2\Sigma^+)$ ($\lambda = 308 \pm 4$ нм). В некоторых опытах сигналы излучения на длине волны 308 нм имели пик непосредственно за фронтом отраженной ударной волны,

предположительно вызванный хемилюминесцентной реакций атомов металла с молекулярным кислородом. Обнаружено, что гексакарбонил хрома ингибирует процесс самовоспламенения смеси в то время, как гексакарбонил молибдена промотирует процесс. Добавки $Fe(CO)_5$ влияли сложным образом: в зависимости от содержания карбонила в смеси и начальной температуры наблюдалось ингибирования или промотирование. Предварительные численные расчеты лишь частично описывают полученные экспериментальные данные, что указывает на необходимость проведения дополнительных экспериментов и совершенствования кинетической модели.

[1] Schonborn A., Sayad P., Konnov A.A. et al., 2014, Intern. J. Hydrogen Energy, **39(23)**, 12166–12181
[2] Urzay J., Kseib N., Davidson D.F. et al., 2014, Combust. Flame, **161(1)**, 1–15
[3] Тереза А.М., Агафонов Г.Л., Андержанов Э.К. и др., 2023, Химич. Физика, **42(3)**, 70–78

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТВЕРДОГО ЛЕГКОПЛАВКОГО ТОПЛИВА С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ РЕАКТОРА ИДЕАЛЬНОГО СМЕШЕНИЯ

Усанов В.А.[1,@], Гембаржевский Г.В.[1], Рашковский С.А.[1] , Якуш С.Е.[1]
[1] *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН*
[@] usanov@ipmnet.ru

Легкоплавкое твердое топливо, такое как парафин, которое рассматривается как одно из перспективных для использования в промышленности, имеет ряд преимуществ перед полимерными аналогами. Основное преимущество таких топлив – высокая скорость регрессии, которая достигается за счет взаимодействия высокотемпературного высокоскоростного потока окислителя (воздуха) с поверхностью топлива, образования тонкого расплавленного нестабильного слоя, и диспергирования капель в потоке окислителя, вследствие нестабильности Кельвина-Гемгольца. При достижении определенных условий, в рабочей камере, происходит самовоспламенение топлива. Определение параметров самовоспламенения топлива – важная задача, решение которой базируется на сочетании теоретических и экспериментальных методов.

Для решения поставленной задачи на экспериментальной установке [1] была проведена серия опытов, параметры установки при этом варьировались по давлению от 1,8 до 3,8 МПа, а температура – от 873 до 1023°К. В качестве легкоплавкого твердого топлива был выбран парафин марки П-2, по причине его низкой температуры плавления. В процессе работы установки фиксировались такие параметры как давление и температура потока рабочего газа на входе и выходе рабочей камеры.

С целью интерпретации экспериментальных данных и углубления фундаментальных представлений о самовоспламенении и горении легкоплавких материалов (парафина) в высокотемпературном воздушном потоке предложена модель реактора идеального смешения (см. рис.1), которая описывает процесс горения смеси воздуха с парами легкоплавкого вещества.

В результате выполненной работы также разработана и экспериментально верифицирована новая модель критических условий самовоспламенения парафинового образца. Данная модель допускает достаточно простую модификацию для учёта иных начальных условий

путём использования соответствующих эмпирических или теоретических субмоделей.

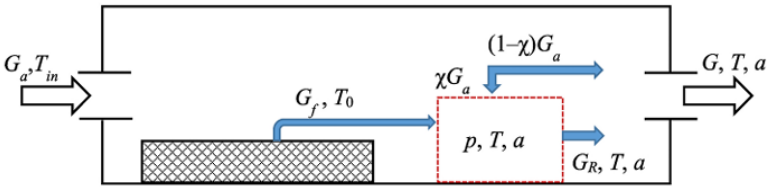


Рис. 1 – Принципиальная схема реактора идеального перемешивания, рассматриваемого как модель камеры сгорания с рециркуляционной зоной (красная пунктирная линия)

На основе экспериментальных данных и разработанных моделей была получена граница самовоспламенения парафина марки П-2, см. рис 2. Видно, что обе модели дают правильное поведение граничной кривой, хотя и объясняют различные аспекты самовоспламенения парафина, происходящего в потоке горячего воздуха.

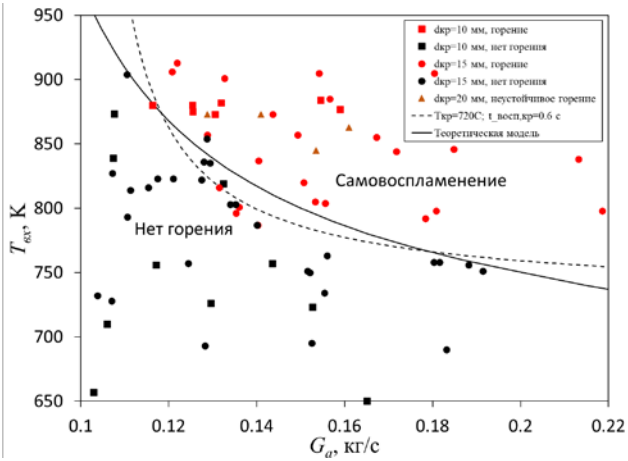


Рис. 2 – Граница самовоспламенения, построенная по экспериментальным данным (обозначен пунктирной линией) и с помощью теоретической модели (сплошная линия).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00703, https://rscf.ru/project/24-19-00703/

[1] Якуш С.Е., и др., 2026, Хим. физика и мезоскопия. **28. 125-136**

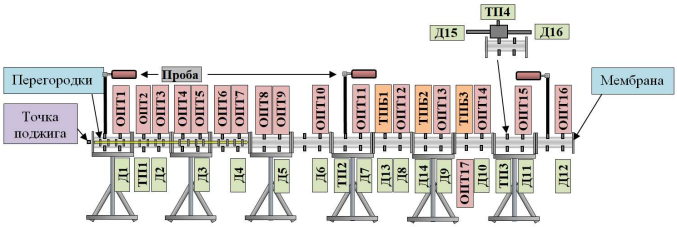
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ ИЗ ДЕФЛАГРАЦИИ В ДЕТОНАЦИЮ

Яковлев С.А.[@], Безгодов Е.В., Тараканов А.А., Давлетчин Ю.Ф.
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Россия, г.Снежинск.
[@] yakovlevsa@vniitf.ru

На объектах производства и хранения водорода, а также на АЭС в случае развития аварийного сценария возможна утечка чистого водорода с последующим образованием водородно-воздушных смесей. Их воспламенение может нанести значительный ущерб помещению, ближайшему оборудованию и здоровью людей.

Особую опасность представляет ускорение пламени водородно-воздушных смесей турбулентными потоками от близлежащих препятствий. В результате этого горение может перейти из дефлаграции в детонацию, сопровождаемую значительным избыточным давлением на фронте [1]. Объемная доля горючего в смеси является одним из определяющих факторов возможности распространения пламени в режиме детонации. Минимальное (максимальное) объемное содержание горючего в смеси, при котором пламя может распространяться в режиме детонации с учетом начальных условий и геометрии, является нижним (верхним) концентрационным пределом детонации [2].

Исследования перехода водородно-воздушных смесей из дефлаграции в детонацию проводились на установке БМ-ТУ, представляющей собой горизонтально ориентированную гладкую прозрачную ударную трубу (см. Рисунок 1) длиной 6 м с внутренним диаметром 0,06 м и смеситель объемом 1 м^3 для подготовки смеси.



ОПТ – датчики отметчики, Д – датчики давления, ТП – термоэлектрические преобразователи, ТПБ – термоэлектрические преобразователи без защитного кожуха

Рисунок 1 – Схематический вид ударной трубы БМ-ТУ

Целью данной работы являлось получение экспериментальных данных о процессе перехода горения из дефлаграции в детонацию при горении водородно-воздушных смесей в широком концентрационном диапазоне водорода для валидации программных комплексов и численных методик.

В таблице 1 представлены параметры и результаты экспериментальных исследований в ударной трубе БМ-ТУ: температура смеси перед воспламенением T_0, объемная доля водорода C, определенная с помощью хроматографического метода, пик перепада давления Δp и максимальная скорость фронта пламени u_{max}.

Таблица 1 –Параметры и результаты экспериментов

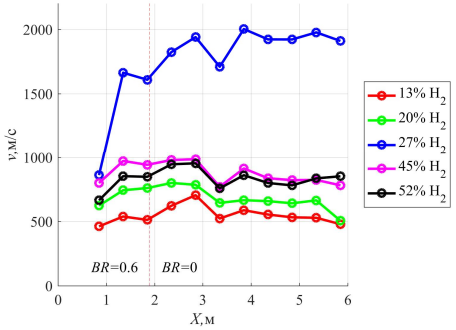
№	T_0, К	С, об.%	u_{max}, м/с	Δp, кПа	Число перегородок
1	291,1	13,18±0,39	792	180	20
2	292,1	13,16±0,33	689	169	20
3	291,1	13,06±0,37	665	172	20
4	285,0	20,80±0,52	809	835	20
5	285,7	20,60±0,52	800	573	20
6	285,3	20,35±0,76	792	598	20
7	286,3	27,20±0,68	2076	1079	20
8	286,1	27,20±0,88	2010	1063	20
9	286,8	27,20±0,88	1993	1049	20
10	283,8	46,80±1,67	993	742	20
11	284,9	45,70±1,14	1942	1284	20
12	285,1	45,90±1,34	982	854	20
13	285,1	53,80±1,35	956	229	20
14	286,6	51,30±1,28	949	620	20
15	286,4	52,35±1,67	958	584	20
16	286,5	23,80±0,60	2076	1306	20
17	288,5	21,35±0,78	833	731	20
18	289,0	22,70±0,57	2116	1340	20
19	289,2	22,60±0,56	1987	1054	16
20	287,4	20,10±0,50	1796	1058	16
21	288,5	19,15±0,63	1600	1019	16

Исследуемая смесь подготавливалась в смесителе методом парциальных давлений, после чего подавалась в предварительно вакуумированную трубу (<0,5 кПа) до давления 100 кПа.

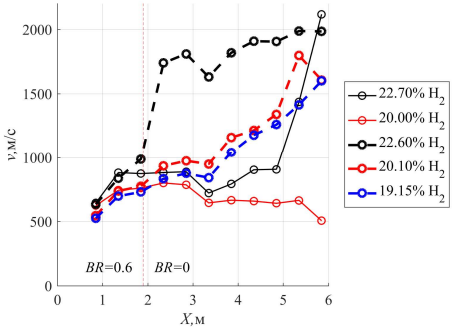
Для ускорения пламени на начальном этапе в первых четырех сегментах трубы устанавливались кольцевые перегородки с

коэффициентом загромождения BR=0,6. Для минимизации барических нагрузок от сгорания смеси, оказываемых на БМ-ТУ, на торце устанавливалась разрывная мембрана.

По показаниям тензометрических датчиков были получены профили оценочной скорости фронта пламени в экспериментах №№1–15 (рисунок 1а) и №№16–21 (рисунок 1б). Сплошной линией показаны профили, полученные в экспериментах с 20 перегородками, а штриховыми с 16.



а)



б)

Рисунок 1 – Зависимость оценочной скорости фронта пламени

[1] Ciccarelli G., Dorofeev S., 2008, Progress Energy Comb. Sci. 34 499–550;

[2] Гельфанд Б.Е. и др., 2009, Термодинамика горения и взрыва водорода. 584 с.

ОСОБЕННОСТИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ДИАЗОДИНИТРОФЕНОЛА ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Варламов Е.С. [@], Колесов В.И.
РХТУ им. Д.И. Менделеева, г.Москва, Российская Федерация.
[@] varlamov.e.s@muctr.ru

Изучая труды по лазерному инициированию энергоемких материалов, можно заметить, что исследователи стремятся к снижению времен срабатывания и энергий инициирования. Для достижения данной цели, взрывчатые вещества сенсибилизируют специальными добавками, которые, как правило, хорошо поглощают инфракрасное (ИК) лазерное излучение. Известно, что инициирующее взрывчатое вещество диазодинитрофенол (ДДНФ) является крайне чувствительным к видимому свету [1,2]. Именно это свойство вызывает интерес исследовать влияние коротковолнового лазерного излучения на ДДНФ, потому что оно может снизить пороговую энергию лазерного инициирования.

В данной работе изучены особенности инициирования диазодинитрофенола лазерным излучением длинами волн 405 нм, 520 нм, а также инфракрасного 785 нм для сравнения.

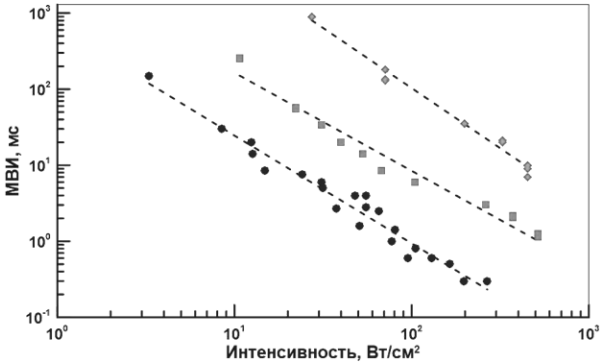


Рисунок 1 Зависимости минимального воспламеняющего импульса от интенсивности излучения. ●- 405 нм; ■-520 нм; ♦- 785 нм.

Показано значительное отличие минимального воспламеняющего импульса (МВИ) в зависимости от длины волны (см. Рисунок 1.). С увеличением длины волны при равных значениях интенсивности, МВИ возрастает в десятки и сотни раз. Это связано не

только с разностью коэффициентов поглощения ДДНФ для разных длин волн, но и с фотохимическим действием коротковолнового излучения.

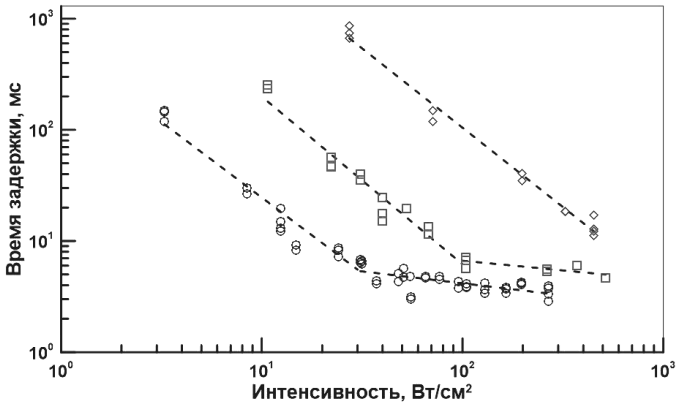


Рисунок 2 Зависимости времени задержки воспламенения от интенсивности излучения. ○ - 405 нм; □-520 нм; ◊ - 785 нм.

Как и в случае с МВИ, для фиолетового излучения задержка воспламенения ДДНФ заметно меньше, чем для зеленого и ИК (см. Рисунок 2). Полученные зависимости имеют убывающий характер. Для 405 и 520 нм наблюдается особенность: при 30 Вт/см^2 и 100 Вт/см^2 соответственно присутствуют изломы зависимости с возрастанием степенного коэффициента n. Такая особенность объясняется фотохимическим экзотермическим процессом распада диазодинитрофенола, в случае инициировании его минимальным значением воспламеняющего импульса.

Проведена оценка теплового баланса процесса воспламенения. Показано, что при оптимальной энергии воспламенения диазодинитрофенола, преобладает дополнительная теплота от фотохимических реакций разложения.

[1] Багал Л. И. 1975, М.: Машиностроение.

[2] Ran, G., et al. 2020, Environ. Sci. Pollut. Res. **27.** 6042–6051.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ С ПЕРХЛОРАТНЫМ ОКИСЛИТЕЛЕМ В ТРУБКЕ ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ, ОТКРЫТОЙ С ОДНОГО ТОРЦА

Ватницкий О.А.[@], Воробьев И.М., Карпова А.А., Фрейман В.М., Томкович М.В., Кукушкина Ю.А., Зегря Г.Г.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
[@]Englishman20@mail.ru

Авторами доклада впервые созданы образцы цилиндрической формы, содержащие смесь порошка пористого кремния (ПК) *p*-типа (дырочный тип проводимости) и перхлоратного окислителя, с диаметром менее 1 мм и длиной более 20 см.

ПК был получен методом электрохимического травления в HF-содержащем электролите. Степень пористости ПК, определенная методом низкотемпературной азотной порометрии, составила 62-63 %. Размер частиц смеси порошка ПК и окислителя не превышал 100 мкм. Контейнеры для навесок смеси были подготовлены на основе участков шланга из пищевого силикона. Уплотнение смесей в индивидуальных контейнерах производилось для достижения плотности более 0.4 г/см^3.

Инициирование взрывчатого превращения производилось с помощью разогретого участка стальной проволоки вблизи одного из торцов контейнера, содержащего энергоемкую смесь. Откликом на инициирование являлось самоподдерживающееся протекание химической реакции, фронт которой распространялся от точки воздействия на материал к противоположному торцу контейнера. Регистрация процесса производилась с помощью высокоскоростной камеры Evercam 1000-8-C (ООО «НИЦ «Промышленная оптика», Россия) с частотой кадров свыше 8500 кадров/сек. Ранее авторами были получены результаты, характеризующие аналогичные смеси с ПК *n*-типа (электронный тип проводимости) и перхлората бария [1].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-00426, https://rscf.ru/project/24-12-00426/.

[1] Карпова А.А., Фрейман В.М., Воробьев И.М., Ватницкий О.А., Томкович М.В., Кукушкина Ю.А., Зегря А.Г., Савенков Г.Г., Шашков Е.В., Зегря Г.Г., 2026, ФТП. **60.** 45-51.

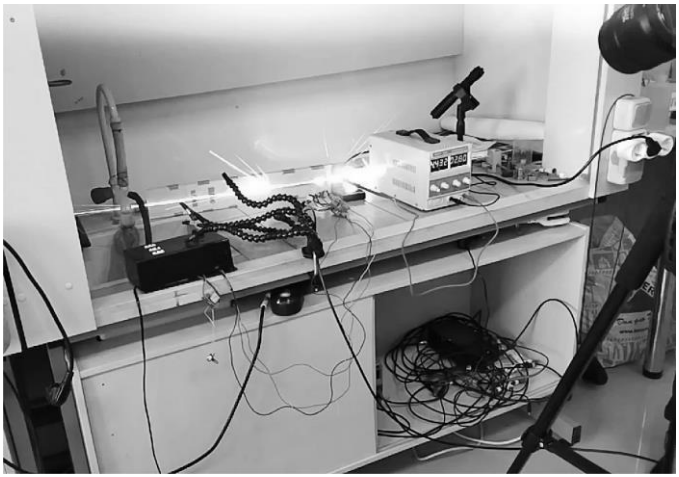


Рис. 1. Протекание экзотермической реакции ПК и перхлората бария в контейнере диаметром 0.7 мм и длиной 15 см.

УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ И ДЕТОНАЦИЯ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОЙ СМЕСИ НИТРОМЕТАНА С АЗОТНОЙ КИСЛОТОЙ

Вилков В.В., Якушев В. В.[@], Уткин А. В., Жуков А. Н.,
Даровских А. В.,
ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН,
г. Черноголовка, Россия
[@] yakushev@ficp.ac.ru

Проведено исследование зависимости периода индукции от амплитуды ударно-волнового нагружения в стехиометрической смеси нитрометана с концентрированной (99,5 %) азотной кислотой. Построена кинетическая кривая и оценена энергия активации химического превращения. Определена скорость детонации, давление в точке Чепмена-Жуге и ширина зоны химической реакции.

Нагружение смеси в опытах по инициированию производилось алюминиевыми пластинами-ударниками толщиной 7 и 10 мм, разогнанными продуктами взрыва до 1,1-2,5 км/с, через тефлоновые экраны. Моменты входа ударной волны в смесь и ее вспышки регистрировались с использованием ФЭУ с временным разрешением 0,7 нс через световод.

В экспериментах по определению параметров нормальной детонации производилась регистрация профилей скорости на границе смесь-водяное окно с использованием лазерного интерферометра VISAR. Измерение скорости детонационной волны выполнялось датчиками, работающими в режиме меток времени.

Настоящая работа дополняет проведенные ранее исследования [1] указанной смеси как при инициировании, так и при нормальной детонации. Новизной данной работы является непосредственное измерение периода индукции в эксперименте, а также регистрация структуры детонационной волны.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме 124020600049-8.

[1] Райкова В. М., Кондриков Б. Н., Козак Г. Д., 1998, ФГВ. **34.** 1-84.

СОЛИ КЛАСТЕРНЫХ БОРОВОДОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КАК КОМПОНЕНТЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ

Волкова Н.Н.[1,@], Жданов А.П.[2], Жолудев А.Ф.[1], Кислов М.Б.[1], Ларикова Т.С.[1], Возчикова С.А.[1], Чуканов Н.В.[1], Пучковский И.В.[1], Байков А.В.[1], Яновский Л.С.[1]

[1]*ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН, г. Черноголовка, Россия*

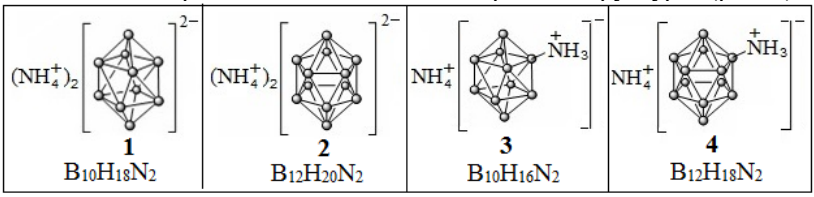
[2]*Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова, г. Москва, Россия.*

[@] nvolkova@icp.ac.ru

Успехи в синтезе полиэдрических гидридов бора (боранов, карборанов и металлокарборанов) явились важным шагом в развитии современной элементоорганической химии. Помимо большого теоретического интереса, связанного с необычным строением полиэдрических гидридов бора (**ПГБ**), ряд их производных обладает различными практически важными свойствами, из которых наиболее ценным для предлагаемого исследования является их высокая энергоемкость [1]. Высокая калорийность **ПГБ**, как правило, сочетается со способностью повышать скорость горения и полноту сгорания высокоэнергетических составов [1].

Практическое применение полигидридов бора ограничивается из-за их низкой химической стойкости, пожароопасности и токсичности, поэтому переход к нелетучим солям, анионами которых являются бороводородные кластеры, таким как соли анионов $[B_{10}H_{10}]^{2-}$ и $[B_{12}H_{12}]^{2-}$, позволили решить проблемы стабильности и токсичности [2]. Дальнейшее развитие этого направления может быть связано с направленной функционализацией полибороводородного аниона, что открывает путь к созданию нового поколения энергоемких материалов с улучшенными свойствами.

В настоящей работе с помощью гравиметрического метода исследована гигроскопичность солей **ПГБ** разной структуры (рис. 1):



По результатам анализа ИК-спектров выявлены особенности взаимодействия данных солей с молекулами воды. В частности,

показано, что некоторые изученные соли **ПГБ** являются кристаллогидратами, в структурах которых молекулы воды характеризуются разной степенью упорядоченности.

Исследовано влияние солей бороводородных кластеров на макрокинетические закономерности горения энергетических композиций на основе перхлората аммония и изопренового каучука. Для определения линейных скоростей горения энергетических составов в атмосфере азота использовали бомбу постоянного давления объемом 3 литра. Для сравнительной оценки влияния добавок солей **ПГБ** на скорость горения **ПХА** на рис. 2 представлены концентрационные зависимости скоростей горения образцов, содержащих аммоно-бораты аммония, катализатор горения ферроцен, изопреновый каучук СКИ-3, Al_2O_3. Начальное давление азота 20 атм.

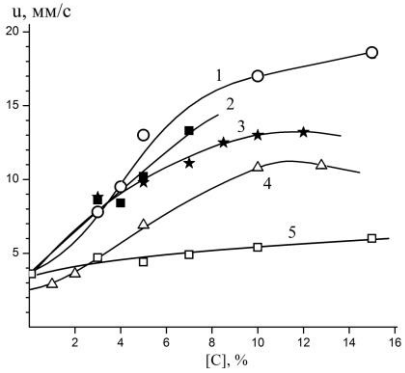


Рис.2. Зависимости скоростей горения композиций на основе ПХА от концентрации: **ПГБ** №3 (1); **ПГБ** №4 (2); ферроцена (3); изопренового каучука СКИ-3 (4) и Al_2O_3 (5).

Увеличение скорости горения ПХА при добавлении солей **ПГБ** может быть следствием как каталитического действия наноразмерных частиц оксида бора, образующихся в волне горения, так и ростом температуры процесса из-за существенного увеличения тепловыделеия при горении борсодержащего горючего. S-образный вид зависимости скорости горения ПХА от концентрации соли № 3 (рис. 2, кривая 1), близкий по характеру соответствующей зависимости в случае горения составов ПХА+СКИ-3 (кривая 4), дает возможность предположить, что ускорение горения ПХА в присутствии солей **ПГБ** связано в большей мере с ростом тепловыделения при окислении последних.

[1] X. H. Zhang; W. Q. Pang; L. T De Luca; Y. Zhao. High-energy Combustion Agents of Organic Borohydrides: Synthesis, Characterization and Applications. 2023, London: Royal Soc. Chem. 258 p.

[2] Avdeeva V.V., Nikiforova S.E, Malinina E.A, Sivaev I.B, Kuznetsov N.T. 2023, Materials. **16**. 6099.

КИНЕТИКА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ АЛЮМИНСОДЕРЖАЩЕГО ЗАРЯДА ВВ

Герасимов С.И.[1,2@], Воронов С.А.[3,4], Калмыков А.П.[2], Гончаров Е.А.[1,2], В.С. Роженцов[2]

[1]*СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров*

[2]*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров*

[3]*НИЯУ МИФИ, Москва*

[4]*Госкорпорация «Росатом», Москва*

[@] staff@vniief.ru

607190, пр. Мира, 37, г. Саров, Нижегородская обл.

Сферический заряд ВВ, инициируемый в центре, может применяться в качестве эталонного источника света в полевых условиях [1]. Исследование различных энергонасыщенных составов для этих целей показало, что данная одномерная схема разлета ПД позволяет уточнять кинетику энерговыделения ВВ с неидеальным режимом детонации [2].

При торможении разлетающихся ПД о воздух в ПД формируется идущая к центру волна сжатия, которая опрокидывается в ударную волну. Отражением этой ударной волны от центра опять в виде ударной волны образуется вторичная УВ (первый афтершок). После выхода первого афтершока на наружную границу ПД внутрь к центру идёт волна разрежения, которая отражается от центра в виде расходящейся ударной волны – второго афтершока. Таким же способом образуются и следующие вторичные ударные волны, каждый раз всё более слабые.

Положение афтершока в профиле сигнала с датчика давления, одномерный расчет, фотоэлектронная зависимость облученности от времени и визуализация волн теневым фоновым методом [3] позволяют надежно оценить энергетику ВВ и динамику догорания ПД.

[1] Герасимов С.И., Лень А.В., Севастьянов В.П., 2000, ВАНТ, серия: теоретическая и прикладная физика. **1.** 55

[2] Герасимов С.И., Михайлов А.Л., Трепалов Н.А., 2017, ФГВ. **53.** № **6**. 71-79

[3] Gerasimov S.I., Trepalov N.A. Scientific Visualization Issue Year: 2017. Quarter: **4**, Volume: **9**, Number: **4**. 1-12

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ХИНОНДИАЗИДА НА ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ ФОСФОРСОДЕРЖАЩИХ СМЕСЕЙ

Димухаметов Р.Р.[@], Зарипова Л.Р., Григорьев Г.С., Иванова Д.С., Плахов В.В.

ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технологический университет

[@]dim_rus2000@mail.ru

В работе отражены физико-химические принципы снижения размеров частиц одного из производного хинондиазида - 4,6 диазодинитрофенола (ДДНФ) [1,2], используемый в средствах инициирования, что позволяет безопасно его снаряжать составами в виде водной суспензии или пасты.

Проанализированы свойства полученного высокодисперсного ДДНФ со сниженными размерами частиц, предложена новая область его применения в виде пленочных пироэлементов.

Методами синхронного термогравиметрического анализа, дифференциально-сканирующей калориметрии и оптической спектрометрии изучены процессы экзотермического превращения в пленочных пироэлементах на основе высокодисперсного ДДНФ при нормальных условиях. Установлено, что протекание высокотемпературных экзотермических реакций носит не детонационный, а характер стационарного послойного горения со скоростью при нормальных условиях от 20 до 200 мм/с, при этом наблюдается интенсивное выделение дисперсных продуктов и пламени [3,4].

Выявлено, что введение высокодисперсного ДДНФ в пленочный пироэлемент на основе красного фосфора приводит к избыточному тепловыделению в процессе его горения при нормальных условиях. На наш взгляд избыточное тепловыделение и, как следствие, повышение скорости горения пленочного пироэлемента связано с протеканием вторичных экзотермических реакций между активными продуктами разложения высокодисперсного ДДНФ [5] и красным фосфором. Выявленное в работе избыточное тепловыделение

в процессе горения пленочных пироэлементов на основе красного фосфора и высокодисперсного ДДНФ приводит к перераспределению спектра электромагнитных излучений в длинноволновую область без существенного изменения температуры пламени [6,7].

[1] Багал Л.И., 1975, Химия и технология инициирующих взрывчатых веществ. 456.

[2] Robert Matyas Jırı Pachman, 2013, Primary Explosives Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 338.

[3] Беляев А.Ф., Беляева А.Е., 1946, доклады Академии наук СССР, 52.

[4] Андреев К.К., 1966, Термическое разложение и горение взрывчатых веществ, 346.

[5] Данилов Ю.Н., Илюшин М.А., Целинский И.В. Промышленные взрывчатые вещества. Ч. I. Инициирующие взрывчатые вещества. Текст лекций. СПб: СПбГТИ (ТУ), 2001.

[6] Гейдон, А. Спектроскопия пламен / А. Гейдон. – М.: ИЛ, 1959. – 383с.

[7] Гейдон, А. Спектроскопия и теория горения / А. Гейдон. – М.: ИЛ, 1950. – 307 с.

МЕХАНОАКТИВАЦИЯ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ СОСТАВОВ ОКИСЛИТЕЛЬ – ГОРЮЧЕЕ

Долгобородов А.Ю.[1,2,@], Кириленко В.Г.[1], Бражников М.А.[1], Воробьёва Г.А.[2], Гришин Л.И.[1,2]

[1]*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН*

[2]*Объединенный институт высоких температур РАН*

[@] aldol@ihed.ras.ru

Реакционная способность смесей твердых горючих и окислителей в значительной мере определяется поверхностью контакта реагентов. Даже если один из компонентов газифицируется в результате разогрева, все равно реакция может протекать только на поверхности другого твердого реагента. Для увеличения эффективной площади контакта реагентов в последнее время часто используется метод предварительной механохимической активации (МА) в шаровых мельницах. При МА происходит многократное увеличение площади контакта, а также создается высокая концентрация дефектов кристаллической структуры окислителей, которые снижают температуру разложения с выделением кислорода. В данном докладе приведён обзор результатов использования МА для повышения реакционной способности составов на основе *Al* и бора (*B*) с различными окислителями, а также приведены новые результаты по получению детонационно-способных составов *B*+перхлорат аммония (ПХА). В результате работы найдены оптимальные режимы активации *B*/ПХА. На первой стадии проводилась активация порошка аморфного *B* с добавками графита *C* или гексагонального *BN* (5-9% масс.). Для снижения температуры воспламенения также вводились добавки *Al, Ti, Mg, CuO* и фторопласта (4-10% масс.). На второй стадии проводилась МА порошков *B*+добавки совместно с ПХА. В активированных составах *B*/ПХА происходит быстрый переход горения во взрыв. Получен переход горения в детонацию в низкоплотных составах со скоростями около 3000 м/с на длинах зарядов менее 50 мм в стальных трубках диаметром 4 мм. Наиболее высокими скоростями детонации обладают составы ПХА+*B/C/Ti*/Фторопласт и ПХА+*B/C/Al/CuO* (70/30 по массе).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №25-23-00013.

УДАРНО-ВОЛНОВОЙ СИНЕЗ ВЫСШЕГО БОРИДА ВОЛЬФРАМА

Жуков А.Н.[1,@], Якушев В.В.[1], Рогачева А.И.[1]
[1]*ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН*
[@] azhukov@icp.ac.ru

Побудительным мотивом исследования стало появление публикаций о предсказании российскими учеными (Оганов) нового сверхтвердого и не слишком хрупкого материала – пентоборида вольфрама, который в отличие от алмаза и кубического нитрида бора, стабилен при нормальном давлении. Вместе с тем, уже к концу шестидесятых годов прошлого века в системе бор вольфрам было надежно установлено (Самсонов) образование как минимум 5 боридов и было известно об очень высокой твердости высшего борида, порядка 40 ГПа, т.е. практически такой же как у предсказанного Огановым пентаборида. Высшему бориду вольфрама посвящено много, как экспериментальных, так и теоретических работ, но его состав и структура продолжают дебатироваться. Экспериментальные же рентгенограммы и параметры решетки, приводимые в работах, говорят, что исследуется все тот же, известный с шестидесятых годов, борид. В литературе имеется немало описаний синтезов боридов вольфрама, однако о попытках синтеза боридов вольфрама с применением техники высоких динамических давлений ничего не известно. Поэтому мы провели эксперименты по синтезу высшего борида с применением подобной техники, т.е. в ампулах сохранения.

Проведенные эксперименты показали, что ударно-волновой синтез высшего борида вольфрама при 50 ГПа приводит к (удивительно) хорошим результатам, давая лишь незначительно загрязненный продукт. Его рентгенограмма и параметры решетки полностью соответствуют упомянутому выше известному с шестидесятых годов бориду, ранее считавшегося тетраборидом (WB_4). Вместе с тем анализ структуры, полученного борида, свидетельствует, что ей присущи некоторые особенности, характерные для структуры гипотетического пентаборида, предсказанного Огановым.

Исследование проведено в рамках темы государственного задания ФИЦ ПХФ и МХ РАН (рег. № 124020600049-8). Ударно-волновые эксперименты проведены с использованием приборной базы Уникальной научной установки “Экспериментальный взрывной стенд” ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

СТРУКТУРА ФРОНТА УДАРНЫХ ВОЛН В ЭМУЛЬСИОННЫХ ВВ ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Зубарева А.Н.[@], Лавров В.В., Уткин А.В.
Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН
[@] zan@ficp.ac.ru

Исследования ударно-волновых процессов в пористых материалах позволяет значительно расширить область реализуемых в экспериментах термодинамических состояний. Однако, в общем случае описание процесса эволюции импульсов сжатия в таких средах возможно лишь с привлечением достаточно сложных физических моделей, учитывающих неодномерность течения, неоднородность температурных полей, кинетику схлопывания пор и т.д. Ситуация ещё более усложняется, когда для получения пористого материала с заданными свойствами используются стеклянные микросферы, которые применяются в эмульсионных взрывчатых веществах. Применение модели Зельдовича возможно лишь при достаточно высоких давлениях, тогда как значительный практический интерес представляет область относительно низких давлений порядка 1 ГПа. В этих условиях существенное влияние на структуру импульса сжатия и характер его распространения оказывает кинетика схлопывания пор. В частности, это может приводить к проявлению материалом аномальных свойств, которые выражаются в «расплывании» фронта импульса сжатия. Ещё более кардинальным образом меняется поведение пористых химически-активных сред. Ярким примером являются эмульсионные взрывчатые вещества.

В качестве объектов исследования выбрана обратная эмульсия на основе водного раствора аммиачной селитры плотностью 1.354 г/см^3 с различной концентрацией полых стеклянных микросфер (1, 3 и 4% по массе), средний диаметр которых составляет 70 мкм, а средняя плотность 0.14 г/см^3.

Для исследования структуры импульсов сжатия при давлении ниже 1 ГПа использовался генератор ударных волн малой амплитуды. Регистрация профилей массовой скорости осуществлялась лазерным доплеровским интерферометром VISAR.

При низких давлениях характерной особенностью структуры импульсов сжатия в пористой эмульсии является формирование двухволновой конфигурации. Аналогичные волновые структуры наблюдается во всех пористых средах, но их параметры и динамика

распространения различны и зависят как от кинетики схлопывания пор, так и от реологических свойств материала. В пористой эмульсии амплитуда предвестника определяется порогом разрушения микросфер, после чего происходит необратимое изменение её реологических свойств. В данном случае снижение порога разрушения при увеличении концентрации микросфер связано, с изменением условий деформации при изменении концентрации микросфер. При малых концентрациях, когда микросферы, распределенные по объему эмульсионной матрицы, находятся на достаточном удалении друг от друга, давление начала разрушения будет максимальным. Появление точек контакта с увеличением концентрации микросфер способствует их разрушению при более низких давлениях. Скорость распространения предвестника составляет 0.66 м/с и 0.59 м/с при 3% и 4% микросфер. Скорость фронта второй волны сжатия равна соответственно 0.51 м/с и 0.4 м/с.

Предполагая, что волна сжатия является изоэнтропической, выполнен расчет траекторий изменения состояния в плоскости давление-удельный объем. Показано, что в эмульсионном ВВ при низких давлениях наблюдается «аномальная» сжимаемость, вызванная уменьшении скорости звука с ростом давления.

Работа выполнена в рамках Госзадания, регистрационный номер 124020600049-8

ПОЛУЧЕНИЕ СОКРИСТАЛЛОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ СУБЛИМАЦИИ

Зубачева Е.К.[1,@], Дмитриев М.В.[1,2], Дубасова Е.В.[3], Ананьев И.В.,[3] Моногаров К.А.[1], Муравьев Н.В.[1]

[1]*ФИЦ ХФ РАН*

[2]*МГУ имени М.В. Ломоносова*

[3]*ИОНХ РАН*

[@]ekaterina.kosareva@chph.ras.ru

Получение высокоэнергетических соединений с повышенной термической стабильностью и низкой чувствительностью к механическим воздействиям — одна из приоритетных задач в области исследования энергетических материалов. Перспективным способом для ее решения является сокристаллизация, позволяющая объединять несколько различных веществ в единую кристаллическую решетку и, за счет подбора компонентов, получать материалы с контролируемыми свойствами. Однако, основные методы сокристаллизации, в частности, кристаллизация из раствора и механическое измельчение, не всегда позволяют получить частицы необходимого размера и чистоты и зачастую не применимы к энергоемким соединениям, чувствительным к удару и трению. Более экологичной и безопасной альтернативой, позволяющей избежать механического воздействия и введения примесей, являются методы ре- и косублимации [1].

В работе представлен лабораторный метод получения сокристаллов органических энергетических материалов путем ресублимации отвержденного расплава реагентов, а также косублимации механической смеси исходных веществ. Предложена конструкция экспериментальной установки с двумя зонами нагрева, что способствует эффективному разделению продуктов сублимации и позволяет адаптировать условия эксперимента для веществ с различной термической стабильностью. Разработанный метод апробирован для смесей тринитротолуола с антраниловой и 4-аминобензойной кислотами, образование сокристаллов этих соединений в процессе ресублимации подтверждено методами порошковой рентгеновской дифракции и дифференциальной сканирующей калориметрии. Предложенный метод может быть использован для получения высокочистых сокристаллов для лабораторных исследований и поиска новых энергоемких и фармацевтических сокристаллов.

[1] McArdle P., Erxleben A., 2021, CrystEngComm **23**. 5965

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОЙ СМЕСИ ПОРИСТЫЙ КРЕМНИЙ — ПЕРХЛОРАТ БАРИЯ В ОТКРЫТЫХ КАНАЛАХ ДЛИНОЙ 15 И 17 СМ

Карпова А.А.[@], Воробьев И.М., Стовпяга Е.Ю., Улин В.П., Зегря Г.Г.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
[@] a.a.karpova@mail.ioffe.ru

Пористый кремний (ПК) — это монокристаллический кремний, в котором искусственным образом создана система пустот, называемых порами. Структура такого материала напоминает коралл или поролоновую губку.

Высокая удельная поверхность ПК, достигающая 900 $м^2/см^3$ [1], обеспечивает большую площадь контакта с окислителем, в качестве которого могут применяться нитраты и перхлораты различных металлов. Тепловой эффект экзотермической реакции ПК и перхлората натрия, протекающей в атмосфере воздуха, достигает 9 кДж/(1 г ПК), что почти вдвое превышает значение аналогичного параметра для тринитротолуола [2, 3]. Перечисленные особенности энергоемких смесей на основе ПК делают их перспективными инициирующими взрывчатыми веществами.

В настоящей работе исследовано распространение химического превращения в энергоемкой смеси ПК — перхлорат бария в открытых прямоугольных каналах шириной 2.6 мм и длиной 15 и 17 см. В случае использования перхлората бария это первое испытание подобного рода. В отличие от работы [4] ПК входил в состав энергоемкой смеси в виде порошка с размером частиц < 40 мкм, а длина канала увеличена вдвое. Определена скорость перемещения фронта реакции, а также проведено сравнение полученных результатов с опубликованными данными, которые характеризуют родственные энергоемкие материалы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-00426, https://rscf.ru/project/24-12-00426/

[1] Halimaoui A., 1994, Surf. Sci. Lett. **306.** L550-L554.

[2] Becker C.R., Currano L.J., Churaman W.A., Stoldt C.R., 2010, ACS Appl. Mater. Interfaces. **2.** 2998-3003.

[3] Sagi R., Tamburu C., Asscher, M., 2025, Academia Nano. **2.**

[4] Миронов В.Н., Голомако Е.С., Кривошеев П.Н., Пенязьков О.Г., Шумляев С.О., 2023, ИФЖ **96.** 1838-1852.

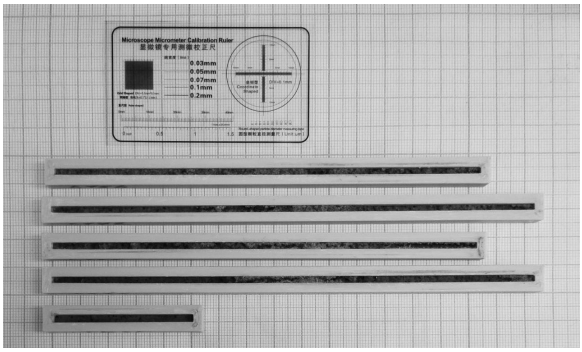


Рис. 1. Внешний вид образцов, содержащих энергоемкую смесь ПК — перхлорат бария

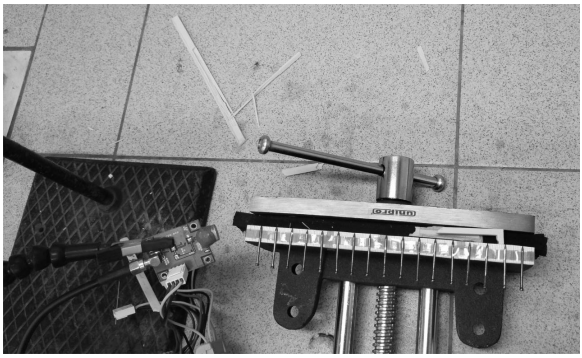


Рис. 2. Разрушенный контейнер после протекания химического превращения энергоемкой смеси ПК — перхлорат бария

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Козулин А.А.[1@], Петров П.О.[1], Каракулов В.В.[1], Гаркушин Г.В.[2], Савиных А.С.[2]

[1]*Томский государственный университет*

[2]*ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН*

[@] kzln2015@yandex.ru

Исследование посвящено оценке деформационного поведения и эффективных свойств тяжелого бетона при ударно-волновом сжатии, рассматривая его как сложноструктурированный композиционный материал. Актуальность работы обусловлена возросшими угрозами военного, техногенного и террористического воздействия на инфраструктурные объекты, изготовленные из бетонов, что требует теоретической оценки стойкости конструкций к экстремальным нагрузкам. Недостаток информации в открытом доступе по динамическим свойствам конкретных классов отечественных бетонов и методикам их численного моделирования создает проблему. Существующие подходы часто рассматривают бетон как однородный материал, игнорируя его композитную структуру, состоящую из цементной пасты и заполнителя с различными свойствами. Однако, особенности структуры при деформировании существенно влияют на механические свойства бетона. Необходимость описания динамических прочностных свойств отечественных бетонов разных классов, используемых в ответственных сооружениях, очевидна. Комплексная оценка с применением экспериментальных и теоретических методов позволит глубже понять физику деформационных процессов. Целью работы была оценка деформационного поведения и динамических свойств тяжелого бетона при ударно-волновом сжатии и поведения его структуры на мезоскопическом масштабном уровне, что достигалось выполнением экспериментальных работ и численного моделирования.

Эксперименты по ударно-волновому нагружению массивных цилиндрических образцов из тяжелого бетона класса В45 диаметром 105 мм длиной от 25 до 500 мм проводили во взрывной камере с использованием оригинальной экспериментальной оснастки включающей доплеровский интерферометрический измеритель скорости VISAR [1]. Давление ударного сжатия, создаваемое генератором ударных волн, было 3,8 ГПа длительностью до 10 мкс.

Вычислительный эксперимент проводился с использованием конечно-разностного метода Уилкинса в двумерной пространственной постановке. Рассматривалось нагружение плоской ударной волной фрагмента образца тяжелого бетона, состоящего из цементной матрицы и армирующих включений в форме крупного диабазового щебня. Наличие дефектов матрицы таких как микропористость, учитывалось определяющим уравнением в неявном виде.

Проведены измерения динамических прочностных свойств на сжатие цилиндрических образцов из тяжелого бетона класса В45 длинной от 25 до 500 мм при длительностях импульсов ударной нагрузки в десятки микросекунд. Получены экспериментальные зависимости эволюции импульсов ударного сжатия в образцах от их длины. Показано, что при ударном сжатии формируется упругий предвестник с плавным нарастанием напряжения на фронте, за которым следует пластическая ударная волна. Определены значения динамической прочности при сжатии и коэффициент динамического упрочнения при сжатии [2].

Созданная вычислительная модель позволяет оценить эффективные свойства исследуемого тяжелого бетона, как композиционной структуры при ударно-волновом нагружении. С использованием численного моделирования показано, что неупругая деформация бетона при динамическом нагружении обусловлена деформацией цементной пасты и перемещением частиц наполнителя на мезомасштабном уровне. Формирование диссипативной структуры приводит к изменению функции распределения скоростей частиц на мезомасштабном уровне. Функция распределения скоростей частиц за фронтом повторной ударной волны близка к логарифмически нормальной функции распределения. Формирование диссипативной структуры при нагружении ударной волной с амплитудой 1,2 ГПа сопровождается формированием бимодального распределения скоростей частиц материала в ударной волне [3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00750, https://rscf.ru/project/25-29-00750/

[1] Savinykh A.S., Garkushin G.V., Razorenov S.V., Kanel G.I., 2018, Int. J. Fract. **209**(1-2). 109-115.

[2] Петров П.О., и др. 2026, Журнал технической физики. **96**(3). 529-535.

[3] Козулин А.А., и др. 2026, Известия вузов. Физика. **69**(1) (818). 107-115.

КИНЕТИКА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДНЫХ ФУРАЗАНА

Котов Н.О.[1], Мельников И.Н.[1], Шереметев А.Б.[2],
Муравьев Н.В.[1], Пивкина А.Н.[1]
[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, г. Москва*
[2]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского Российской академии наук, г. Москва*
nikita.kotov@chph.ras.ru

При исследовании новых энергоемких материалов важным этапом является определение кинетических параметров разложения, с помощью которых возможно прогнозировать поведение вещества при длительном хранении или в случае аварийной ситуации.

В работе изучена кинетика термического разложения 3,4-диаминофуразана (DAF), 1,4-динитрофуразано[3,4-b]пиперазина (DNFP), дифуразано[3,4-c][3,4-h]тетраазадекалина (DFAD) и 1,4,5,8-тетранитродифуразано[3,4-c][3,4-h]тетраазадекалина (FTNAD) [1]. Согласно литературным данным, эти соединения обладают высокими значениями энтальпии образования и скорости горения. Кристаллическая плотность и скорость детонации рассматриваемых соединений сравнимы с такими энергетическими веществами, как октоген и гексоген, а FTNAD даже превосходит их (кристаллическая плотность оценивается свыше 1,97 г/см³, скорость детонации – 9,3 км/с) [2]. Исследуемые соединения известны более 30 лет, однако кинетика их термолиза остается слабо изученной, а имеющиеся в литературе сведения противоречивы.

Закономерности термического разложения данных соединений исследованы с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) при скорости нагрева 0.25-10 К/мин при атмосферном и повышенном давлении (2 МПа). Анализ экспериментальных данных выполнен с помощью метода Киссинджера, изоконверсионного подхода и формального кинетического моделирования.

Разложение расплава DAF описывается одностадийной моделью автокаталитической реакции. Термолиз расплава более структурно сложного соединения DNFP наилучшим образом описывается моделью с двумя последовательными стадиями. Твердофазный термолиз DFAD

и FTNAD характеризуется моделями реакций с тремя параллельными стадиями. На основе предложенных формально-кинетических моделей произведено моделирование термического поведения исследуемых соединений в реакторах различной геометрической формы при различных условиях нагревания.

Экспериментально определены параметры чувствительности исследуемых соединений к удару и трению и проанализирована взаимосвязь этих величин с термической стабильностью. Введение эксплозофорных групп в структуру соединения приводит к увеличению чувствительности и снижению термической стабильности для данного ряда веществ.

[1] Sheremetev, A. B.; Yudin, I. L. 2003, *Russ. Chem. Rev*. **72** (1). 87–100

[2] Sinditskii V.P., Smirnova A.D., Serushkin V.V., Aleksandrova N.S., Sheremetev A.B. 2020, Chem. Select. **5** (44).13868-13877

ПЛАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Крыкин М.Д.,[1@] Зубачева Е.К., [1] Муравьев Н.В.,[1] Мееров Д.Б., [1] Пивкина А.Н.[1]

[1]*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН*

maksimkr2300@yandex.ru

Энергонасыщенные материалы (ЭМ) включают в себя не только термостойкие, высокоплавкие вещества (гексоген, октоген), но и легкоплавкие соединения (2,4-динитротолуол, тротил) [1]. Известно, что чувствительность к удару является одним из параметров, определяющих условия безопасного применения ЭМ. Плавление, как один из процессов, предшествующих взрыву при ударном нагружении, может послужить опорной точкой для исследования условий возбуждения взрыва [2].

Ввиду сложности прямого наблюдения эффекта плавления при ударе из-за возникновения взрывчатого превращения ЭМ, на первом этапе работы исследован ряд «невзрывчатых» органических веществ в условиях ударного нагружения на копре типа ВАМ. В качестве объектов исследования выбраны вещества, температура плавления которых находится в диапазоне от 50 до 300 °С: азобензол, ацетанилид, бензанилид, бензил, адаптол. Экспериментально определена энергия удара, при которой возникает эффект плавления исследуемого образца. Наличие плавления определялось визуально по выплеску расплава из сборки, а также – при помощи оптической микроскопии в поляризованном свете. Получена зависимость энергии ударного нагружения от температуры плавления. На следующем этапе полученная зависимость соотнесена с чувствительностью к удару энергонасыщенных веществ и показана возможность оценки наличия плавления при ударном нагружении новых энергоемких веществ.

[1] Орлова Е.Ю., 1981, Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. Л. 312 с.

[2] Афанасьев Г.Т., Бобылев В.К., 1968, Инициирование твердых взрывчатых веществ ударом Н. 172 с.

ДЕТОНАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ АРОМАТИЧЕСКИХ ТРИНИТРОСОЕДИНЕНИЙ В ЗАРЯДАХ ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

Левшенков А.И.[1,@], Пешкова А.Э.[1], Балыков В.А.[1], Барышева С.Ю.[1], Мухамбетова К.К.[1]

[1]*Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева*

[@] antlew@rambler.ru

Полинитросоединения широко используются в качестве ЭМ, а также в других областях науки и техники. При использования в качестве бризантных ВВ для получения максимальных взрывчатых характеристик (теплоты, скорости и давления детонации), а также обеспечения прочности и однородности структуры заряда, их максимально уплотняют, например, методами прессования или литья. При получении, хранении и транспортировке они находятся в порошкообразном состоянии и могут рассматриваться как заряды пониженной плотности. Для многих известных соединений данного класса детонационная способность в зарядах пониженной плотности не исследована.

Детонационная способность энергонасыщенных материалов (ЭМ) является, с одной стороны, характеристикой надёжности срабатывания зарядов, с другой стороны – безопасности обращения с ЭМ. Чувствительность ЭМ к детонационному импульсу зависит от характеристик заряда – плотности, дисперсности и формы частиц ВВ, определяющих количество и размер горячих точек [1]. Многие промышленные продукты, например, ароматические ди- и даже мононитросоединения [2,3] могут приобретать взрывчатые свойства при снижении плотности, поскольку газовые включения играют роль горячих точек при детонации.

В РХТУ им. Д.И. Менделеева предложена методика определения чувствительности ЭМ к детонационному импульсу [4], по которой определены характеристики солей 5,5’-азотетразола [5] и ароматических динитросоединений [6]. Разработан алгоритм определения детонационной способности ЭМ [7]. Для ароматических динитросоединений показано влияние различных заместителей на детонационную способность [6].

В настоящей работе исследован ряд ароматических сим-тринитросоединений с неэксплозифорными заместителями, являющимися ВВ средней мощности по взрывчатым характеристикам

близким к тротилу. Для определения МИЗ были использованы медные трубки с внутренним диаметром 4-6 мм с толщиной стенки 1 мм. Для определения критического диаметра детонации - тонкостенные пластиковые трубки диаметром 1.5-10 мм. В качестве ИВВ использовали ТАТП и ТЭН, инициируемый ТАТП. ЭМ использовали в виде частиц размером около 100 мкм.

Определены МИЗ и критический диаметр детонации, проведён расчёт энергии минимального инициирующего импульса для ароматических тринитросоединений. Проведена оценка влияния на детонационную способность следующих заместителей в бензольном кольце: метильной группы, одной и трёх аминогрупп, одной, двух и трёх гидроксильных групп, карбоксильной группы, трёх атомов хлора.

Показано, что несмотря на близкое химическое строение и близкую теплоту взрыва, существуют существенные различия по детонационной способности внутри ряда ароматических тринитросоединений с неэксплозифорными заместителями. Влияние заместителей в тринитросоединениях аналогично их влиянию на детонационную способность в динитросоединениях [6].

[1] Котомин А.А., Душенок С.А., Козлов А.С. Успехи в химии и химической технологии: труды ВНТК посв. 80-летию ИХТ-факультета РХТУ им. Д.И. Менделеева, - М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, ДеЛи плюс, 2015. С. 201-206.

[2] Козак Г.Д., Кондриков Б.Н. Физика горения и взрыва, 1999, т. 35, № 1.

[3] Левшенкова Л.Е., Левшенков А.И., Стовбур К.Н. Успехи в химии и химической технологии, Т. XXVIII, №2, 2014, с. 75-79.

[4] Петрейкин А.А., Антипов Д.С., Кунаков А.А., Левшенкова Л.Е., Левшенков А.И. Успехи в химии и химической технологии, Т. XXX, №8, 2016, с. 37-38.

[5] Лазарев И.В., Левшенков А.И., Богданова Л.Е. Горение и взрыв, том 15, №1, 2022, с. 105-110.

[6] Юрков А.В., Левшенков А.И. Вестник СамГТУ. Серия «Взрывчатые вещества, пороха и твёрдые ракетные топлива. Синтез, свойства, технология.» вып. 16, ч. IV, 2023, с. 132-136.

[7] Левшенков А.И., Юрков А.В., Дёмичев И.С., Прохоров А.Э. Успехи в специальной химии и химической технологии. Материалы конференции. М. : РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2025. - 360 с. .

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРГАНИЧЕСКИХ ХЛОРСОДЕРЖАЩИХ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ ВЕЩЕСТВ

Манахова Е.С., Колесов В.И., Семененко С.В.
РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия
@ manakhovaes@mail.ru

При сгорании в кислороде хлорсодержащих органических энергонасыщенных веществ образуются реакционноспособные вещества, которые взаимодействуют с металлом калориметрической бомбы. В таких случаях рекомендуют использовать малодоступные галогеностойкие бомбы из специальных дорогостоящих материалов, а галогеновые соединения поглощать токсичными оксидами мышьяка [1].

В работе предложена методика определения термохимических характеристик: энтальпии образования, теплоты и состава газообразных продуктов взрыва. Предлагаемая методика учитывает вторичное взаимодействие продуктов сгорания с материалом калориметрической бомбы. На примере перхлората тетраметиламмония проведена апробация данной методики.

[1] Скуратов С.М., Колесов В.П., Воробьев А.Ф., Термохимия. Том 2. 1966, М: Издательство Московского университета. 375 с.

ДЕТОНАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ СМЕСЕЙ АММИАЧНОЙ СЕЛИТРЫ С ДИЗЕЛЬНЫМ ТОПЛИВОМ ПРИ РАЗЛИЧНОМ СООТНОШЕНИИ КОМПОНЕНТОВ

Михайлов А.В.[1,@], Лавров В.В.[2,3]
[1]*МГУ имени М.В.Ломоносова*
[2]*ФИЦ ПХФ и МХ РАН, г. Черноголовка, Россия*
[3]*ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия*
[@] sasha79181824612@yandex.ru

Взрывчатые смеси на основе аммиачной селитры (АС) с дизельным топливом (ДТ) являются широко используемыми ВВ во всем мире. Исследования подобных составов, относящихся к группе II и к классу неидеальных взрывчатых веществ, представляют собой особую трудность вследствие их низкой детонационной способности.

Фундаментальный интерес к исследованиям детонационных свойств неидеальных ВВ продиктован необходимостью верификации и совершенствования компьютерных кодов. С прикладной точки зрения серьезной задачей является оценка влияния свойств окружающей заряд среды на детонационную способность смесей на основе АС различного состава. Известно, что для мономолекулярных ВВ из группы I наличие стальной оболочки уменьшает критический диаметр детонации в 5-8 раз [1]. Взрывчатые составы на основе нитрата аммония обладают своими отличительными свойствами, поэтому для смесей АСДТ это соотношение может быть другим.

В настоящей работе были проведены исследования по оценке детонационной способности смесей АСДТ различного состава. Основным компонентом всех смесей являлась пористая АС.

В предварительной серии опытов такая оценка проводилась по длине прохождения затухающего взрывного процесса (Lp). Подобный критерий детонационной способности используется в современных международных классификациях для оценки взрывоопасности. Считается, что чем больше значение Lp в одинаковых условиях, тем лучшей детонационной способностью обладает данный состав.

Эксперименты проводились в оболочках из полипропилена с диаметром (d) 40,7 мм и толщиной стенки 4,6 мм, результаты экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость длины прохождения от состава смеси.

Содержание ДТ, %	0	2,5	5,5	8,5	11,5
Lp/d	3.0	5.7	6.7	6.1	4.0

Полученные данные показали, что стехиометрическая смесь АС/ДТ 94.5/5.5 обладает наилучшей детонационной способностью.

Оценка влияния свойств материала оболочки на детонационную способность проводилась на основе измерений скорости детонации ВВ также при различном соотношении компонентов смеси. Использовались оболочки из ПВХ и стали 20 с толщиной стенки 3,2 и 4 мм, соответственно. Для измерения скорости фронта использовались электроконтактные датчики. Сравнение проводилось для режимов с одинаковыми скоростями детонации. Экспериментальные данные приведены в таблице 2.

Таблица 2. Скорость детонации смесей в оболочках с разными свойствами.

Содержание ДТ, %	Плотность, г/см^3	Материал оболочки	d, мм	D, км/с
2,5	0,84	сталь 20	40	2,615
		ПВХ	103	2,85
5,5	0,87	сталь 20	40	3,13
		ПВХ	103	3,28
8,5	0,90	сталь 20	40	2,67
		ПВХ	103	2,66
		сталь 20	27	2,23; 2,05; 1,98 затухает
		ПЭ	66	отказ (19)*

*В скобках указано значение Lp/d.

Результаты измерений показали, что применение стальной оболочки позволяет улучшить детонационную способность смесей АСДТ в 2,5-2,6 раз. Важно отметить, что при меньших, чем критический, диаметрах заряда наблюдается подобное соотношение.

Полученные данные позволяют сделать выводы, что наилучшей детонационной способностью обладает стехиометрическая смесь АС/ДТ, и, что использование стальной оболочки приводит к ее улучшению, но в меньшей степени, чем для мономолекулярных взрывчатых веществ. Установленное соотношение между легкой и прочной оболочкой дает возможность предсказывать детонационные свойства составов на основе нитрата аммония при переходе от одних внешних условий к другим.

Работа выполнена в рамках государственного задания №FFSG-2024-0001.

[1] Физика взрыва/ Под ред. Л. П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – В 2 т. Т. 1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 832 с. – ISBN 5-9221-0219-2.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРАТИФИКАЦИИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ

Н.Н. Смирнов [1], Е.В. Михальченко [1,@]

[1] *Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва*

[@] MikhalchenkoLena@yandex.ru

В последнее время возрос интерес к детонации в неоднородно перемешанных смесях, что во многом обусловлено активным внедрением водородной инфраструктуры. При аварийной утечке водорода в замкнутых объемах образуется стратифицированная смесь горючего газа, с высокой концентрацией горючего в верхней части помещения и пониженной – в нижней. Изучение особенностей развития детонационных процессов в таких смесях имеет важное практическое значение. В работе по исследованию распространения детонационных волн в слое горючей смеси под слоем инертной смеси [1] показано, что критическая толщина слоя горючей смеси, в котором возможно распространение детонации, зависит от состава смеси. При этом, в исследовании [2] установлено, что детонационная волна эффективно разрушается, если толщина слоя инертного газа сравнима с размером детонационной ячейки. В настоящей работе выполнено сравнение влияния добавки инертного газа на горение и энергетику процесса распространение детонационных волн в системах слоев горючего газа с добавлением инертного разбавителя.

Работа выполнена за счет субсидии, выделенной НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ на выполнение государственного задания по теме No. FNEF-2024-0002 «Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения».

[1] Grune J., Sempert K., Friedrich A., Kuznetsov M., Jordan T., 2017. International Journal of Hydrogen Energy, 42 (11): 7589–7599.

[2] Медведев С. П., Максимова О. Г., Черепанова Т. Т., Агафонов Г. Л., Андержанов Э. К., Тереза А. М., Хомик С. В., 2022. Химическая физика, 41 (11): 73–78.

ВЛИЯНИЕ МИКРОСФЕР И ДИЭТИЛЕНТРИАМИНА НА ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В НИТРОМЕТАНЕ

Мочалова В.М.[1,@], Уткин А.В.[1], Шакула М.Ю. [1,2], Сосиков В.А.[1], Торунов С.И.[1], Рапота Д.Ю.[1], Лавров В.В.[1], Савченко А.В.[1], Колдунов С.А.[1]

[1]*ФИЦ ПХФ и МХ РАН, г.Черноголовка, Россия*

[2]*МФТИ, г.Долгопрудный, Россия*

[@] roxete20000@mail.ru

Нитрометан (НМ) – классический модельный объект физики детонации жидких взрывчатых веществ. Его чувствительностью можно управлять двумя принципиально разными способами: физическим – введением полых микросфер, создающих горячие точки, и химическим – добавлением аминов, ускоряющих кинетику разложения. Как правило, эти подходы изучались изолированно. В настоящей работе методами лазерной интерферометрии (VISAR) и высокоскоростной покадровой съёмки экспериментально исследованы тройные смеси гелеобразного НМ со стеклянными микросферами (0-13 мас.%) и диэтилентриамином (ДЭТА, 0-10 мас.%), что позволяет охарактеризовать совместное действие обоих механизмов.

Показано, что комбинирование физической и химической сенсибилизации даёт возможность в широком диапазоне варьировать критический диаметр детонации d_{cr} (от 16.5 до 2.7 мм) и давление в точке Чепмена-Жуге (от 13.0 до 1.8 ГПа). Установлено, что сенсибилизирующее действие ДЭТА на критический диаметр максимально при концентрациях микросфер менее 2 мас.% и практически исчезает при их более высоком содержании. Эффекты двух добавок не складываются аддитивно. Минимальный критический диаметр достигается в смеси с 2% ДЭТА, без микросфер, а их добавление к этой смеси не снижает, а увеличивает d_{cr}.

Показано также, что добавление 2 мас.% ДЭТА в гомогенный гелеобразный НМ стабилизирует детонационный фронт и изменяет структуру зоны реакции. Непосредственно за ударным скачком массовая скорость не убывает, а возрастает в течение первых 10 нс. Кроме того, с помощью покадровой съёмки впервые зарегистрирована пространственная структура горячих точек (размер неоднородностей 10-100 мкм, соответствующий размеру микросфер). Полученные результаты создают основу для направленного управления

чувствительностью и критическими условиями детонации композитных составов на основе жидких взрывчатых веществ.

Исследование выполнено в соответствии с темой Госзадания No.124020600049-8.

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ СЖИМАЕМОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Мочалова В.М.[1@], Уткин А.В.[1], Николаев Д.Н.[1], Ахметова М.А.[1], Мочалова Е.И.[2], Мисурагин З.В.[3]

[1]*ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН*

[2]*ПМГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России*

[3]*Национальный исследовательский университет «МЭИ»*

[@] roxete20000@mail.ru

Проведено экспериментальное исследование ударно-волновой сжимаемости гетерогенных анизотропных полимерных композиционных материалов: углепластика, угле-арамидного и арамидного композитов различной плотности от 1.27 до 1.60 г/см³. Эти материалы состоят из переплетённых волокон, скреплённых эпоксидной смолой, и обладают сильно выраженной анизотропией свойств – скорость звука вдоль волокон превышает скорость звука поперёк волокон.

Регистрация профилей массовой скорости выполнялась лазерным интерферометром VISAR с наносекундным временным разрешением. В каждом эксперименте определялись структура импульса сжатия и скорость ударной волны для продольной и поперечной ориентации волокон относительно фронта ударной волны. По результатам обработки экспериментальных данных построены ударные адиабаты углепластика, угле-арамидного и арамидного композитов для обеих ориентаций волокон в координатах «скорость ударной волны - массовая скорость» и «давление - удельный объём» до давлений 35 ГПа.

При распространении ударной волны вдоль волокон, в отличие от поперечной ориентации, наблюдается сложная структура фронта. Практически во всём диапазоне давлений регистрируется двухволновая конфигурация, наиболее отчётливо выраженная при низких давлениях. Она обусловлена анизотропной структурой образца: скорость распространения возмущений вдоль волокон превышает скорость ударной волны, что приводит к формированию предвестника. Для углепластика двухволновая конфигурация сохраняется во всём исследованном диапазоне давлений до 35 ГПа. Для угле-арамидного композита она исчезает при более высоком давлении, чем для арамидного композита, у которого двухволновая структура регистрируется до 12 ГПа. Эти различия связаны с разной скоростью звука вдоль волокон в указанных материалах.

Полученные ударные адиабаты для продольной и поперечной ориентаций волокон характеризуют динамическое поведение исследованных композитов в широком диапазоне давлений и могут быть использованы для построения и верификации двухкомпонентных моделей.

Исследование выполнено в соответствии с темой Госзадания No.124020600049-8.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

Назарова А.А.[@], Моногаров К.А., Пивкина А.Н.
ФИЦ ХФ РАН
[@] nazarovaamina03@gmail.com

Перспективным направлением в области формования энергоёмких материалов являются аддитивные технологии [1], в частности 3D-печать методом послойного наплавления. В отличие от традиционных методов, применение 3D-печати позволяет упростить процесс формования геометрически сложных изделий с развитой поверхностью горения из энергетических композитов (ЭК). Например, представителями ЭК являются смесевые твердые ракетные топлива, состоящие из частиц энергоемких материалов в матрице полимерного связующего.

В работе рассмотрен процесс 3D-печати энергетических композитных составов [2] на основе термопластичной полимерной матрицы (полилактида) и энергетического наполнителя (перхлората аммония).

Варьированием дисперсности наполнителя и добавлением поверхностно-активного вещества оптимизированы реологические свойства композита и предложена рецептура состава, пригодного для печати методом послойного наплавления. Представлены результаты комплексной оценки баллистических, реологических и физико-механических характеристик образцов, изготовленных методом 3D-печати разработанного состава. Проведён сравнительный анализ скорости горения образцов различной формы, полученных методами 3D-печати и горячего изостатического прессования.

[1] Muravyev N.V., Monogarov K.A., Schaller U., Fomenkov I.V., Pivkina A.N., 2019, Explos., Pyrotech. **44**. 941–969.

[2] Monogarov K.A., Fomenkov I.V., Pivkina A.N., 2020, Mendeleev Communications. **32**. 228–230.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ УДАРНО-СЖАТОГО ГАЗА В СВАРОЧНОМ ЗАЗОРЕ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Ниёзбеков Н.Н[2@]., Емельянов А.Н.[1], Шахрай Д.В.[1], Малахов А.Ю.[2]
[1]*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,*
[2]*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН*
@nemat199595@mail.ru

Сварка взрывом (СВ) – метод соединения в твёрдой фазе, позволяющий сваривать разнородные металлы, недоступные для традиционных способов сварки [1]. Перед точкой соударения пластин в сварочном зазоре формируется область ударно-сжатого газа (УСГ), температура которого может достигать 3000 К и выше, вызывая локальный нагрев и оплавление поверхностей до момента контакта. Корректное определение температуры УСГ необходимо для расчёта режимов СВ и прогнозирования качества соединения.

В работе разработана методика одновременного измерения яркостной и цветовой температур УСГ с помощью быстродействующих многоканальных пирометров оригинальной конструкции на основе кремниевых фотодиодов и узкополосных интерференционных светофильтров (полоса 40 нм). Световой сигнал собирался через кварцевый световод (диаметр сердцевины ~400 мкм) с цилиндрическим коллиматором. Эксперименты проводили при сварке взрывом стальных пластин с алюминиевыми размером 3×200×300 мм. Зазор между пластинами составил 4 мм, скорость детонации АСДТ – составила 2500 м/с.

Показано, что при измерении яркостной температуры необходимо вводить геометрическую поправку: в процессе приближения фронта УСГ к торцу световода площадь светящейся области меньше основания телесного угла светосбора, и корректные условия измерения выполняются лишь при расстоянии менее ~8 мм. Поправочный коэффициент определяется как отношение площади основания конуса светосбора к площади светящейся области шириной, равной сварочному зазору. Установлено, что яркостные температуры на разных длинах волн близки между собой, что свидетельствует о постоянстве излучательной способности $\varepsilon(\lambda)$ в видимом диапазоне. Это позволяет рассматривать УСГ как серое тело, для которого

цветовая температура совпадает с истинной независимо от величины ε. Следовательно, цветовая пирометрия является предпочтительным методом: она не требует геометрических поправок и абсолютной калибровки интенсивности [2].Экспериментально определено, что цветовая температура УСГ в сварочном зазоре составляет 4100–4400 К, что существенно превышает расчётное значение (~2800 К) для адиабатически сжатого газа.

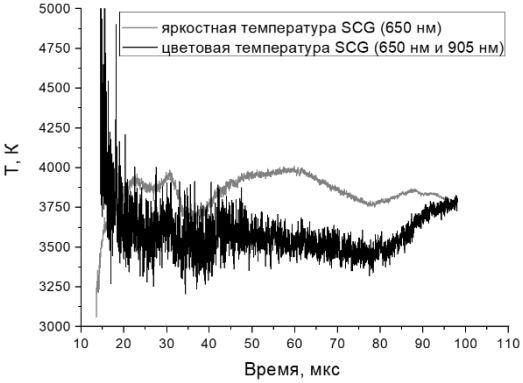


Рис.1. Цветовая и яркостная температура (с введенной геометрической поправкой)

Наблюдаемое превышение яркостной температуры над цветовой указывает на отклонение спектра излучения от планковского, вероятно, вследствие интенсивных спектральных линий, связанных с разогревом мелких металлических частиц, выносимых из зоны соударения пластин. Для выяснения природы этого явления необходимы спектральные исследования УСГ непосредственно в процессе сварки взрывом.

Полученные данные могут быть использованы при моделировании тепловых процессов в сварочном зазоре и при разработке технологических режимов сварки взрывом разнородных материалов.

Список литературы

1. Carvalho G.H.S.F.L., Galvão I., Mendes R., Leal R.M., Loureiro A. Explosive welding of aluminium to stainless steel // Metals. 2020. V. 10. P. 1062.

2. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия объектов с неизвестной излучательной способностью // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 4. С. 5–28.

УДАРНОЕ СЖАТИЕ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА ДО ДАВЛЕНИЯ 650 ГПА

Николаев Д.Н.[1,@], Ахметова М.А.[1]
[1] *Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской Химии РАН, 142432, Черноголовка, пр. Семенова, д. 1*
[@]nik@ficp.ac.ru

Полиметилметакрилат (ПММА) применяется в конструкции генераторов ударных волн, его ударно-волновые свойства необходимы для газодинамических расчетов. В качестве примера можно привести конические и цилиндрические Маховские кумулятивные генераторы ударных волн [1,2,3]. Основная ударная адиабата (УА) ПММА хорошо изучена в диапазоне давлений до 100 ГПа. В области высоких давлений доступны несколько точек [4], полученных в условиях подземного ядерного взрыва (давление 120, 200 и 500 ГПа). а так же данные с Z-машины [5] до 650 ГПа. В этой работе представлены результаты экспериментов с Маховскими кумулятивными генераторами [3], в которых была определена ударная сжимаемость ПММА до давления 650 ГПа, и температура фронта УВ до давления 900 ГПа. Ударная сжимаемость определялась методом отражения с эталоном из фторида лития или кварца, а температура фронта УВ измерялась при помощи оптической пирометрии. В отдельных экспериментах измерялись только температура и скорость ударного фронта, а давление рассчитывалось с использованием всего набора данных по УА ПММА. Температуры фронта УВ при таких давлениях были измерены впервые. Работа выполнена при поддержке государственного задания 124020600049-8.

[1] P. De Beaumont, J.Leygonie. Simposium on detonation, Pasadena, USA, c.507 (1970).

[2] Г.Дерентович. ПМТФ, **30**, 23–35 (1989)

[3] Nikolaev D., Ternovoi V., Kim V., Shutov A. Journal of Physics: Conference Series. **V. 500**. № 14. p. 1-5 (2014).

[4] Trunin R. Usp. Fiz. Nauk **164(11),** p.1215-1237 (1994)

[5] P Kalita, M. Knudson et al. J. Appl. Phys. **133**, 035902 (2023)

ВЗРЫВЫ АНДЕЗИТОВЫХ МАГМ: ВЕЩЕСТВО, ДИНАМИКА, МЕХАНИЗМ

Озеров А.Ю.[@]
Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский
[@] ozerov@ozerov.ru

Доклад посвящен исследованию природы взрывной деятельности в ходе извержений вязких и высоковязких магм андезитовых вулканов. Такой тип деятельности характерен для извержений вулка́нского типа и проявляется на вулканах Карымский, Авачинский, Безымянный и Шивелуч (Камчатка).

В процессе взрывных эпизодов сечение кратера одномоментно пересекают десятки-сотни раскаленных вулканических бомб, которые в виде вертикального столба/струи или веера выбрасываются на высоту десятков-сотен метров, в редких случаях – до километра. Во время вулка́нской деятельности многократно фиксировались ударные волны.

Важной чертой вулка́нской деятельности, изученной нами на вулкане Карымский, является существование двух уровней устойчивой периодичности/квазипериодичности. 1-й уровень (минутный) – взрыв и последующий интервал тишины; такая многократно повторяющаяся последовательность в различные этапы извержения имеет период от 3 до 30 мин. 2-й уровень (секундный) – во время продолжительных (более 20 сек) взрывов часто возникает чаггинг (процесс состоит из 10-25 циклов, имеющих период ~1 сек), который явно регистрируется в модуляциях акустического и сейсмического сигналов. После взрыва следует интервал тишины - полное отсутствие активности в кратере.

Динамические процессы в магматической колонне. Магматранспортирующая структура представляет собой протяженный трубообразный магмавод, в нижнюю часть которого с постоянной скоростью поступает новая магма, вверх по магмаводу движется ограниченный со всех сторон вертикальный поток невязкой и сжимаемой (за счет пузырьков, способных к деформации), магмы. В верхней части поток меняет свойства и превращается в короткую твердую, несжимаемую динамическую Пробку, в которой под большим давлением в запечатанном виде находятся биллионы мелких пузырьков, не способные к компенсаторному сжатию-расширению.

В современной науке нет объяснения природы/механизма вулка́нских взрывов, поэтому мы приступили к созданию лабораторных

установок для проведения физического моделирования процессов, определяющих взрывную деятельность рассматриваемых вулканов.

Лабораторная установка моделирования вязко-упругого движения включает: поверхности скольжения (плоские, плоскопараллельные, трубообразные), имеющие различные свойства шероховатости; ползунки (плоский, плоскопараллельный, цилиндрический), состоящие из резины или различных видов вспененных пластиков. Сдвиговое усилие прикладывается к ползунку при помощи металлического троса или динамической веревки; записи акустического сигнала, возникающего в процессе движения регистрируются микрофоном; выполняется фото-, видео регистрация.

Механизм взрыва – подготовка и реализация. Стадия покоя - граничное сдвиговое напряжение мало, динамическая Пробка «прилипает» к стенкам канала и скорость на границе раздела равна нулю. В это время в кратере отсутствует какая-либо деятельность.

Стадия взрыва состоит и 4-х фаз. Фаза 1 – срыв динамической Пробки и взрыв в кратере; фаза 2 – динамическая Пробка движется с высокой скоростью, при которой Пробка и стенки выводного канала не успевают зацепиться друг за друга; фаза 3 – в некотором интервале скоростей, возникающих при торможении динамической Пробки, она начинает зацепляться за стенки выводного канала, и реализуется последовательность мгновенных прилипаний и срывов; которая может состоять из десятков циклов, характеризующихся кратковременным периодом; фаза 4 – низкая скорость движения перед остановкой динамической Пробки, уменьшается энергия жесткого взаимодействия, и процесс зацепления теряет свою яркую периодическую компоненту. Затем происходит остановка и вулкан переходит в стадию покоя.

Исследования и эксперименты показали, что механизм вулка́нских взрывов обусловлен силами трения вязко-упругого движения магматической колонны вдоль стенок выводного канала, которые создают условия для накопления упругой энергии с ее последующей взрывной реализацией за счет газовой фазы, находящейся в магме под высоким давлением.

Работа выполнена в рамках «Межведомственной программы комплексных научных исследований Камчатского полуострова и сопредельных акваторий в 2024-2026 гг.» государственного задания Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН по теме НИР № FWME-2024-0015 «Изучение механизмов извержения Авачинского вулкана и создание методик оценки вулканической опасности».

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА МНОГОТОЧЕЧНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕХОДА К ТРЁХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ОБЖАТИЯ МНОГОВИТКОВОГО СОЛЕНОИДА

Рапота Д.Ю.[1,@], Дудин С.В[1], Сосиков В.А. [1], Торунов С.И. [1]
[1]*ФИЦ ПХФ и МХ РАН, г. Черноголовка*
[@] daniil.yurievichr@gmail.com

Настоящая работа посвящена совершенствованию метода многоточечного инициирования для формирования сходящейся ударной волны с обратной кривизной фронта и обеспечения её симметрии при схождении к центру заряда. Решение этой задачи критически важно для генерации сверхсильных магнитных полей методом осевого сжатия соленоида с током.

Ранее авторами были проведены экспериментальные исследования и численное моделирование процессов инициирования и начальной стадии движения детонационных волн (ДВ) в цилиндрическом заряде. Детально изучен механизм образования пространственных неоднородностей («жгутов» и «узлов»). На основе этих данных предложен метод сглаживания структуры ДВ путём модификации узлов инициирования и проведены эксперименты по обжатию магнитного поля с его применением.

Несмотря на положительную динамику в решении проблемы осесимметричности схождения фронта, эксперименты имели скорее двумерный характер, поскольку не выполнялось условие $L > 4R$ (L – длина, R – радиус соленоида). Переход к трёхмерным сборкам затруднялся рядом технических проблем, в частности невозможностью прессования однородного заряда из твёрдого ВВ с требуемыми параметрами и значительным усложнением конструкции при увеличении её длины.

В качестве возможного решения этих проблем в текущей работе предлагается заменить твёрдые взрывчатые составы на жидкие. С этой целью в качестве альтернативы была выбрана смесь нитрометана (НМ) с диэтилентриамином (ДЭТА) в соотношении 98/2 мас. %. Небольшая добавка амина позволила существенно уменьшить критический диаметр смеси, обеспечив её устойчивое инициирование в модулях. Новая конфигурация модулей временно лишилась инертных линз на их концах и системы позиционирования, став более однородной.

С данной модификацией была проведена серия пробных экспериментов в той же двумерной постановке для исследования

поведения сходящегося фронта ДВ в жидких ВВ. Их результаты показывают, что в выбранном составе неоднородности типа узлов и жгутов выражены слабее, однако фронт детонации сохраняет заметное искривление, а определяющее влияние на его форму оказывает разновременность инициирования. В связи с этим в качестве первоочередной задачи дальнейших работ определена модификация системы подрыва, а расчёт новых линз отнесён к следующему этапу и будет выполняться по мере необходимости.

Работа выполнена в рамках Госзадания, регистрационный номер 124020600049-8

МЕХАНИЗМ ГОРЕНИЯ НИТРОСОДЕРЖАЩИХ ОКИСЛИТЕЛЕЙ

Синдицкий В.П.,[1@] Егоршев В.Ю.,[1] Серушкин В.В.,[1] Филатов С.А.[1]
[1]*РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва*
[@] vps@muctr.ru

На сегодняшний день наиболее широко используемым окислителем в твердых ракетных топливах является перхлорат аммония, NH_4ClO_4 (AP), который обладает высоким кислородным балансом. Кроме того, у него есть очень важное свойство – скорость горения композиций на его основе зависит от размера частиц окислителя, что крайне важно для регулирования закономерностей горения твердых ракетных топлив. Однако продукты горения топлив на основе AP содержат HCl, что вызывает экологические проблемы. В этой связи во всем мире прилагаются значительные усилия по синтезу безгалогенных окислителей с целью замены используемого в настоящее время AP.

В работе рассматриваются результаты исследований закономерностей и механизма горения таких бесхлорных окислителей как динитрамид аммония (ADN), нитроформат гидразина (HNF) и 1-тринитрометил-3,4-динитропиразол (TNMDNP), а также их композиций с горючим. Исследования показывают, что механизм горения ADN различный на разных интервалах давления: 1) в интервале 0.02-1 МПа скорость горения ADN определяется кинетикой его разложения при температуре поверхности, которая контролируется испарением промежуточно образующегося нитрата аммония AN; 2) затем следует участок неустойчивого горения в интервале 1-10 МПа, обусловленный недостатком тепла на прогрев до температуры поверхности; 3) при давлениях свыше 10 МПа скорость горения ADN определяется кинетикой тепловыделения в газовой фазе. Добавка углеводородного горючего снижает скорость горения в 1 и 2 областях, в которых ведущая роль принадлежит конденсированной фазе и практически не влияет на скорость горения в области, где ведущая роль принадлежит газовой фазе.

Скорость горения нитроформата гидразина, несмотря на наличие высокотемпературного пламени, согласно тепловому балансу контролируется реакцией разложения в конденсированной фазе. С помощью термопарной методики определены температуры поверхности HNF и аммиачной соли ANF. Температура поверхности ANF оказалась ниже, чем температура поверхности HNF. Было

предположено, что, как и в случае с ADN, поверхность при горении HNF формируется за счет испарения промежуточного продукта разложения ANF. Действительно на температурных профилях при 0.04 и 0.1 МПа можно найти изломы с температурой близкой к температуре поверхности ANF. За ним следует аэрозольный слой, в котором испаряется HNF. На зависимости скорости горения HNF от давления при 2 МПа наблюдается излом с понижением показателя в законе горения. По всей видимости, при этом давлении температуры поверхности двух солей меняются местами и скорость горения HNF начинает контролироваться реакцией разложения при температуре диссоциации HNF. Поскольку теплота испарения HNF больше, чем у ANF, это приводит к уменьшению показателя в законе горения. Добавка углеводородного горючего снижает скорость горения HNF во всем исследованном интервале.

Окислитель 1-тринитрометил-3,4-динитропиразол TNMDNP обладает наименьшей скоростью из изученных в работе веществ. Анализ термопарных данных показал, что скорость горения TNMDNP зависит от скорости выделения тепла в конденсированной фазе, которая, в свою очередь, определяется кинетикой разложения при температуре поверхности горения.

Таким образом, исследование бесхлорных окислителей показывает, что относительно невысокая термическая стабильность этих соединений приводит к механизму горения с ведущей реакцией в конденсированной фазе. Образование при распаде нитросодержащих окислителей двух групп окислительных частиц, различающихся по реакционной способности, приводит к тому, что высокореакционные частицы (OH, NO_2, HNO_3) тратятся на окисление входящего в молекулу собственного горючего, а на окисление дополнительного горючего остается только малореакционные N_2O/NO, реагирующие во втором пламени, которое не контролирует скорость горения. В результате, несмотря на значительное повышение температуры горения, добавка углеводородного горючего к бесхлорным окислителям не приводит к росту скорости горения.

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ N-АЗАПРОИЗВОДНЫХ ПИРАЗОЛА

Смирнова А.Д.[1,@], Синдицкий В.П. [1], Мельникова Л.Я.[1], Юдин Н.В.[1], Далингер И.Л.[2], Коннов А.А.[2], Кленов М.М.[2]

[1]РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация

[2]ИОХ им. Н.Д. Зелинского РАН, г. Москва, Российская Федерация

[@] smirnova.a.d@muctr.ru

В работе изучены физико-химические свойства мостиковых азапроизводных нитропиразола 1,2-бис(3,4-динитро-1Н-пиразол-1-ил)диазена (3,4-DNPAz) и 1,2-бис(3,5-динитро-1Н-пиразол-1-ил)диазена (3,5-DNPAz) (Рисунок 1).

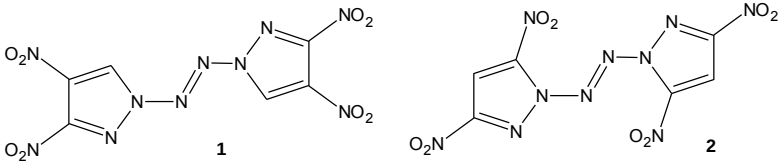


Рисунок 1. Структурные формулы изученных соединений: 1 - 3,4-DNPAz; 2 - 3,5- DNPAz

Последние исследования азотсодержащих гетероциклов [1,2,3,4] показывают, что введение азосвязи в молекулу увеличивает энтальпию и плотность. Расчётные параметры детонации 3,4-DNPAz и 3,5-DNPAz увеличились [5] по сравнению с N-аминопроизводными аналогами [6], однако при этом у азо-производных чувствительность к удару и трению оказалось выше, чем у широкоприменямого гексогена [5].

Исследование термического разложения двух изомерных соединений показало, что лимитирующей стадией является изомеризация азогрупп из транс-формы в менее стабильную цис-форму.

Исследование закономерностей горения показало, что оба азосоединения оказались относительно быстрогорящими веществами, при этом 3,5-DNPAz стабильно горит во всем изученном интервале давлений (начиная с атмосферного), а 3,4-DNPAz начинает устойчиво гореть с 0,2 МПа. Исследование распределения температуры в волне горения показало, что температуры поверхности 3,5-DNPAz сопоставимы с температурой поверхности RDX, в то время как 3,4-DNPAz демонстрирует значительно более высокие значения.

Установлено, что механизм горения изученных N,N′-азо-нитропроизводных пиразола разный: 3,5-DNPAz горит по газофазной модели, а 3,4-DNPAz горит с ведущей реакцией в конденсированной фазе. Различия в механизмах горения двух изомеров обусловлены, главным образом, существенной разницей в температурах их поверхности. Кинетика ведущей реакции, извлеченная из термопарных исследований, согласуется с низкотемпературными исследованиями термической стабильности 3,4-DNPAz, что позволяет считать, что ведущая реакция горения контролируется реакциями, происходящими в расплаве при температуре поверхности. Показано, что более низкие температуры поверхности 3,5-DNPAz могут быть обусловлены не летучестью самого исходного соединения, а испарением промежуточного продукта, 3,3',5,5'-тетранитро-1,1'-бипиразола.

[1] Sheremetev A.B., et al. 1998, Propel. Explos. Pyrotech. **23(3).** 142-149
[2] Zhang J., et al. 2015, J. Phys. Chem.C. **119(23).** 12887-12895
[3] Sinditskii V.P., et al. 2021, Energ. Mater. Front. **2(2).** 87-95
[4] Sheremetev A.B., et al. 2022, Def. Technol. **18(8).** 1369-1381
[5] Yin P., et al. 2014, Chem. Eur. J. **20.** 6707-6712
[6] Sinditskii V.P., et al. 2026, Comb. & Flame. **283.** 114584

РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ СВАРКИ ВЗРЫВОМ ЗА СЧЁТ ПЕРЕМЕННОЙ ВЫСОТЫ ЗАРЯДА

Ткаченко В.В.[1,@], Малахов А.Ю.
[1]*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН*
[@] tkachenkoism@mail.ru

Одним из перспективных методов получения биметаллических материалов является сварка взрывом, так как данный метод не требует больших затрат энергии и переналадки оборудования при изменении размеров или сочетания свариваемых слоёв, а также оказывает минимальное термическое воздействие на свариваемые поверхности, что практически исключает диффузионные процессы на границе соединения. Однако сварка взрывом может сопровождаться избыточной пластической деформацией свариваемых металлов, что приводит к образованию дефектов, проявляющихся в виде деформации удлинения, которая приводит к образованию микротрещин.

В работе на примере пары латунь Л63 – инвар 36Н с размерами пластин 1,7×205×255 мм и 4,8×205×255 мм соответственно показано, что сварка взрывом при режимах: скорость детонации D = 1900 м/с, скорость точки контакта Vк=1900 м/с, скорость метания V0 = 566 м/с – приводит к образованию продольной деформации удлинения в конечной области метаемой пластины. Для устранения продольной деформации удлинения предложена технологическая схема со ступенчатым расположением заряда взрывчатого вещества: на расстоянии 30 мм от конца образца высота заряда уменьшается, что обеспечивает снижение скорости точки контакта до Vк = 1750 м/с. Экспериментально подтверждено, что такое решение предотвращает чрезмерное удлинение метаемого слоя.

Кроме того, в образце со ступенчатым зарядом зафиксировано прекращение волнообразования в конечной зоне (на расстоянии около 242 мм от начала инициирования), что связано с падением давления продуктов детонации. Потеря волнообразования в данном случае является положительным фактором, так как она сопровождается снижением количества литых включений в зоне соединения. Литые включения, состоящие из элементов Cu–Zn–Fe–Ni [1], присутствуют локально по всей длине границы раздела, однако при использовании ступенчатого заряда их содержание в конечной области уменьшается.

При этом во всех полученных образцах достигнута 100% сплошность соединения.

Таким образом, использование ступенчатого заряда ВВ является эффективным технологическим приёмом, позволяющим исключить поверхностные дефекты метаемого слоя, снизить содержание литых включений в конечной зоне соединения и обеспечить высокое качество биметаллических пластин.

[1] Malakhov, A.; Epishin, A.; Denisov, I.; Saikov, I.; Nolze, G. Morphology and Structure of Brass–Invar Weld Interface after Explosive Welding. Materials 2022, 15, 8587. https://doi.org/10.3390/ma15238587.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В ВВ АЗИД ТАЛЛИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С.В. Баталов, И.А. Мальцев, С.С. Устинов
ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, РФ
@ vniitf@vniitf.ru

Развитие элементной базы лазерных систем, в частности, компактных и относительно недорогих полупроводниковых лазерных диодов (ЛД), излучающих в ближнем инфракрасном диапазоне, открывает широкие возможности для создания на их основе систем и средств инициирования взрывчатых веществ (ВВ) различного назначения. Одним из актуальных вопросов при этом остается разработка новых вторичных светочувствительных ВВ с минимальной пороговой энергией инициирования.

В настоящее время проведено значительное количество исследований по разработке рецептуры и лабораторной технологии получения высокодисперсных светочувствительных вторичных ВВ, в частности, азида таллия (АТ) с добавлением фуллероидного наномодификатора астралена [1, 2] (АТ-м).

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований по лазерному инициированию образцов ВВ АТ и АТ-м. Содержание астралена в исследуемых образцах АТ-м – не более 2 масс.%. Геометрические размеры исследуемых образцов: высота 10 мм, диаметр 3,6 мм. Плотность образцов ~ 4,9 г/см^3.

Инициирование образцов осуществлялось лазерным излучением с длиной волны (915±5) нм. Длительность инициирующего импульса составляла 100 мкс.

Узел ввода лазерного излучения позволял изменять диаметр светового пятна на поверхности ВВ от 0,13 до 2,36 мм. В результате исследований определено, что введение в ВВ АТ астралена позволяет снизить пороговую энергию инициирования с 1,90 до 0,25 мДж (при диаметре пятна излучения 0,13 мм). Полученные результаты обусловлены как интенсивным поглощением лазерного излучения частицами астралена с образованием так называемых "горячих" точек [3], так образованием синглетно-возбужденного кислорода, активно

участвующего в процессах возникновения и протекания реакции взрывчатого превращения [1].

При увеличении диаметра области облучения исследуемых образцов ВВ АТ-м с 0,13 мм до 2,36 мм пороговая плотность энергии инициирования снижается с 1,88 до 0,43 Дж/см^2. Это связано с резким возрастанием количества "горячих" точек в области воздействия, что в свою очередь влияет на процесс возникновения и характер развития реакции горения, а также ее переход во взрывчатое превращение.

Зарегистрированное среднее время срабатывания исследуемых образцов при пороговой энергии инициирования составило 61,7 мкс для образцов АТ и 33,3 мкс для образцов АТ-м.

Увеличение амплитуды давления на фронте детонационной волны с 8,5 ГПа (для образцов АТ) до 11,1 ГПа (для образцов АТ-м), а также соответствующее уменьшение времени срабатывания показывает, что возникновение и развитие процесса взрывчатого превращения и переход его в детонацию в прессованных образцах модифицированных ВВ происходит на более коротких базах.

Таким образом, использование фуллероидного углеродного наномодификатора астралена в рецептуре вторичных высокодисперсных ВВ, в частности, в ВВ АТ-м, способствует значительному снижению пороговой энергии инициирования при лазерном задействовании и увеличению скорости протекания процесса взрывчатого превращения. Полученные на примере АТ-м результаты позволяют определить оптимальное соотношение параметров инициирующего импульса и быстродействия при разработке исполнительных элементов систем инициирования с лазерным задействованием различного назначения повышенной эффективности, безопасности и надежности на основе вторичных модифицированных ВВ с использованием малогабаритных и недорогих полупроводниковых ЛД.

[1] Баталов С.В., Агеев М.В., Федотов С.А., Смирнов А.В., Ведерников Ю.Н. Инициирующий состав и способ его получения. Патент №2729490. 2020.

[2] Пономарев А.Н., Юдович М.Е. Многослойные углеродные наночастицы фуллероидного типа тороидальной формы. Патент №2397950. 2010.

[3] Damm D., Maiorov M. Thermal and Radiative Transport Analysis of Laser Ignition of Energetic Materials // Proc. of SPIE., 2010, V. 7795, 779502.

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ.

Федоров А.В.[@], Финюшин С.А., Чудаков Е.А., Калашников Д.А., Гнутов И.С., Яговкин А.О.
РФЯЦ — ВНИИЭФ, г.Саров, Россия
[@] avfedorov@vniief.ru

С помощью лазерных интерферометрических методов проведены экспериментальные исследования параметров пыления свинца, олова, меди и других металлов при их ударноволновом нагружении в широком диапазоне давлений. Метод PDV позволяет регистрировать скорость свободной поверхности, поле скоростей и удельную массу потока частиц, определять размер частиц по их торможению в газовой среде.

В большинстве экспериментов регистрировались скорость поверхности и, с помощью индикаторных фольг и тонких стекол, удельная масса пылевого потока. Построены зависимости распределения удельной массы частиц от времени и относительной скорости. Проанализировано влияние шероховатости и фазового состояния вещества после ударноволнового нагружения на возможности регистрации скорости свободной поверхности и определения удельной массы выброшенных частиц. Показано, что при заданной шероховатости поверхности удельная масса пыли, выбрасываемая с поверхности при ударноволновом плавлении исследуемых металлов, существенно больше, чем для образца, находящегося в твердом состоянии. Для полированных образцов при достижении порогового давления, соответствующего плавлению вещества, происходит резкое увеличение массы выбрасываемых частиц. С помощью этого эффекта определена величина начала плавления ряда металлов на волне разгрузки после их ударноволнового нагружения.

Исследовалась также динамика движения частиц металлов в газовых средах. Для определения характерного размера частиц использовался закон их торможения в газах. Для исследуемых металлов определены характерные размеры частиц и фрагментов. Размер частиц в каждом конкретном случае определяется источником пыления (материал, шероховатость, фазовое состояние и т.п.).

ВЛИЯНИЕ НИХРОМА И ВОЛЬФРАМА НА ТЕМПЕРАТУРУ И СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ В СИСТЕМЕ Ti+C

Антипов М.С.[1,@], Бажин П.М.[1], Столин А.М.[1], Бажина А.Д.[1], Иванов А.С.[1]

[1]*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН*

[@] m_antipov@ism.ac.ru

В технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [1] большое внимание уделяется изучению процессов горения исходных компонентов на основе керамики и металлокерамики. Актуальность изучения процессов горения заключается в приобретении дополнительных навыков, понимания и оптимизации процесса синтеза композиционных твердых сплавов. Целью данной работы является изучение влияния нихрома и вольфрама на температуру и скорость горения в системе Ti+C в зависимости от относительной плотности шихтовой заготовки. В качестве исходных реагентов были взяты коммерческие порошки титана, сажи, нихрома и вольфрама.

Определение температуры и скорости горения шихтовой заготовки играет важную роль в формировании конечного изделия методом СВС в сочетании с пластической деформацией (СВС-экструзия [2] и СВС-сжатие [3]). Экспериментальным путем были установлены оптимальные относительные плотности шихтовых заготовок, при которых достигается максимальная температура и скорость горения. Установлено, что при добавлении от 5 до 60 мас. % NiCr в систему Ti+C наблюдается снижение температуры горения с 2450℃ до 1610℃, а скорости горения с 50 мм/с до 3,8 мм/с.

Для исследования температуры и скорости с добавлением вольфрама было взято 20-40 мас. % NiCr и 5-10 мас. % W. Экспериментальным путем были также определены оптимальные относительные плотности. Установлено, что температура горения снижается с 2180℃ до 1950℃ и скорость горения с 16,6 мм/с до 8,3 мм/с. Такое снижение можно связать с тем, что выделяемое тепло реакции между Ti и C уходит на плавление как NiCr, так и тугоплавкого элемента вольфрама.

Определение температуры и скорости горения позволяет определить температурно-временной интервал, при котором синтезированная шихтовая заготовка обладает максимальной пластичностью, что является важным критерием в проведении СВС в

сочетании с пластической деформацией для получения готовых изделий.

[1] Bazhin P.M., Antipov M.S., Kozerozhets I.V., Nikiforova S.E., Avdeeva V.V., Malinina E.A., 2025, Inorg. Chem. Commun. **180.** 115030

[2] Bazhin P.M., Chizhikov A.P., Stolin A.M., Antipov M.S., Konstantinov A.S., 2021, Ceram. Int. **47.** 28444-28448

[3] Бажина А.Д., Антипов М.С., Константинов А.С., Столин П.А., Зверев И.В., Романов А.О., Ремшев Е.Ю., Бажин П.М., 2025, Композиты и наноструктуры. **17.** 190-199

РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ ТРЁХКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ CuO – Ti - Al

Бакешко А.В., Алешин В.В., Смирнов В.С., Михайлов Ю.М.
ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии РАН
bav@icp.ac.ru

Известно, что горение стехиометрической смеси оксида меди с мелкодисперсным порошком алюминия протекает с высокой скоростью, и напоминает собой взрыв. В литературе не обнаружено сведений о влиянии соотношения компонентов в системе оксид меди – алюминий – титан на характеристики горения таких смесей.

Целью работы было изучение влияния соотношения исходных компонентов в системе оксид меди – алюминий – титан на режимы и скорость горения таких смесей.

Поскольку такие системы имеют высокую теплопроводность и низкую теплоёмкость, то у них высокая температура зажигания. По этой причине для их поджога использовался мощный зажигающий состав на основе смеси оксида молибдена с алюминием.

В результате экспериментального исследования горения смесей оксида меди, титана и алюминия с шагом изменения соотношения компонентов 5% на треугольнике Гиббса ограничены области, соответствующие различным режимам горения в этой системе (Рис. 1).

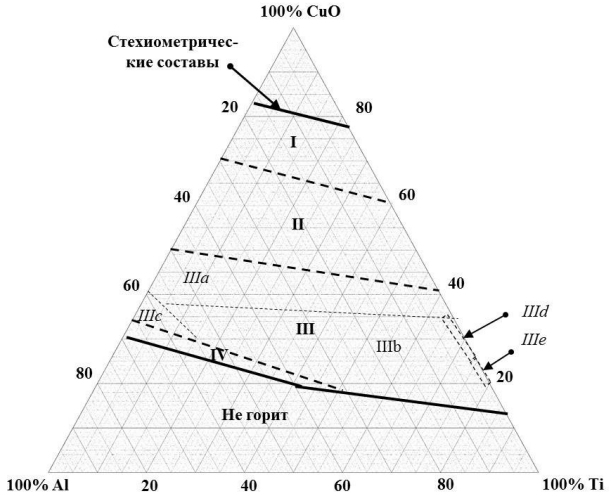


Рис.1. Режимы горения смесей оксида меди с алюминием и титаном.

Можно отметить, что при горении смесей оксида меди с титаном и алюминием имеют место четыре основных режима; огненный шар (I), огненный факел (II), очаговый (III) и автоколебательный (IV). В свою очередь, очаговый режим горения в этой системе имеет пять разновидностей; сочетание конвективного и многоочагового режимов с полным расплавлением продуктов горения (IIIa), многоочаговый режим, когда продукты горения сохраняют форму исходного образца (IIIb) и спиновый режим с единичным очагом горения (IIIc). Кроме того, для двухкомпонентной системы оксид меди – титан характерны два режима многоочагового горения – ранее не известный режим горения с быстрым формированием вторичного фронта горения, перемещающегося навстречу первичному фронту (IIId) и режим с периодическим срывом продуктов горения с реакционной поверхности (IIIc).

Перечисленные режимы горения смесей оксида меди с титаном и алюминием охватывают практически все возможные способы распространения волны горения в термитных смесях кроме режима тления.

Работа выполнена по теме Государственного задания, номер государственной регистрации № 124020100045-5.

СИНТЕЗ БОРИДОВ И СИЛИЦИДОВ ЖЕЛЕЗА, КОБАЛЬТА И НИКЕЛЯ В ВОЛНЕ ГОРЕНИЯ ГЕКСОГЕНА.

Бакешко А.В., Алешин В.В., Смирнов В.С., Михайлов Ю.М.
ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии РАН
bav@icp.ac.ru

Известно, что в волне беспламенного низкотемпературного горения энергетического компонента может происходить восстановление прекурсоров переходных с образованием наноразмерных частиц соответствующих низших или 0-валентных металлов. Представляет интерес оценить возможность получения в этом процессе не только продуктов восстановления прекурсоров, но и возможность получения других соединений переходных металлов.

Целью работы была оценка возможности получения в волне беспламенного горения боридов и силицидов железа, кобальта и никеля.

В результате беспламенного горения исходных смесей при температурах до 700°C происходит образование пористого материала, содержащего кроме исходного бора только наноразмерные частицы оксидов железа. При увеличении содержания гексогена в исходных смесях более 40% максимальная температура достигает 700-900°C, а в продуктах реакции идентифицируются бориды железа (FeB, FeB_2). При этой температуре органическое связующее полностью карбонизируется, а твердые продукты горения представляют собой черный порошок.

Заметное уширение дифракционных линий боридов железа свидетельствует о наноразмерности образующихся частиц. Следует заметить, что синтез боридов железа происходит при температурах значительно выше 600°C, что выводит этот процесс за принятые рамки определения “беспламенное горение”. Однако, как и в случае “беспламенного горения”, весь процесс протекает в многоочаговом режиме с пространственной дискретизацией волны горения, так как во время горения ясно наблюдаются светящиеся очаги горения, перемещающиеся в поперечном направлении относительно оси образца.

Таким же образом были получены бориды кобальта (CoB, Co_2B) из карбоната кобальта и никеля (Ni_2B) из гидроксокарбоната никеля.

Как и в предыдущем случае, попытка формирования наноразмерных частиц силицидов в результате восстановления прекурсоров элементов триады железа в волне беспламенного горения гексогена в присутствии порошкообразного кремния сразу не дала положительных результатов. По аналогии с предыдущем случаем, была сделана попытка добиться образования целевых силицидов за счет роста максимальной

температуры горения путем увеличения содержания гексогена в исходных смесях. Действительно, при содержании гексогена в исходных смесях выше 40 % максимальная температура достигает 700-800°С, а в продуктах реакции идентифицируются соответствующие силициды. При этой температуре органическое связующее полностью карбонизуется. Таким образом получены силицид железа ($FeSi_2$), кобальта (CoSi) и никеля (Ni_3Si_2). Существенное уширение дифракционных линий силицида никеля свидетельствует о наноразмерности образующихся частиц.

Работа выполнена по теме Государственного задания, номер государственной регистрации № 124020100045-5.

ПРИМЕНЕНИЕ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Мокрушин В.В., Царев М.В., Коршунов К.В., Постников А.Ю., Забавин Е.В.[@], Царева И.А.

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)

[@] mos@dep19.vniief.ru

В докладе представлены примеры использования метода импедансной спектроскопии для исследования структуры и свойств микронных и нанодисперсных материалов, применяемых в качестве компонентов высокоэнергетических порошковых композиций [1]. Изложены методические основы измерения импеданса порошковых материалов в процессе ступенчатого сжатия. Показаны возможности импедансной спектроскопии применительно к исследованию проводящих характеристик межчастичных контактов в порошковой дисперсной среде и динамике их изменения при уплотняющих нагрузках.

[1] Mokrushin V.V., 2014, Int. Journal of SHS. **23 (1)**. 26-35

ПРИМЕНЕНИЕ СВС-ЭЛЕКТРОДОВ НА ОСНОВЕ TIC-NICR-W, ПОЛУЧЕННЫХ СВС-ЭКСТРУЗИЕЙ, В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

Иванов А.С.[1@], Антипов М.С.[1], Столин А.М.[1], Бажин П.М.[1]
[1]*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова*
[@] ia.ivanov2012@yandex.ru

Усовершенствование деталей, работающих в условиях абразивного износа, является актуальным вопросом. Модернизация и разработка упрочняющих сплавов и видов покрытий позволяют повысить износостойкость поверхностного слоя [1, 2]. В работе [3] показана перспективность применения экструдированных электродов методом СВС-экструзии с химическим составом TiC-NiCr-W в качестве покрытий, нанесённых электроискровым легированием на ножи саломоизмельчителя комбайна, ножи для косилок и металлообрабатывающие сверла. Полученное покрытие существенно упрочнило режущую кромку и повысило износостойкость.

В данной работе рассматривается применение электродов на основе TiC-NiCr-W, полученных методом СВС, в качестве электродов для электродуговой наплавки на стальную подложку марки Ст3. Диаметр экструдированного электрода составил 5 мм. Нанесение наплавочных покрытий проводилось при помощи электродуговой сварки в среде аргона с неплавящимся электродом WL-20. Сила тока была выбрана 180 А и 200 А. Данные режимы позволили получить качественные покрытия без видимых дефектов с переходной зоной, в которой наблюдается хорошее диффундирование наплавочного материала в подложку.

Сравнивая твердость наплавочных покрытий (рис. 1) со значениями твердости сталей Ст3 и 65Г после термической обработки (ТО), которые могут применяться в производстве рабочих элементов сельскохозяйственных машин (плугов, культиваторов, борон), установлено, что микротвердость стали Ст3 составила 2 ГПа, а микротвердость стали 65Г после ТО – 4,5 ГПа, что хорошо согласуется со справочными данными. Микротвердость на поверхности наплавочного слоя при силе тока 180 А составила 8 ГПа, а при увеличении силы тока до 200 А микротвердость повышается до 12 ГПа. Значения микротвердости нанесенных покрытий плавно снижаются за счет уменьшения концентрации карбидных составляющих.

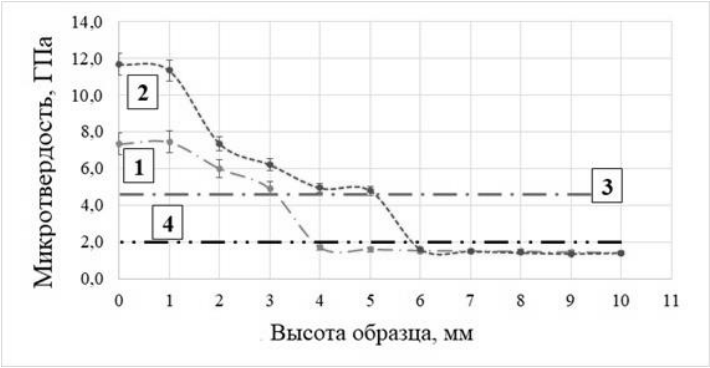


Рис.1. Микротвердость наплавочных покрытий и исходной подложки: 1 – 180 А, 2 – 200 А, 3 – сталь 65Г после ТО, 4 – сталь Ст3

Высокие значения микротвёрдости наплавочных покрытий, напрямую связано с количеством карбидной фазы в наплавочном слое. Также стоит отметить, что при более высоких температурах, возникающих при повышении силы тока (до 200 А), происходит более интенсивный переход хрома в твёрдый раствор на основе нихромовой матрицы. Это обеспечивает дополнительное твёрдорастворное упрочнение металлической связки, которая удерживает карбидные частицы. Проводя сравнительный анализ микротвёрдости нанесённых покрытий и сталей Ст3 и 65Г после ТО, установлено повышение её значения до 6 раз.

[1] Дуань Х., Жэнь С., Пантелеенко Ф.И., Лю Ч., 2026, Литьё и металлургия, **1.** 122-134

[2] Кабилов Б.У.У., 2024, Universum: технические науки, **5.** 18-19

[3] Антипов М.С., Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2025, 158

Получение интерметаллидных стержней горячей газовой экструзией механически активированной порошковой смеси nNi+Al

Кириллов А.О. [@], Галиев Ф.Ф. , Малахов А.Ю.

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, ул. Академика Осипьяна, д.8, г. Черноголовка, Московская область, 142432, Россия
[@]kira@ism.ac.ru

Альтернативой традиционным методам изготовления интерметаллидных и керамических стержней в металлической оболочке (прокатка, волочение и т.п.) является метод, совмещающий горячую газовую экструзию (ГГЭ) и самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). Такой метод позволяет провести синтез и деформацию интерметаллидов Ni-Al из порошковой смеси в металлической оболочке в одну технологическую стадию с максимальной долей целевого продукта (фаза NiAl) до 78 масс. % [1]. Для повышения доли целевого продукта применяются такие подходы, как уменьшение размера частиц порошков, их механическая активация и другие [2]. В связи с этим целью работы являлось установление влияния механической активации смеси нанопорошка никеля с порошком алюминия на долю целевого продукта и микроструктуру интерметаллидного стержня, полученного методом ГГЭ.

В работе были использованы порошки коммерческого Al (АСД-1) и нанопорошка Ni, полученный химико-металлургическим методом. Порошковая смесь изготавливалась в соотношении 1:1 с предварительной механической активацией исходной порошковой смеси в планетарной шаровой мельнице АГО-2 с центростремительным ускорением 100g в течение 60 с. Порошковая смесь после механической активации помещалась в специальную стальную ампулу. Затем проводилась ГГЭ при давлении газа равным 200 МПа с одновременным локальным нагревом области деформации до 550 ^{o}C. Фазовый состав целевого продукта был определен с помощью рентгенофазового анализа, микроструктура исследовалась на электронном микроскопе с системой микроанализа.

Фазовый анализ сердцевины стержней показал, что доля фазы NiAl достигает 90 масс.%. Анализ микроструктуры показал, что в сердцевине присутствуют зерна никеля размером до 50 мкм, окруженные слоем интерметаллида Ni_3Al толщиной ~1 мкм. Так же присутствуют

перпендикулярные трещины по всей длине сердцевины. Образование крупных зерен никеля указывает на то, что в процессе газовой экструзии происходит плавление частиц никеля и их коалесценция, несмотря на механическую активацию порошковой смеси. Такая микроструктура могла быть образована в следствие замедления диффузии между Ni и Al из-за образования барьера из интерметаллида Ni_2Al_3 в начальное время реакции. Таким образом, максимальная доля целевого продукта механически активированной порошковой смеси, состоящей из нанопорошка никеля и порошка алюминия, в условиях ГГЭ составляет 90 масс.%. Растрескивание интерметаллидной сердцевины предположительно происходит из-за образования твердых и хрупких продуктов реакции до начала деформации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №25-29-00735. (https://rscf.ru/project/25-29-00735/)

[1] Galiev F.F., 2024, Inorg. Mater.: Appl. Res. 15, 772.
[2] Рогачев А.С., 2013, Физматлит. 395.

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Ti-Si-C С ДОБАВЛЕНИЕМ ZrC МЕТОДОМ СВОБОДНОГО СВС-СЖАТИЯ

Куликова А.Е.[@], Константинов А.С., Чижиков А.П., Бажина А.Д.
Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А. Г. Мержанова РАН, Черноголовка, РФ
[@] coolbird@ism.ac.ru

MAX-фазы являются слоистыми соединениями со стехиометрией $M_{n+1}AX_n$, где M - переходный металл, A - элемент A-группы и X - C, N, B и/или P. MAX-фазы обладают свойствами как металлов, так и керамики, в частности MAX-фаза Ti_3SiC_2 обладает высокими тепло- и электропроводностью, хорошей обрабатываемостью, обладает стойкостью к тепловому удару, низким коэффициентом трения и высокой температурой плавления. Благодаря этому, MAX-фазы нашли применение во многих областях и используются в качестве жаростойких покрытий, абразивов, элементов композиционных материалов, как детали двигателей и фильтрационные мембраны [1]. На сегодняшний день помимо получения чистых MAX-фаз, эти соединения исследуются и для применения в качестве матриц композиционных материалов. В данной работе получение композитов на основе MAX-фазы Ti_3SiC_2 с добавлением карбида циркония проводили методом свободного СВС-сжатия. Данный метод позволяет получить материалы с минимальной пористостью в одну стадию, также метод СВС не требует нагрева, что позволяет синтезировать тугоплавкие соединения с минимальными энергетическими затратами [2].

Образцы были получены методом свободного СВС-сжатия. Исходные порошки титан, кремний и сажа, были взяты в стехиометрическом соотношении для получения MAX-фазы Ti_3SiC_2. Также к смеси было добавлено 10 масс.% ZrC. Смесь порошков была перемешана в барабанной мельнице, после чего были спрессованы заготовки. Инициация реакции проводилась с помощью вольфрамовой спирали, после того как волна горения проходила по образцу, к нему было приложено давление. Далее был проведен вакуумный отжиг при температуре 1300 °C. Образцы были исследованы с помощью методов рентгеновской дифракции и СЭМ, а также были измерены их механические характеристики до и после отжига.

По результатам рентгенофазового анализа установлено, что образцы до и после отжига состоят из карбида титана, силицида титана и MAX-фазы Ti_3SiC_2. СЭМ показал, что материал имеет слоистую структуру, свойственную MAX-фазам. Отжиг привел к небольшому снижению механических характеристик образцов, так твердость образцов снизилась с 923 до 785 HV, однако процент упругого восстановления немного увеличился с 38 до 44 %.

Работа выполнена при поддержке РНФ грант № 25-19-00648.

[1] Alam Md.Sh., 2024, RSC Adv. **14.** 26995-27041.
[2] Чижиков А.П., 2024, Новые огнеупоры. **4.** С. 22-28.

ПРИМЕНЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОНСОЛИДАЦИИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА $Ti_{20}Al_3Si_9$, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СВС

Lazarev P.A.[1], Sytchev A.E.[1], Busurina M.L.[1], Boyarchenko O.D.[1]
[1]*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова, Черноголовка, Россия*
E-mail: Lazarev@ism.ac.ru

Впервые методом селективного лазерного плавления была проведена наплавка изделий из синтезированного методом СВС порошка тройного интерметаллидного сплава Ti20Al3Si9 на титановую подложку. Показано, что в результате селективного лазерного плавления формируется неразъемное соединение «сплав Ti20Al3Si9 – Ti подложка». Исследовано влияние режимов обработки СВС-порошка на формирования микроструктуры, фазовый состав и механические свойства переходных зон на границе между реагирующими СВС-составами $Ti_{20}Al_3Si_9$ и Ti подложкой.

Ранее в работе [1] методом СВС был получен однофазный сплав на основе фазы $Ti_5Si_{2,25}Al_{0,75}$. Несмотря на то, что продукт получился однофазным, использовать его можно было только в виде порошка, так как синтезированный образец обладал высокой пористостью и низкой прочностью.

Методом СЛП из порошка осколочной формы сплава на основе состава (20Ti+3Al+9Si), полученного методом СВС из элементарных порошков Ti, Al и Si, исследовалось влияние скорости сканирования на линейную плотность лазерного излучения. Нанесены наплавки квадратного сечения размером 10х10 мм на титановую подложку с применением 5 режимов лазерной обработки при фиксированной мощности 300 Вт линейная плотность энергии возрастает с 0,901 до 1,5 кДж/м при снижении скорости от 0,333 до 0,2 м/с, что соответствует обратно пропорциональной зависимости. и последовательным нанесением 20 слоев порошка. Рентгенофазовый анализ наплавок показал, что основной фазой является $Ti_5Al_{0.75}Si_{2.25}$ (PDF-01-079-2701), что полностью повторяет состав использованного при 3D печати СВС-порошка (Рисунок 1).

На рисунке 1 показана микроструктура поперечного сечения «наплавка – Ti подложка» и концентрационные профили распределения Ti, Al и Si вдоль линии «наплавка – Ti подложка». Для всех пяти образцов наблюдалась характерная микроструктура с наличием переходной зоны с формированием ванны расплава в

титановой подложке вследствие нагрева поверхности выше температуры плавления Ti. Отчетливо видно, что во всех пяти образцах происходит диффузия Al и Si в титановую подложку на глубину до 500÷600 мкм.

Диффузией алюминия и кремния в подложку объясняется, и более высокая концентрация титана в нижних слоях наплавки по сравнению с содержанием Ti в исходном сплаве. Только в самых верхних слоях интерметаллидной наплавки содержание титана соответствует тройной фазе $Ti_5Si_{0.75}Al_{2.25}$. Отмечается также заметное трещинообразование на поверхности наплавок, кроме образца 4 с линейной плотностью лазерного излучения 1,351 кДж/м.

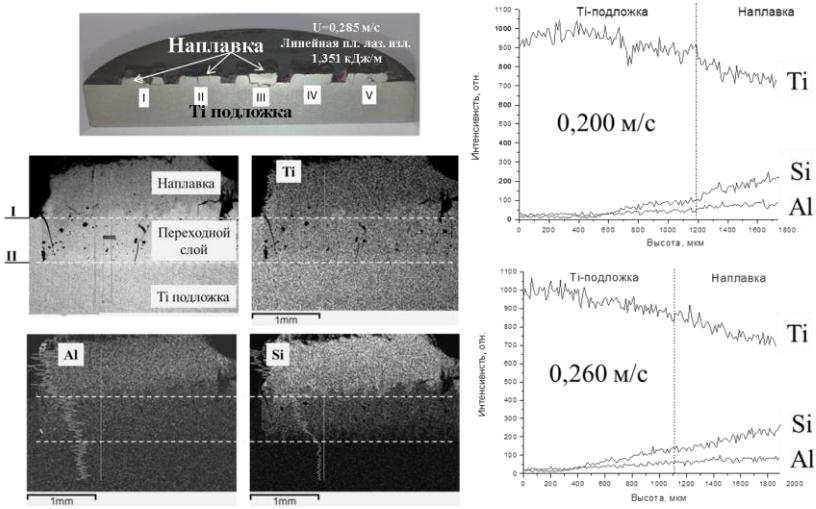


Рис.1. Вид в разрезе синтезированных образцов на поверхности титановой подложки при различной скорости лазерного сканирования: (I) 200 мм/с, (II) 222 мм/с, (III) 260 мм/с, (IV) 285 мм/с, (V) 333 мм/с и микроструктура поверхности образца I в разрезе и концентрационное распределение элементов в переходной зоне.

[1] П.А. Лазарев, М.Л. Бусурина, А.Н. Грядунов, А.Е. Сычев, О.Д. Боярченко, А.В. Карпов. Особенности структуры и фазообразования сплава на основе Ti–Al–Si, полученного методом СВС-компактирования // Неорг. Матер. 2022. Т. 58. № 9. С. 1039-1044. DOI: 10.31857/S0002337X22090093.

ПОЛУЧЕНИЕ ТРИФТОРИДА КОБАЛЬТА В САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕМСЯ ТЕПЛОВОМ ФРОНТЕ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ФТОРА СКВОЗЬ НЕПОДВИЖНЫЙ СЛОЙ ДИФТОРИДА КОБАЛЬТА

Пашкевич Д.С.[1,2], Камбур П.С.[1,2,4], Садикова Е.В.[1,2,@], Баженов Д.А.[2,3], Федорова Т.А.[1,2]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; [2] ООО «Аврора Кемикалс», г. Северск, Россия; [3]ООО «Центротех-Инжиниринг», г. Санкт-Петербург; [4]Акционерное общество «Российский научный центр «Прикладная химия (ГИПХ)», г. Санкт-Петербург;

[@] sadikova_ev@mail.ru

Трифторид кобальта CoF_3 используют как твёрдый фторирующий агент для водородзаместительного фторирования углеводородов, в частности этилена с получением гексафторэтана (C_2F_6) [1]. Получение CoF_3 осуществляют фторированием CoF_2 элементным фтором обычно в том же реакторе, в котором фторируют углеводороды:

$$CoF_{2,тв} + 0.5F_{2,газ} \rightarrow CoF_{3,тв} - 119кДж. \quad (1)$$

Тепловой эффект (1) достаточно высок, и адиабатическая температура трифторида кобальта в этом процессе может достигать 1260 К при начальной температуре 400 К.

Для исследования фторирования этилена трифторидом кобальта и процесса (1) была создана лабораторная установка. Реактор с неподвижным слоем порошка представлял собой стальной вертикальный цилиндр внутренним диаметром 30 мм, высотой 600 мм с толщиной стенки 13 мм, рис. 1. Реактор был оборудован тремя электронагревателями, подключёнными вместе с термопарами TRC1–TRC3 к системе автоматического регулирования температуры стенки реактора. Во внутренней полости реактора были смонтированы шесть термопар TR1–TR6 для измерения температуры в зоне реакции, расстояние между спаями которых составляло 80 мм. Термопары TR2, TR3, TR5 и TR6 были помещены в защитные никелевые чехлы, термопары TR1 и TR4 были бесчехловыми. Чехлы представляли собой никелевые трубки с запаянным концом диаметром 3 мм и толщиной стенки 0,1 мм. Все термопары были хромелькопелевыми, диаметр электродов составлял 200 мкм.

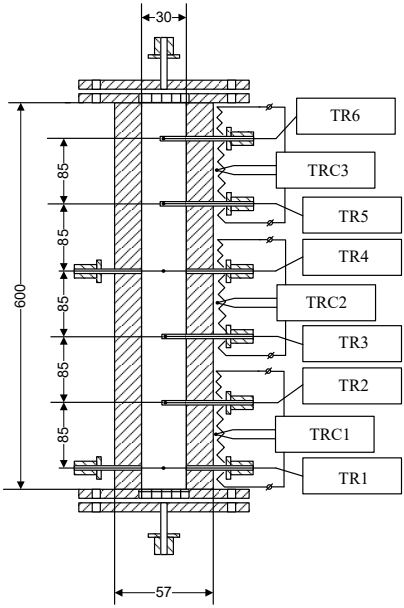


Рисунок 1 – Эскиз ректора фторирования РУ1

Фтор в смеси с азотом (концентрация F_2 50–95 об.%) подавали в реактор снизу, поддерживая расход постоянным в диапазоне 0,08–0,3 л/мин с помощью регулятора расхода Bronkhorst серии F-201EV газа или термокомпрессионным методом. Температуру стенки меняли в диапазоне 100–200°С. Давление на входе в реактор менялось в диапазоне 0,10-0,17 МПа.

На выходе газового потока из реактора контролировали наличие в нём фтора с помощью водного раствора йодистого калия.

Исходный $CoF_2 \cdot 4H_2O$ сушили при 200–250 °С. Распределение частиц по размерам безводного CoF_2 исследовали на анализаторе формы и размера частиц Bettersize BeVision M1, а также с помощью сканирующего микроскопа при увеличении объектива 20х с радиусом сканирования 0,5 см. Среднемедианный размер частиц дифторида кобальта составил 20 мкм.

Очередной опыт по фторированию дифторида кобальта (1) проводили после проведения процесса фторирования этилена [2].

Во всех опытах процесс (1) протекал в режиме самораспространения теплового фронта, движущегося в направлении движения газового потока. Разница максимальной температуры во фронте и начальной температуры ΔT составляла от 20 до 300 К (в среднем 100–150 К) и увеличивалась с ростом расхода фтора. Скорость распространения фронта менялась от 2 до 24 мм/мин, увеличиваясь с расходом газа. Ширина градиента температуры, где температура была на 30 К ниже максимальной, в тепловом фронте составляла 4–25 мм, время пребывания газа в этой области — порядка 20 с.

При концентрации фтора во фтор-азотной смеси 95 об.% и расходе этой смеси 0,3 л/мин максимальная температура во фронте достигала 390 °С при начальной температуре порошка 240 °С, т.е. ΔT составляло 150 К.

Было зафиксировано постепенное увеличение давления фторазотной смеси на входе в реактор (0,10-0,14 МПа при поддержании постоянного расхода. Это может быть связано с тем, что характерный размер частицы порошка по мере его превращения из CoF_2 в CoF_3 увеличивается, т. к. плотность CoF_2 выше плотности CoF_3 - 4460 и 3890 кг/см^3 соответственно, что может приводить к уплотнению слоя и увеличению его газодинамического сопротивления.

Фтор на выходе из реактора отсутствовал во всех опытах до тех пор, пока тепловой фронт не пересекал область расположения последней термопары. Поэтому можно сделать вывод, что процесс фторирования протекал в режиме спутного распространения тепловой волны в фильтрационном режиме, когда скорость распространения фронта зависит только от расхода фтор-азотной смеси и концентрации фтора в ней [3]. В этом случае скорость фронта можно рассчитать по формуле:

$$u = \frac{a_0 G_0}{\mu \rho_{k,0}}, \qquad (2)$$

где G_0 – массовый расход газа [кг/(м²·с)], a_0 – начальная концентрация активного компонента в газовом потоке [объёмные доли единицы], μ – расход активного компонента газового потока в расчёте на грамм активного компонента твёрдой фазы, $\rho_{k,0}$ – содержание активного компонента в пористой среде в единице объема [кг/м^3].

Расчётные значения скорости фронта по (2) составили 1,1–4,7 мм/мин, что в 2–3 раза ниже экспериментальных значений (2,7–16,8 мм/мин). Было сделано предположение, что в формировании теплового фронта участвует не весь дифторид кобальта, находящийся в зоне реакции, а лишь мелкие частицы и поверхностные слои крупных

частиц. Это может быть связано с диффузионным торможением фторирования CoF_2 слоем образующегося на поверхности его частиц CoF_3.

Если положить скорости распространения теплового фронта, полученные экспериментально и расчётным путём по (2) равными, то при расчёте по (2) получается, что в тепловом фронте фторируется примерно 36% дифторида кобальта.

В опытах по фторированию дифторида кобальта, который ранее использовали при фторировании этилена, при достижении тепловым фронтом термопары TR6 и появлении фтора на выходе из реактора расход фтора составлял примерно 70 % от теоретически возможного, рассчитанного по количеству загруженного в реактор CoF_2. Можно предположить, что в формировании теплового фронта участвует лишь половина фторируемого CoF_2, а другая половина (внутренние области крупных частиц) – фторируется выше фронта по потоку. Можно также предположить, что 30% кобальта либо остаётся в форме CoF_3 после фторирования этилена, либо постоянно пребывает в форме CoF_2 и, таким образом, во фторировании этилена не участвует в обоих случаях.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-91-18003.

[1] Садикова Е.В., Пашкевич Д.С., Капустин В.В., Холопова Т.С., Курапова Е.С., Чебышева А.М., Федорова Т.А., Платонова О.В., Камбур П.С. Способы синтеза, очистки и исследования состава гексафторэтана. Обзор // Теоретические основы химической технологии. 2025. Т. 59. №5. С. 103–146. DOI: https://doi.org/10.7868/S3034605325050098.

[2] Пашкевич Д.С., Камбур П.С., Садикова Е.В., Баженов Д.А., Курапова Е.С., Шелопин Г.Г., Федорова Т.А., Платонова О.В. Исследование самораспространяющегося теплового фронта при фильтрации этилена сквозь неподвижный слой трифторида кобальта // XVIII Всероссийский симпозиум по горению и взрыву. Суздаль, 20–25 сентября 2026 г.

[3] Алдушин А.П., Мержанов А.Г. Теория фильтрационного горения. Черноголовка: ОИХФ, 1987.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ДИФФУЗИОННОЕ АЛЮМИНИРОВАНИЕ КАК МЕТОД МОДИФИКАЦИИ СВС-ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРЕКУРСОРОВ КАТАЛИЗАТОРОВ

Ромазева К.А.[1,@], Пугачева Е.В.[1], Борщ В.Н. [1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова (ИСМАН)* [1]

[@] xenia_romazeva@ism.ac.ru

Важным условием для получения высокоактивного катализатора является наличие развитой поверхности, позволяющей реагирующим веществам легко взаимодействовать с активными центрами. Классические методы синтеза конструкционных ВЭС в данном случае не применимы, так как сплавы зачастую получаются монолитными, либо в виде гранул с низкой удельной поверхностью. Предлагаются различные подходы для увеличения удельной поверхности. Это может быть травление сплава без изменения его состава с целью получения пористой поверхностной структуры или перевод монолитных ВЭС в наноразмерную форму. Нами был применен несколько другой подход. В состав высокоэнтропийного сплава-прекурсора вводили алюминий, а затем удаляли его щелочным травлением. При этом получающийся катализатор сохраняет структуру высокоэнтропийного сплава, а на поверхности его частиц образуется наноструктура, состоящая из пластин нанометровой толщины.

В рамках данного исследования были разработаны и синтезированы катализаторы на основе высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [1]. Исходным сырьем для получения ВЭС служат оксиды металлов, которые восстанавливаются до металлов алюминием в процессе горения. При этом алюминий берут в избытке. Удаление избытка алюминия щелочным травлением позволяет получить каталитически активный материал с развитой поверхностью. Однако, удельная поверхность полученных образцов оказалась недостаточной для эффективного функционирования катализаторов. Для увеличения удельной поверхности был использован метод высокотемпературного диффузионного алюминирования. Впервые такой метод был применен для повышения удельной поверхности каталитически активных сеток [2].

На начальном этапе алюминиевый порошок ПАД-1 был тщательно смешан с фракцией 0.1-0.3 мм раздробленного ВЭС в

массовом соотношении 1:1, 2:1, 3:1, 4:1 и полученная смесь подвергалась отжигу в тигле в атмосфере аргона при температуре 640°C в течение трех часов. После отжига спек сравнительно легко размалывался с выделением фракции 0.1-0.3 мм, подвергался выщелачиванию 20%-ным раствором NaOH для удаления избытка Al с целью формирования разветвленной поверхности, затем промывался и стабилизировался 10%-ным раствором H_2O_2. Были получены катализаторы состава FeCoNiCu. Физико-химические характеристики прекурсоров и катализаторов были исследованы методами РФА, СЭМ/ЭДА и БЭТ. Катализаторы содержали остаточный алюминий и сохраняли ОЦК решетку ВЭС. В результате удельная поверхность образцов увеличилась в 5-10 раз.

В ходе каталитических испытаний полученные образцы показали высокую активность в реакциях глубокого окисления CO и пропана, и гидрирования CO_2 при атмосферном давлении. Отмечено, что окисление пропана начинается только после полного окисления CO, что указывает на последовательность реакций. На лучшем катализаторе FeCoNiCu с соотношением 1:1 конверсия CO достигается 100% при 200°C, а конверсия пропана достигает 100% при 400°C. Для процесса гидрирования CO_2 наилучшим катализатором оказался FeCoNiCu с соотношением 3:1 оказался наиболее перспективным, обеспечив 51,5% конверсию CO_2 с высокой селективностью по метану (71%).

[1] *Pugacheva E., et al.* Metals, 2025, Vol 15(12), pp 1381.

[2]. *В. Н. Борщ, С. Я. Жук, Н. В. Сачкова*. Кин. Кат., 2018, Vol. 59, № 3, pp 394–400.

ИССЛЕДОВАНИЕ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ТЕПЛОВОГО ФРОНТА ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ЭТИЛЕНА СКВОЗЬ НЕПОДВИЖНЫЙ СЛОЙ ТРИФТОРИДА КОБАЛЬТА

Пашкевич Д.С.[1,2], Камбур П.С.[1,2,3], Садикова Е.В.[1,2,@], Баженов Д.А.[2,4], Курапова Е.С.[2,3], Шелопин Г.Г.[2], Федорова Т.А.[1,2], Платонова О.В.[3]

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; [2]ООО «Аврора Кемикалс», г. Северск, Россия; [3]Акционерное общество «Российский научный центр «Прикладная химия (ГИПХ)», г. Санкт-Петербург; [4]ООО «Центротех-Инжиниринг», г. Санкт-Петербург

[@] sadikova_ev@mail.ru

Гексафторэтан (C_2F_6) применяют в качестве газообразного носителя фтора для травления кремния и его соединений при формировании поверхностной структуры полупроводниковых пластин в микроэлектронной промышленности. Одним из методов синтеза C_2F_6 является фторирование этилена трифторидом кобальта:

$$H_2C{=}CH_{2,газ}+10CoF_{3,тв} \rightarrow F_3C\text{-}CF_{3,газ}+4HF_{газ}+10CoF_{2,тв}–1{,}19\ МДж, \quad (1)$$

$$CoF_{2,тв} + 0.5F_{2,газ} \rightarrow CoF_{3,тв} - 119\ кДж. \quad (2)$$

В (1) адиабатический разогрев продуктов реакции составляет 1035 К, а в (2) - 860 К.

Побочными продуктами (1) могут быть фторэтаны и фторметаны:

$$H_2C{=}CH_{2,газ} + y_1CoF_{3,тв} \rightarrow x_1H_2C{=}CH_{2,газ} + x_2CF_{4,газ} + x_3CFH_{3,газ} + x_4CF_2H_{2,газ} + x_5CF_3H_{газ} + x_6C_2F_{6,газ} + x_7C_2FH_{5,газ} + x_8C_2F_2H_{4,газ} + x_9C_2F_3H_{3,газ} + x_{10}C_2F_4H_{2,газ} + x_{11}C_2F_5H_{газ} + x_{12}HF_{газ} + y_1CoF_{2,тв} \quad (3)$$

Для определения условий, при которых значение x_6 максимально, была создана лабораторная установка с неподвижным слоем порошка в стальном цилиндрическом вертикальным реакторе внутренним диаметром 30 мм, оборудованном термопарами и электронагревателями [1]. Этилен и его смеси с азотом подавали в реактор снизу. На выходе из реактора после нейтрализации потока отбирали пробы газа для хроматографического анализа. Расход этилена меняли в диапазоне 0,1-1,7 $см^3/с$ (при давлении 0,1 МПа), его концентрацию в смеси с азотом от 50 до 100 об. %, температуру стенки реактора – в диапазоне 250 - 375 °С. Давление в реакторе было порядка 0,1 МПа Среднемедианный размер частиц дифторида кобальта составлял 20 мкм [1].

Было показано, что в этих условиях в реакторе распространялся тепловой фронт в направлении, спутном с направлением движения

газа. Максимальная температура во фронте увеличивалась с увеличением расхода этилена и температуры стенки реактора в диапазоне 266-750 °С, разность максимальной и начальной температуры на оси реактора меняясь от 2 до 360 К. Скорость фронта увеличивалась с увеличением расхода этилена в диапазоне 3-10 мм/мин. Средние значения ширины теплового фронта δ , где температура была на 30 К ниже максимальной, составляли 8-30 мм, а время пребывания в этой области $\Delta\tau = \delta/U_{\text{ср}}$ ($U_{ср}$ – средняя скорость движения газа в реакторе) – порядка 0,3-1,7 с.

Основными продуктами фторирования C_2H_4 являлись C_2F_6, C_2F_5H, CF_4. При увеличении максимальной температуры в диапазоне 250-450 °С в тепловом фронте концентрация C_2F_5H в потоке продуктов снижалась, а концентрация C_2F_6 увеличивалась. При дальнейшем повышении температуры увеличивалась концентрация CF_4, а концентрация C_2F_6 снижалась. Так, при $T_{макс}$=400 °С концентрация C_2F_6 в продуктах составляла 90%, C_2F_5H — 8–12 %, CF_4 — не более 2 %. При максимальной температуре 600-750 °С концентрация CF_4 в потоке продуктов менялась от 20 до 80 об. %.

На основе теории фильтрационного горения [2] были проведены расчёты скорости распространения фронта в фильтрационном режиме, когда активная компонента газового потока полностью реагирует в тепловом фронте. Для относительно высоких значений ΔT (порядка 350 К) различие экспериментальных и расчётных значений скорости распространения фронта составило ±18%. Для режимов с низким значением ΔT (порядка 30 К) теорию [2] применять нельзя, т.к. для них не выполняется условие:

$$\gamma = \frac{RT_0^2}{E(T_{max}-T_0)} << 1 \qquad (4)$$

Е – энергия активации, Дж/моль, T_0 – начальная температура, К, T_{max} – максимальная температура продуктов реакции, К, R – универсальная газовая постоянная

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-91-18003.

[1] Пашкевич Д.С., Камбур П.С., Садикова Е.В., Баженов Д.А., Фёдорова Т.А. Получение трифторида кобальта в самораспространяющемся тепловом фронте при фильтрации фтора сквозь неподвижный слой дифторида кобальта // XVIII Всероссийский симпозиум по горению и взрыву. Суздаль, 20–25 сентября 2026 г.
[2] Алдушин А.П., Мержанов А.Г. Теория фильтрационного горения. Черноголовка: ОИХФ, 1987.

ПОЛУЧЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОГО ПОРОШКА УЛЬТРАТУГОПЛАВКОГО КАРБИДА Ta_4HfC_5 МЕТОДОМ СВС И ПЛАЗМЕННОЙ СФЕРОИДИЗАЦИИ

Семенчук И.Е.[1]

[1]Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН, Черноголовка, Россия

semenchuk-ilya@mail.ru

Ультратугоплавкие карбиды системы Ta–Hf–C относятся к перспективным материалам для работы в экстремальных температурных условиях. Карбид состава Ta_4HfC_5 сочетает высокую температуру плавления, химическую инертность и термическую стабильность, что делает его интересным для теплозащитных покрытий, газотермического напыления и аддитивных технологий [1]. Для таких технологий важны не только фазовый состав и чистота материала, но и морфология частиц: предпочтительны сферические порошки с узким гранулометрическим распределением.

Цель работы состояла в оценке возможности получения сферического порошка Ta_4HfC_5 двухстадийным способом, включающим синтез карбидного прекурсора методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и последующую плазменную сфероидизацию. Смесь тантала и гафния предварительно механически активировали в среде гексана в планетарной мельнице АГО-2, после чего добавляли сажу до стехиометрического состава. Синтез проводили в реакторе постоянного давления в атмосфере аргона при 3 МПа с использованием химической печки Ti+C. Полученную СВС-керамику дробили до фракции 10–120 мкм и обрабатывали в потоке аргоновой термической плазмы.

Рентгенофазовый анализ исходной СВС-керамики показал формирование однофазного твердого раствора на основе карбидов тантала и гафния с кубической решеткой и параметром а = 4,487 Å. Примесные фазы, включая свободный углерод и оксиды металлов, не были обнаружены, что подтверждает полноту реакции горения и эффективность выбранной схемы подготовки шихты. После плазменной обработки продукты разделяли по месту отбора: со стенок реактора, со дна реактора, после удаления наноразмерной фракции, а также отдельно выделяли нанофракцию.

Установлено, что эффективность сфероидизации резко зависит от размера частиц. Крупные частицы, собранные со дна реактора, сохраняли преимущественно угловатую осколочную форму и размеры

до 60–120 мкм, что связано с неполным проплавлением за время пребывания в высокотемпературной зоне. Напротив, частицы фракции 10–50 мкм, осажденные на стенках реактора, имели преимущественно сферическую форму; доля сферических частиц в этой фракции составила 45–60 %. Формирование сферической морфологии обусловлено полным расплавлением частиц в плазменном потоке и последующим действием сил поверхностного натяжения при быстром охлаждении.

Плазменная сфероидизация не привела к разрушению карбидной основы, однако вызвала перераспределение компонентов между микро- и наноразмерными фракциями. Основные карбидные фазы соответствовали твердым растворам $Ta_{1-x}Hf_xC$ с пониженным относительно исходной шихты содержанием гафния (x = 0,02–0,12). Нанофракция оказалась обогащена фазами TaC и Ta_2C: их суммарное содержание превышало 88 мас. %. Это указывает на селективное испарение и последующую конденсацию компонентов в неравновесных условиях плазменного потока. После удаления нанофракции продукт характеризовался более однородным фазовым составом.

Таким образом, показана принципиальная возможность получения сферических частиц ультратугоплавкого карбида Ta_4HfC_5 на основе СВС-прекурсора. Наиболее перспективной для плазменной сфероидизации является узкая фракция 20–50 мкм, поскольку она успевает полностью проплавиться и приобрести сферическую форму. Комбинация СВС и плазменной сфероидизации может рассматриваться как энергоэффективный маршрут получения порошков сверхтугоплавких карбидов для аддитивных и газотермических технологий.

[1] Shcherbakov V.A., Gryadunov A.N., Semenchuk I.E., Alymov M.I., 2022, Int. J. Self-Propag. High-Temperature Synth. **31.** 1–5.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ Fe-Mn И Cu-Mn, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АЛЮМИНОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Сивакова А.О.[1,@], Горшков В.А.[1], Сычев А.Е.[1], Карпов А.В.[1]
[1]*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН*
[@] sivakovaalina@yandex.ru

Сплавы меди, железа и марганца являются хорошо изученными соединениями, интерес к которым проявляется в различных отраслях промышленности. Ферромарганец (FeMn), один из сплавов на основе железа, традиционно производится методом литья, с помощью аддитивных технологий, искровым плазменным спеканием и т.д. Сплавы меди и марганца (Cu-Mn) находят обширное применение в сфере электроники и могут быть получены различными методами.

В данной работе впервые методом высокотемпературного алюмотермического синтеза [1] с использованием смеси порошков оксида марганца (MnO_2), оксида меди (Cu_2O), оксида железа (FeO) и алюминия (Al) синтезированы интерметаллидные сплавы на основе систем Cu-Mn и Fe-Mn. Исследованы фазовый состав, микроструктура и термоэлектрические свойства сплавов.

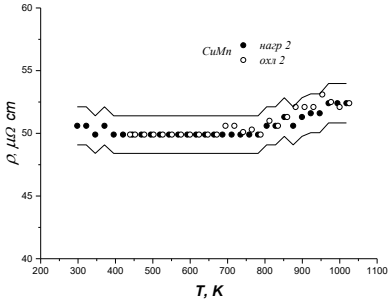


Рис. 1 – Зависимость удельного электросопротивления от температуры сплава на основе ситемы Cu-Mn

Синтезированный сплав на основе системы Cu-Mn состоит из твердого раствора Cu[Mn], микроструктура которого представлена колониями столбчатых кристаллов продолговатой формы. Измерение удельного электросопротивления показало, что образец сохраняет

постоянное значение ρ = 50 мкОм/см в температурном диапазоне от 300 до 800 К (см. Рис. 1а).

Синтезированный сплав на основе системы Fe-Mn состоит из твердого раствора Fe[Mn], микроструктура которого однородна. Измерение удельного электросопротивления в температурном диапазоне от 300 до 1200 К показало, что при комнатной температуре значение электросопротивления равно 101,6 мкОм·см и достигает своего максимума при температуре 1200 К значения ρ = 173,2 мкОм·см. При циклах «нагрев-охлаждение» измерения хорошо воспроизводятся.

[1] Горшков В.А., Милосердов П.А., Ковалев Д.Ю., Боярченко О.Д., 2023, Изв. ВУЗов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 17(1). 39-48. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-1-39-48

Зажигание второго реакционного слоя при термически сопряженной СВС-наплавке

Смирнов А.В.[@], Малахов А.Ю., Кришеник П.М., Рогачев С.А.
Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской Академии Наук
[@] smirnovalexander1999@yandex.ru

Технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) отличается высокой скоростью процесса, энергоэффективностью и технологической простотой. СВС-наплавка позволяет получать многослойные и функционально-градиентные материалы [1] заданного состава и геометрии за один технологический шаг, что выгодно отличает её от центробежного литья, спекания (в том числе искрового плазменного), аддитивных технологий и др.

Однако технология имеет принципиальное ограничение: она не позволяет напрямую синтезировать слои на основе слабоэкзотермических шихт. Недостаточная теплота реакции приводит к неполному превращению реагентов и отсутствию соединения между слоями, поскольку часть тепла поглощается инертной подложкой. Для преодоления этого применяют термическое сопряжение: в систему вводят высокоэкзотермический донорный слой ("химическая печь") (Рис. 1 – I), который обеспечивает тепловой импульс для синтеза целевого (акцепторного) слоя (Рис. 1 – III).

Многослойность системы (не менее трёх слоёв) существенно усложняет выбор оптимальных параметров и анализ протекающих процессов, поэтому математическое моделирование становится необходимым инструментом исследования. В настоящей работе численно изучается поведение акцепторного слоя при его нагреве через инертную подложку от донорного слоя в системе Ti-C – углеродистая сталь – Ni-Al.

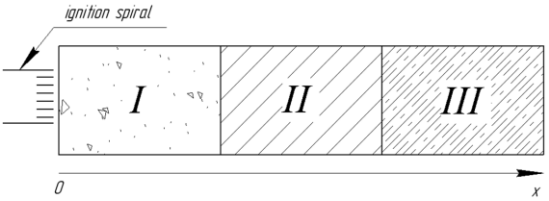


Рис.1 Схема трехслойной системы. I – Ti-C; II – Углеродистая сталь; III – Ni-Al

Как можно отметить из рис. 2, второй реакционный слой (III) зажигается в индукционном режиме. Режим индукционного зажигания слоя Ni-Al имеет свои особенности. При воспламенении слоя температура в зоне реакции растет до сверхадиабатических значений. Рост температуры прекращается после полного превращения вещества в области максимального значения температуры.

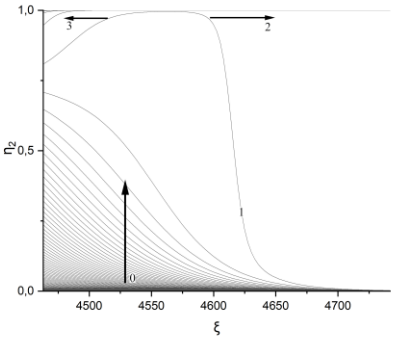


Рис.2 Пространственно-временное распределение глубины превращения в слое III при ширине слоя II – 1 мм, слоя III – 3 мм. Стрелка 1 - направление изменения глубины превращения η_2, стрелка 2 – направление распространения волны горения в глубь слоя III, стрелка 3 - направление распространения волны догорания.

Численное моделирование процесса позволило исследовать закономерности зажигания второго реакционного слоя при нагреве его теплотой реакции донорного слоя через инертную подложку. Было установлено, что зажигание происходит в индукционном режиме, при котором происходит распространение волн горения и догорания.

[1] Денисов И., Шахрай Д., Малахов А., Серопян С. Combustion synthesis of metal–intermetallic–ceramic laminate AlMg6–NiAl–TiC composite // Crystals. 2022. V. 12. № 12. Art. 1851.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ 2Ti-Al-C С ДОБАВКОЙ БОРА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СВОБОДНОГО СВС-СЖАТИЯ

Столин П.А.[1@], Бажин П.М.[1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН), Черноголовка, Россия*

[@] jam47@mail.ru

Среди MAX-фаз и материалов на их основе особый интерес вызывают соединения системы Ti–Al–C (Ti_2AlC и Ti_3AlC_2), которые демонстрируют высокие механические и трибологические характеристики, а также устойчивость к циклическим температурным воздействиям, что обусловливает их перспективность для практического применения [1]. MAX-фазы уже продолжительное время привлекают внимание исследователей и инженеров благодаря исключительному сочетанию металлических и керамических свойств. Однако ужесточение эксплуатационных требований к современным конструкционным материалам делает актуальной задачу разработки новых металлокерамических композиций на основе Ti_2AlC с улучшенными физико-механическими свойствами. Введение дополнительной добавки B в порошковую шихту 2Ti–Al–C в условиях свободного СВС-сжатия [2] открывает возможность формирования in situ дисперсных упрочняющих фаз, способствующих повышению эксплуатационных характеристик конечных материалов.

В процессе свободного СВС-сжатия, после отработки и оптимизации его технологических и конструктивных параметров, в ходе настоящей работы были получены плиты размером 90×120×10 мм с однородной микроструктурой из составов [2Ti–1Al–1C] + (10–30) масс.% (Ti+2B). Синтезированные материалы состоят из основной MAX-фазы Ti_2AlC, дисперсионно-упрочнённые частицами TiB_2. Установлено, что при увеличении массовой доли TiB_2 в материале с 10 до 30 масс. % микротвердость возрастает в 1,5 раза (с 8,6 до 12,6 ГПа), а модуль упругости – на 17 % (с 271 до 325 ГПа). Сравнительные испытания на жаростойкость в окислительной атмосфере при температуре 950 °C показали, что полученные материалы превосходят по удельной коррозионной стойкости высоколегированную аустенитную сталь 20Х23Н18 и характеризуются высокими защитными

свойствами. Наилучшие результаты зафиксированы для состава с 20 масс.% (Ti+2B): скорость коррозии на 18 % ниже, чем у полированной жаропрочной стали. Благодаря высокой структурной стабильности и сохранению геометрических параметров при высоких температурах, разработанные материалы могут рассматриваться как эффективная замена традиционным жаропрочным сталям в условиях окислительных сред.

[1] M. W. Barsoum, T. El-Raghy & M. Ali., 2000, Metall. Mater. Trans. A., 31. 1857–1865.

[2] A.M. Stolin, P.M. Bazhin, A.S. Konstantinov, M.I. Alymov, 2018, Doklady Chem., 2(480), 136–138.

ПРИМЕНЕНИЕ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Царев М.В.[@], Мокрушин В.В., Коршунов К.В., Постников А.Ю., Царева И.А., Забродина О.Ю., Иванов Д.Г., Забавин Е.В., Канунов А.Е.
Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)
[@] tsarev@dep19.vniief.ru

В докладе представлены результаты исследования физико-химических процессов, протекающих при смешивании исходных компонентов высокоэнергетических порошковых композиций, с использованием метода импедансной спектроскопии, адаптированного для изучения порошковых материалов [1, 2].

Анализ зависимости комплексного электрического сопротивления двухкомпонентной смеси «горючее-окислитель» от времени перемешивания в смесителе позволил определить время достижения максимальной однородности распределения компонентов по объёму смеси, а также начала внедрения твёрдых частиц окислителя вглубь поверхности крупных и пластичных частиц горючего. Обработка экспериментальных данных с использованием специально разработанной модели комплексной проводимости двухкомпонентных порошковых смесей позволила определить время начала накопления высокопроводящих продуктов механохимических реакций, протекающих при перемешивании под воздействием шаров.

Полученные результаты иллюстрируют возможность использования импедансной спектроскопии для изучения процессов, протекающих при изготовлении высокоэнергетических порошковых композиций в смесителях различного типа, а также оптимизации технологических режимов смешивания исходных компонентов.

[1] Mokrushin V.V., 2014, Int. Journal of SHS. **23 (1)**. 26-35
[2] Tsarev M.V., 2020, Int. Journal of SHS. **29 (1)**. 22-25

ВАЛИДАЦИЯ БАРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРИ ДЕТОНАЦИИ В ВОДОРОД-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ

Беляев П.Е.[1], Макеева И.Р. [1,2], Пигасов Е.Е. [1,2], Ганеева Д.Ф.[1], Куприянец Т.А. [1]

[1] ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск,

[2] ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ) г. Челябинск

e-mail: belyaevpe@vniitf.ru

Проблема водородной безопасности всегда остро стояла, как в нефтехимической промышленности, так и в атомной отрасли. Эта проблема приобретает дополнительный вес в силу развития инфраструктуры водородной энергетики (ВЭ) и всё более широкого внедрения технологий ВЭ, в том числе пассажирского и грузового транспорта, в общественную жизнь. Важной задачей при оценке безопасности технологических процессов, связанных с обращением с горючими газами, в том числе с водородом, является оценка барических нагрузок, возникающих при детонации смесей горючих газов с воздухом, образующихся при аварийной разгерметизации трубопроводов и сосудов высокого давления.

Проведение натурных экспериментов, зачастую, сопряжено с высокой опасностью и значительными материальными затратами. Численное моделирование может снять указанные ограничения натурного эксперимента. Однако моделирование течений горючих газов с ударными и детонационными волнами является нетривиальной задачей. Поэтому возможность использования программного продукта для оценки нагрузок должна быть тщательно проверена. В данной работе представлены результаты валидации программного комплекса КЕДР в области моделирования барических нагрузок от падения ударных и детонационных волн, возникающих при сгорании водород-воздушных смесей.

Валидация барических нагрузок от ударных волн, возникших при детонации, проведена на обширном наборе экспериментов [1, 2, 3], посвященным распространению ударных волн в условиях городской застройки. Валидация модели химических реакций в водород-воздушных смесях, основанной на кинетическом механизме [4], проведена в диапазоне температур от 880 К до 2200 К и диапазоне давлений от 0.1 до 8.7 МПа проведена на экспериментах [5, 6, 7]. Результаты интегральной валидации на примере воспламенения водород-воздушной смеси в полусферическом объёме с ускорением пламени и переходом в детонацию [8], и на примере моделирования детонационных ячеек в водород-воздушных смесях [9] частично опубликованы и дополнены в данной работе.

Список источников

1. Rose T.A. An Approach to the Evaluation of Blast Loads on Finite and Semi-Infinite Structures. Engineering Systems Departmen. // Cranfield University, United Kingdom. – 2001
2. Ian G. Cullis, et al., Simulating geometrically complex blast scenarios // Defence Technology – 2016
3. Rose T.A., Smith P.D. FAWG/EDITS Trials – Blast investigations, Reference A1 – Gauge Block //Royal Military College of Science, Engineering Systems Department. – Report № SEAS/CMSE/TAR/03/95. – 1995
4. Kéromnès Alan et al. An experimental and detailed chemical kinetic modeling study of hydrogen and syngas mixture oxidation at elevated pressures // Combustion and Flame. – V. 160. – 2013. – pp. 995-1011
5. Herzler J., Naumann C. Shock-tube study of the ignition of methane/ethane/hydrogen mixtures with hydrogen contents from 0% to 100% at different pressures // Proceedings of the Combustion Institute. – 2009. – № 32. – P. 213–220
6. Skinner G.B., Ringrose G.H. Ignition delays of a hydrogen-oxygen-argon mixture at relatively low temperature // Journal of Chemical Physics. – 1965. – № 42. – P. 2190-2192
7. Schultz E., Shepherd J. Validation of Detailed Reaction Mechanisms for Detonation Simulation. – Explosion Dynamics Laboratory Report FM99-5. – February 8, 2000
8. Ганеева Д. Ф., Мастюк Д. А., Безгодов Е. В., Тараканов А. А. Численное моделирование экспериментов по горению водородно-воздушных смесей в полусферической области // Журнал прикладной химии / Russian Journal of Applied Chemistry. 2026. № 2. С. 311-321. https://doi.org/10.7868/S3034554526020102
9. Беляев П. Е. Двумерное CFD моделирование детонационных неустойчивостей в водород-воздушных смесях с использованием детального кинетического механизма // Журнал прикладной химии / Russian Journal of Applied Chemistry. 2026. № 2. С. 342-354. https://doi.org/10.7868/S3034554526020135

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЁРДОГО ПОРИСТОГО ГОРЮЧЕГО В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРАХ С ПЕРЕМЕННЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ

Боровик К.Г.,[1,@], Луценко Н.А.[1]
[1]*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН*
[@] ksushareno@mail.ru

Газогенераторы служат для преобразования твёрдого или жидкого вещества в поток газа с заданными свойствами и имеют широкую область применения [1-3]. В настоящей работе рассматриваются двухкамерные низкотемпературные газогенераторы (НТГГ) – устройства, которые генерируют поток газа с относительно низкой температурой и состоят из двух отдельных камер. В первой камере НТГГ содержится твёрдое топливо, при горении которого возникает горячая газовая смесь, необходимая для газификации твёрдого пористого горючего, содержащегося во второй камере. Горячий газ из первой камеры НТГГ поступает во вторую, фильтруется через твёрдое горючее и нагревает его, в результате чего начинается процесс газификации этого горючего. При этом на разложение твердого вещества расходуется энергия, поэтому на выходе из газогенератора получается относительно холодная газовая смесь, содержащая газообразные продукты газификации твердого горючего. Камера НТГГ, где содержится пористое горючее и происходит процесс газификации, называется газификатором; она представляет собой цилиндр с непроницаемыми боковыми стенками, а также входом и выходом, расположенными друг напротив друга.

Математическая модель рассматриваемого процесса основывается на предположении двух взаимодействующих взаимопроникающих континуумов [4] и содержит в качестве основных уравнений законы сохранения энергии для газа и твёрдой среды, уравнения движения, неразрывности и состояния газа. Более подробное описание модели дано в [5]. Предполагается, что поступающий в газификатор газ инертен и имеет заданную температуру и скорость. Для расчёта описанного процесса был разработан решатель для пакета OpenFOAM, основанный на методе конечных объёмов и базирующийся на алгоритме SIMPLE [6].

С помощью разработанного решателя были исследованы процессы газификации в цилиндрических газификаторах с переменным поперечным сечением: с плавным сужением в средней части и последующем плавным расширением, а также со ступенчатым

расширением. При рассмотрении газификаторов с плавным сужением/расширением было обнаружено, что изменение геометрии не приводит к улучшению равномерности потока продуктов газификации на выходе из газогенератора [7]. Было установлено, что существует три режима газификации горючего: 1) полная газификация горючего с плавным течением, близкая к процессу в газификаторах с постоянным поперечным сечением; 2) полная, но замедленная газификация с образованием застойных зон и вихрей, замедляющих процесс прогрева; 3) неполная газификация с застойными зонами и вихревыми течениями. Исследования показали, что если средняя часть газификатора имеет небольшое сужение (до 30% от радиуса входа), то ключевые параметры процесса (температура газа на выходе и отношение массовых расходов продуктов газификации и инерта на выходе) остаются неизменными. Более сильное сужение газификатора приводит к образованию застойных зон и вихревых течений, которые негативно влияют на время работы НТГГ и степень газификации пористого горючего. Однако скругление углов сужения/расширения позволяет достигать полной газификации в конфигурациях, при которых образующиеся вихревые течения препятствовали полному прогреву твердого горючего. В газификаторах со ступенчатым расширением также были обнаружены три режима газификации, но в области расширения всегда присутствует зона с вихревыми течениями, если нет скругления угла расширения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 26-19-00231), https://rscf.ru/project/26-19-00231/.

[1] Karpov A.I., Leschev A.Y., Lipanov A.M., Leschev G.A., 2013, J. Loss. Prev. Process. Ind. 2013. **26**(2). 338-343

[2] Seo Y.-D., Chung S.H., Yoh J.J., 2011, Fuel. **90**(4). 1395-1401

[3] Salgansky E.A., Lutsenko N.A., 2021, Aerosp. Sci. Technol. **109**. 106420

[4] Нигматулин Р.И., 1978, Основы механики гетерогенных сред. 336 с.

[5] Lutsenko N.A., Borovik K.G., 2024, Int. J. Heat. Mass Transf. **231** (125876). 1-10

[6] Patankar S., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. 197 p.

[7] Lutsenko N.A., Borovik K.G., 2026, Int. Commun. Heat. Mass Transf. **172** (110463). 1-13

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ АММИАКА И ВОДОРОДА

Ванькова О.С. [1,@], Федорова Н.Н.[1], Большова Т.А.[2]
[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия*
[2]*Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, Новосибирск, Россия*
[@] vankova@itam.nsc.ru

Аммиак является безуглеродным энергоносителем, перспективным с точки зрения использования в топливных элементах, горелках, газовых турбинах и двигателях внутреннего сгорания. Однако он имеет высокую температуру горения и узкие концентрационные пределы воспламенения, а также низкую скорость ламинарного пламени. Более низкая по сравнению с углеводородами реакционная способность усложняет его использование в низкотемпературных условиях ($T \approx 1200–1400$ K). В [1, 2] представлены результаты экспериментов горения смеси аммиака с воздухом в кварцевом микроканале диаметром 2 мм при коэффициенте избытка топлива в диапазоне 0.8 – 1.2, атмосферном давлении с заданным температурным профилем, результаты которых использованы для валидации нескольких кинетических схем. В высокотемпературной области ($T \gtrsim 2000$ K) все кинетические схемы дают сопоставимые времена индукции, однако ни одна из базовых схем не обеспечивает одновременного согласия по положению слабого пламени, полному выгоранию и профилям NO/N_2O. Поэтому необходимы дальнейшие исследования, которые позволят провести критическую оценку и отбор механизмов горения аммиачно-воздушной смеси в различных температурных условиях.

В работе проведены численные исследования воспламенения и горения смесей аммиак/ воздух с использованием экспериментальных данных [1-2] для валидации кинетических механизмов. Рассмотрены различные кинетические схемы для аммиачно-воздушных смесей с уточненными термодинамическими данными и расширенной N_2H_x подсхемой (N_2H_2, N_2H_3, N_2H_4), поскольку N_2Hx-соединения образовываются при низких температурах. Критерий выбора оптимальной схемы базируется на совокупной ошибке по положению слабого пламени, профилям основных и промежуточных компонентов и согласии с экспериментальными данными по задержкам воспламенения и скоростям ламинарного пламени. Для построения

сокращенной модели использовался механизм [3], созданный для моделирования окисления смесей NH3/H2 в струйном реакторе (JSP) при атмосферном давлении в диапазоне температур 800 – 1280 K. Полная кинетическая модель содержит 257 реакций для 32 компонент пламени. В работе предложен редуцированный механизм, который позволил согласовать численные результаты с экспериментальными профилями NH_3, O_2, H_2O и конечными концентрациями NO/N_2O.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-79-00241, https://rscf.ru/project/25-79-00241/

[1] H. Nakamura, S. Hasegawa, Combustion and ignition characteristics of ammonia/air mixtures in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, Proceedings of the Combustion Institute, 36 (2017) 4217-4226.

[2] H. Nakamura, S. Hasegawa, T. Tezuka, Kinetic modeling of ammonia/air weak flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, Combustion and Flame, 185 (2017) 16–27.

[3] X. Zhang, S. P. Moosakutty, R. P. Rajan, M. Younes, and S. M. Sarathy, Combustion chemistry of ammonia/hydrogen mixtures: Jet-stirred reactor measurements and comprehensive kinetic modeling, Combust. Flame, 234 (2021) 111653

Механизм экзотермической реакции пористого кремния в контакте с окислителем.

Гришунов В.В.[1, @], Самосват Д.М.[1], Улин В.П.[1], Зегря Г. Г.[1]
[1]ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН
[@] vlad.grishunowf@gmail.com

Пористый кремний – материал, получаемый при электрохимическом травлении монокристаллического кремния. Основная особенность его в том, что такой материал обладает крайне большой удельной площадью поверхности, которая может достигать величины более 900 $м^2/см^3$. Этим зачастую объясняют аномально высокое энерговыделение в процессе экзотермической реакции в энергонасыщенных композитах (ЭНК) на его основе. Тем не менее, в настоящее время в литературе отсутствуют работы, подробно объясняющие механизм экзотермической реакции пористого кремния с окислителем. В докладе будет предложен механизм экзотермической реакции пористого кремния с кислородом:

$$Si+O_2=SiO_2$$

В данной реакции, как показано в [1], кремний выступает в качестве горючего с энергетическим выходом ~28 кДж/г. Характер данной реакции следует считать цепным и в докладе подробно изложена кинетика всех протекающих процессов в рамках теории описанной Н.Н. Семёновым [2], а также подробно рассмотрен механизм инициирования реакции. Инициирование цепной реакции происходит за счёт возбуждении лазерным излучением молекул кислорода, с образованием радикалов кислорода. В молекулярном кислороде под действием света разрывается одна из двух связей, в результате данный радикал закрепляется на поверхности кремния на оборванные поверхностные связи. При этом, по мере окисления поверхностных слоёв образуется область, в которой накапливаются горячие носители и тепло, выделяемое в ходе данных процессов. В дальнейшем, в зависимости от количества накопленной энергии реакция может иметь детонационный характер.

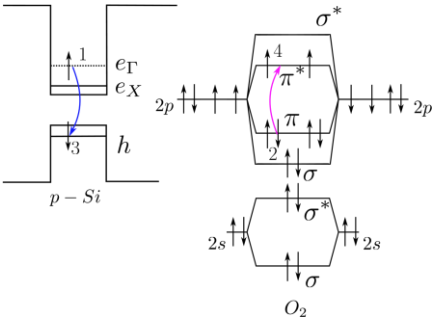


Рис.1. Механизм резонансной передачи энергии от кремния к молекуле кислорода с образованием радикала кислорода. На рисунке слева показана зонная диаграмма p-Si как квантовая яма.

Особое внимание уделяется процессам переноса энергии между пористым кремнием и кислородом, играющим ключевую роль для протекания данной реакции. В пористом кремнии, вследствие понижения симметрии кристаллической решетки, появляется дополнительный минимум в Г-точке с энергией порядка 3 эВ [3]. Известно, что энергетические уровни в молекуле кислорода описываются в рамках метода молекулярных орбиталей: характерная энергия перехода между связывающими и несвязывающими состояниями порядка 3 эВ. Следовательно, возможен резонансный переход, при котором связь в молекуле кислорода рвется, образуются радикалы кислорода, которые вступают в химическую реакцию с кремнием.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-12-00426.

Литература

[1] Kovalev D., V. Yu. Timoshenko, N. Kunzner, E. Gross and F. Koch., Phys. Rev. Lett. 87(6): 068301-1. (2001)

[2] Н.Н. Семенов, Цепные реакции. М. Наука – 1986. – 535 с.

[3] K.Kusova, P.Hapala, J. Valenta, P. Jelinek, O. Cibulka, I.Ondik, I.Pelant. Direct Bandgap Silicon: Tensile-Strained Silicon Nanocrystals. Adv. Mater. Interfaces **1**, 1300042 (2014).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕТОДИКЕ ЛЭГАК ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАДИАЛЬНОМУ И ТОРЦЕВОМУ МЕТАНИЮ МЕДНОЙ ОБОЛОЧКИ ВЗРЫВОМ АЛЮМИНИЗИРОВАННОГО ВВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА

Забусов П.В., Титова В.Б., Зименков А.А, Ширшова М.О., Тангалычева А.Р.
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г.Саров, Россия
pvzabusov@vniief.ru

Метательная способность (бризантность) взрывчатых веществ (ВВ) является одной из основных характеристик их действия. Для ее определения используется ряд методик, из которых наиболее часто используется методика радиального метания (цилиндр-тест и ее отечественный аналог Т-20) и торцевого метания (например, методики М-40, М-60). Полученные результаты используются для ранжирования ВВ по мощности и для инженерных оценок скорости метания оболочки в изделиях (например, по методике Гарни, Покровского и т.п.). При этом использование лазерного оптогетеродинного способа измерения скорости движения (методика PDV) позволяет достичь значительного повышения информативности и точности экспериментов по сравнению с традиционно используемыми методами отсечки (Т-20) и контактными датчиками (М-60).

В настоящей работе мы приводим результаты использования программы ТЕРМО-2010 для построения УРС ПД в форме JWL и Davis для пластизольного алюминизированного состава на основе октогена. Полученные УРС использованы для расчетного моделирования в методике ЛЭГАК [2] серии опытов по радиальному и торцевому метанию медных оболочек различного диаметра. Основной целью работы была попытка отследить наличие вклада алюминиевой добавки в бризантное действие ВВ и оценить масштабируемость этого вклада при изменении размеров и массы экспериментальных сборок.

Показано, что использование уравнений состояния ПВ, построенных с помощью термодинамических расчетов, позволяет получить удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных по радиальному и торцевому метанию. Тот факт, что для построения УРС использовались результаты термодинамических расчетов, проведенные в предположении нереагирующего алюминия, позволяет утверждать, что добавка алюминия на уровне 8% не оказывает положительного влияния на бризантное действие состава при малых степенях расширения.

При использовании специального алгоритма по определению параметров точки Чепмена-Жуге для «пористых» составов получено удовлетворительное согласие с экспериментальными данными по зависимости скорости распространения детонационной волны от начальной плотности состава.
Наилучшее согласие между результатами опыта и расчетов по скорости свободной поверхности достигнуто для коллиматоров, зондирующих область стационарной скользящей детонации.

[1] Имховик Н.А. Программа термодинамического расчета параметров детонации, МГТУ им. Н.Э.Баумана.Москва. 2010.
[2] Бахрах С.М., Величко С.В., Спиридонов В.Ф. и др. Методика ЛЭГАК-3D расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее реализации на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 2004. Вып. 4. С.41-50.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКТОРА ПАРОКИСЛОРОДНОЙ КОНВЕРСИИ МЕТАНА

Калабин Е.В[@], Иванов Д.В., Воронин А.В., Усачев В.Б.
АО «НИИ НПО «ЛУЧ» Протвинский филиал, г. Протвино, Россия
[@] KalabinEV@sialuch.ru

Экономически эффективные методы получения водорода, имеющие низкий уровень выброса парниковых газов, на сегодняшний день приоритетны для энергетики, транспорта и химической технологии. Одним из таких способов является развитие химико-технологической части для атомных станций, в которой тепло от ядерного реактора используется для производства водорода из ископаемого сырья – природного газа. Проектирование реакторов в составе химико-технологической части с учётом особенностей термодинамических параметров химических реакторов, условий протекания химических и технологических процессов обуславливает необходимость переработки, а иногда, и разработки обновлённых конструкций реакторов, которые ранее использовались при стандартной реализации технологии получения водорода. К таким реакторам, в том числе, относится реактор парокислородной конверсии.

Цель настоящей работы состоит в получении данных о характере диффузионного горения в парогазовой смеси метана, водорода, угарного газа и кислорода в реакторе парокислородной конверсии.

Для расчётов применялась модель, основанная на осреднённых по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса [1]. В качестве замыкающей математической модели для вычисления коэффициента турбулентного переноса применяется широко используемая при решении прикладных задач модель SST (Shear Stress Transport) [2]. Модель горения основана на концепции Steady Flamelets. Химический механизм горения парогазовой смеси является редуцированным кинетическим механизмом, содержащим 34 вещества и 92 химические реакции. Расчёты проводились на основе отрытого распространяемого газодинамического кода OpenFOAM [3].

По результатам моделирования реактора парокислородной конверсии метана в детальной трёхмерной постановке получена информация о форме и размере пламени, распределении скорости, температуры и концентрации компонентов газовой смеси. На

основании этих данных был предложен вариант модернизации однофорсуночного горелочного устройства.

[1] O. Reynolds, On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. A, vol.186, pp.123-164, 1895.

[2] Menter F. Zonal Two Equation k-w Turbulence Models For Aerodynamic Flows // 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference. — American Institute of Aeronautics, Astronautics, 1993

[3] https://openfoam.org/

УПРАВЛЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕМ ДЕТОНАЦИИ В СКВАЖИННОМ ЗАРЯДЕ ВВ

Касьяненко Д.Л.[1@]
[1]*ФГБОУ ВО Донецкий национальный технический университет*
[@] kasdmit@yandex.ru

Качество взрывоподготовки горной массы предопределяет необходимость обоснованного выбора средств взрывания, технологических параметров буровзрывных работ и способов инициирования. Способ инициирования является одним из элементов конструкции скважинных заряда, влияющих на характер распространением детонации. Влияние направления инициирования более существенно в крепких породах. При изучении особенностей донного и верхнего инициирования установлено, что наиболее благоприятным следует считать встречное инициирование системы зарядов, представляющее собой сочетание прямого и обратного инициирования [1]. Прямой и обратный способы инициирования скважинных зарядов снижают выход негабарита, однако в гранулированных ВВ они вызывают низкоскоростную детонацию с неполным выделением энергии (так называемое «выгорание» ВВ), что снижает давление продуктов взрыва [2]. Более перспективным направлением в инициировании скважинных зарядов, является создание в заряде не сферической или цилиндрической детонационной волны ДВ (в случае точечного инициирования), а косой ДВ, что достигается применением линейных инициаторов. Применение линейных инициаторов позволяет создать такое инициирование частей заряда, в результате чего в ВВ создается косая ДВ, вызывающая разновременное образование продуктов взрыва, а, следовательно, неравномерное давление газов в различных направлениях, что способствует перераспределению энергии взрыва в массиве [3].

Предложен способ [4] инициирования скважинных ВВ со спиральным размещением линейного инициатора в виде детонирующего шнура (ДШ), который обеспечивает интенсифицированное, максимально быстрое и энергоэффективное протекание детонации. Проверку заявленного способа проводили на Кальчикском карьере (ДНР, пгт. Кальчик) месторождения габбро. Результаты испытаний показали, что спиральное размещение инициирующего ДШ, по сравнение с продольным, увеличивает на 25-30% воронку взрыва и обеспечивает большее измельчение окружающих горных пород.

С целью обоснования рациональных параметров спирального размещения линейного инициатора было принято решение произвести исследования с использованием расчетного комплекса ANSYS Explicit Dynamics. Этот модуль программного комплекса ANSYS реализует численное моделирование высокоскоростных нелинейных динамических процессов методом конечных элементов. Он применяется для задач, характеризующихся короткими временными масштабами и сильными нелинейностями такими как: ударные и взрывные нагрузки, контактные взаимодействия, большие деформации, общее и локальное разрушение материалов.

Предварительный анализ результатов компьютерного моделирования детонационных волн в ANSYS Explicit Dynamics показал, что геометрические размеры заряда и спирали, по которой укладывается ДШ, являются ключевыми параметрами, позволяющими управлять распространением детонации в скважинном заряде ВВ. При этом шаг намотки инициатора (h) может быть выражен функцией: $h=f(d, V_{ДШ}, V_{ВВ})$, где d – диаметр цилиндрического заряда ВВ, $V_{ДШ}$ и $V_{ВВ}$ – скорости детонации ДШ и ВВ соответственно.

Дальнейшие исследования будут направлены на проведение лабораторных испытаний на взрывном полигоне для обоснования рациональных параметров спирального расположения ДШ, что позволит разработать технологически простой и малозатратный способ инициирования скважинных зарядов ВВ, улучшающий качество дробления горных пород, уменьшающий выход негабарита и обеспечивающий экономию ВВ за счёт большей эффективности действия заряда.

[1] Миндели Э.О. Разрушение горных пород – М.: Недра, 1975.

[2] Казанцев С.П., Цурик В.Д., Задерий Л.А. Использование комбинированных линейно-протяжных зарядов ВВ для направленного взрывного воздействия на среду // ФТПРПИ – СО Новосибирск, Наука, 1982. – №3.– С. 58–63.

[3] Клочко И.И. Некоторые способы управления параметрами взрывного импульса скважинных зарядов ВВ на карьерах // Научные труды Донецкого национального технического университета, серия: горно-геологическая, г. Донецк вып. №56. – 2002. – С. 46–49.

[4] Заявка на патент №2025132337 RU. Способ инициирования скважинных зарядов взрывчатых веществ : заявл. 19.11.2025 / И.И. Клочко, Д.Л. Касьяненко; заявитель ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет». – 8 с.

ТЕРМОХИМИЯ И КИНЕТИКА РАЗЛОЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ: КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ РАСЧЕТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МОДИФИКАЦИЙ МЕТОДА СВЯЗАННЫХ КЛАСТЕРОВ

Киселев В.Г..[1@], Муравьев Н.В.[2], Мельников И.Н. [2], Пивкина А.Н.[2]
[1] *Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск*
[2] *ФИЦ Химической физики им. Н.Н. Семенова, Москва*
[@] kiselev@phys.nsu.ru

В настоящей работе мы представляем новые теоретические данные для термохимии и кинетики ЭМ, полученных с использованием новых локальных модификаций методов связанных кластеров (DLPNO-CCSD(T)). Это делает возможным высокоточные расчеты циклических и каркасных энергетических нитро- и нитраминных ЭМ, например, CL-20 и октанитрокубана (ONC). Для данных соединений полученные значения энергий связи по крайней мере на 10 ккал/моль точнее, чем известные в литературе до сих пор. Мы также подробно изучили газофазную термохимию новых высокоэнергетических полинитропроизводных 5/6/5 гетероциклических каркасов, состоящих из конденсированного тетразина и двух триазольных/пиразольных циклов. С этой целью мы предложили и протестировали новую «bottom-up» методологию. Первоначально для небольших молекул использовались высокоточные многоуровневые процедуры W2-F12 и/или W1-F12 в сочетании с приближением энергии атомизации. В свою очередь, для частиц среднего размера (до 24 неводородных атомов) эти значения были дополнены энтальпиями изодесмических реакций, рассчитанными с помощью локального метода DLPNO-CCSD(T)/aVQZ. Как правило, DLPNO-CCSD(T) позволяет за разумное время выполнять рутинные расчеты методом связанных кластеров с базисными наборами QZ-качества для молекул ЭМ, состоящих из ~30-40 неводородных атомов. В более общей формулировке, данный подход предлагает новый уровень точности вычислительной термохимии и кинетики для важных ЭМ. Надежные термохимические значения, полученные в рамках локальных модификаций метода связанных кластеров (DLPNO-CCSD(T)), позволяют в рамках регулярного подхода получать более надежные значения термохимических параметров по сравнению со стандартно используемыми процедурами DFT.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-13-00077-П).

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА БАЗЕ НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ ОСОБЕННОСТЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

Кошлаков В.В.[1], Лаптев И.В.[1], Мосолов С.В.[1]

[1]Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В.Келдыша», Россия, Москва

kerc@elnet.msk.ru

1. Процессы горения в камере сгорания жидкостного ракетного двигателя

1.1. Физико-математическая модель турбулентного течения, смешения и горения топливных струй.

1.2. Постановка задачи, ограничения, используемые приближения, основные уравнения.

1.3. Горение топлива в камерах сгорания ракетных двигателей, в том числе безгазогенераторных схем на различных режимах: демонстрация возможностей расчетной модели, описание полученных особенностей процесса смесеобразования при работе на режимах основной ступени и конечной ступени по тяге.

1.4. Исследование детальной структуры и интегральной эффективности рабочих процессов в камерах сгорания перспективных кислородно-метановых ЖРД, работающих по схемам «газ-жидкость» и «газ-газ» на режимах форсирования применительно к горячему резервированию ДУ при аварийном полете ракеты и режимах дросселирования при посадке ракетного блока.

2. Идеология применения средств суперкомпьютерного моделирования для решения задач создания и отработки ракетных двигателей и их агрегатов.

2.1. Разработка цифровых моделей ракетных двигателей и их агрегатов для сокращения огневых испытаний путем замены на компьютерное моделирование, разработка отраслевых стандартов.

2.1.1 Формирование функциональных моделей ЖРД на ранних стадиях разработки

2.1.2 Создание динамических моделей ЖРД для воспроизведения нестационарных процессов: запуск двигателя, переход между режимами.

2.1.3 Разработка тепловых и динамических компьютерных моделей ЖРД.

2.2. Внедрение компьютерного моделирования в нормативные документы по отработке агрегатов двигателей, разработка отраслевых стандартов.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Крайнов А.Ю.[1,@], Моисеева К.М.[1]
[1]*Национальный исследовательский Томский государственный университет*
[@] akrainov@ftf.tsu.ru

В докладе представлены результаты математического моделирования нестационарного горения металлизированного смесевого твердого топлива (МСТТ). Представлены результаты численного моделирования горения МСТТ при гармоническом изменении давления над поверхностью горения, результаты расчета акустической проводимости МСТТ при его горении в двухконцевой Т-камере, при резком изменении давления в камере сгорания регулируемого двигателя.

Физико-математические постановки задач основаны на подходах динамики двухфазных реагирующих сред Р. И. Нигматулина [1] и представлены в работах [2 -4].

Из параметрических исследований установлены закономерности изменения скорости горения смесевого твердого топлива и топлива, содержащего высокоэнергетические порошки. Показано отличие нестационарной скорости горения от квазистационарной при быстро меняющемся давлении над поверхностью МСТТ. Продемонстрированы возможности численного алгоритма и расчетной программы для моделирования процессов горения смесевых топлив в энергетических установках.

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования (проект № FSWM-2025-0012).

[1] Нигматулин Р.И., 1987, Динамика многофазных сред. М.: Наука.

[2] Крайнов А.Ю., Моисеева К.М., 2024, Вестник ТГУ. Математика и механика. **90**. 130-139.

[3] Крайнов А. Ю., Митрофанов А. А., Моисеева К. М., 2026, ФГВ. **62 (3)**.

[4] Крайнов А. Ю., 2026, ИФЖ. **99 (3).** 782 – 792.

КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ГАЗОФАЗНЫХ ЭНТАЛЬПИЙ ОБРАЗОВАНИЯ РЯДА ПРОИЗВОДНЫХ БИС(ТЕТРАЗОЛО)1,2,4-ТРИАЗИНОВ

Волохов В.М.[1], Парахин В.В.[2], Амосова Е.С.[1], Лемперт Д.Б.[1@], Гончарова О.А.[1], Воеводин В.В.[3]

[1]*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, г. Черноголовка, Россия*

[2]*Институт органической химии РАН им.Н.Д.Зелинского, Москва, Россия*

[3]*Московский государственный университет, Москва, Россия*

[@]lempert@icp.ac.ru

С помощью высокопроизводительных квантово-химических вычислений, реализованных в программных комплексах Gaussian 09 и NWChem, впервые была определена оптимизированная структура, рассчитаны ИК-спектры и оценена энтальпия образования в газовой фазе для ряда ранее не описанных в литературе бис(тетразоло)1,2,4-триазинов, анелированных пиррольным, имидазольным или пиразольным циклами, замещенными нитро и/или аминогруппами.



1 **2а** **3а** **2б** **3б**

Высокоэнтальпийные полиазотистые гетероциклические соединения такого рода могут стать эффективными компонентами различных энергоемких композиций [1,2].

Анализ зависимости расчётных значений энтальпии образования от структуры молекул исследуемых соединений позволил установить, что замена одной *C*-нитрогруппы в пиразольном или имидазольном кольце соединений указанного ряда на *C*-аминозаместитель обеспечивает прирост удельной ΔH^{o}_{f}(г) в 190 – 230 кДж/кг, а наибольшей удельной энтальпии образования в этой серии тетрациклов (~4.5 МДж/кг) позволяет достичь создание соединения **3б** путем аннелирования бис(тетразоло)1,2,4-триазина амино-нитропиразольным циклом, что также может способствовать достижению достаточно высокой термической устойчивости этой структуры.

Сопоставление различных расчетных подходов показало, что метод G4MP2 обеспечивает наиболее согласованные и

воспроизводимые результаты как в реализации Gaussian, так и в разработанном модуле NWChem. Использование изодесмических схем позволяет существенно сократить вычислительные затраты, однако сопровождается снижением точности, особенно для функционализированных систем, что подчёркивает важность выбора базиса и метода при оценке термохимических характеристик. Анализ вычислительного процесса выявил высокую ресурсоёмкость композитных методов и чувствительность некоторых этапов расчета к распределению памяти и числу задействованных узлов, что подтверждает необходимость оптимальной организации вычислений для обеспечения устойчивости и эффективности моделирования сложных азотсодержащих гетероциклических систем. Проведение описанного комплекса высокопроизводительных вычислений может служить мощным инструментом предварительного для отбора наиболее перспективных структур на этапе компьютерного моделирования, что позволит оптимизировать направления дальнейших экспериментальных исследований и рационально распределять трудовые и материальные ресурсы при разработке новых энергоёмких соединений.

Расчеты, проводимые с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ, выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант 23-71-00005).

[1] Volokhov V., Parakhin V., Amosova E., Lempert D., Voevodin V. 2025, Supercomputing Frontiers and Innovations, **12**, 60-73.

[2] Volokhov V.M., Parakhin V.V., Amosova E.S., Lempert D.B., Lazarenko A.S., Voevodin V.V. 2025, Lobachevskii Journal of Mathematics, **46**, № 8, 3883–3894

ТЕСТИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНТАЛЬПИИ СУБЛИМАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Мельников И.Н.[1, @], Муравьев Н.В.[1], Киселев В.Г.[2], Пивкина А.Н.[1]
[1]*ФИЦ ХФ РАН*
[2]*ИХКГ СО РАН*
[@] igor.n.melnikov@yandex.ru

Энтальпия сублимации ($\Delta_s^g H_m^\circ$) – важная термохимическая величина, характеризующая силу межмолекулярных взаимодействий в кристалле. Определение надежных значений энтальпии сублимации важно для расчета достоверных значений стандартной энтальпии образования и последующей оценки энергетического потенциала энергетических материалов. Экспериментальные методы определения $\Delta_s^g H_m^\circ$, основанные на измерении температурной зависимости давления насыщенных паров, как правило, недоступны для труднолетучих соединений. Расчеты энтальпии сублимации с помощью высокоточных методов квантовохимического моделирования в настоящее время не являются рутинной процедурой и доступны на практике только для малых молекул. В связи с этим широкое применение находят эмпирические методы и QSPR (quantitative structure–property relationships) модели.

В данной работе проведено сравнительное тестирование точности расчета энтальпии сублимации при помощи различных эмпирических методов. В ходе тестирования рассмотрены энергетические материалы, для которых в литературе сообщаются достоверные экспериментальные значения энтальпии сублимации. Установлено, что наиболее достоверные значения получены при помощи линейного уравнения Дорофеевой [1, 2], которое устанавливает корреляцию между параметрами молекулярного электростатического потенциала и энтальпией сублимации при среднеквадратичном отклонении 17 кДж/моль и максимальном – 69 кДж/моль. По результатам проведенного тестирования данный метод рекомендован для высокосоростного скрининга новых энергетических материалов.

[1] Dorofeeva O.V., Filimonova M.A., 2018, Chemical Physics Letters. 711. 231-235.

[2] Rudakov G.F., Sinditskii V.P., Andreeva I.A., Botnikova A.I., Veselkina P.R., Kostanyan S.K., Yudin N.V., Serushkin V.V., Cherkaev G.V., Dorofeeva O.V., 2022, Chemical Engineering Journal, 450. 138073.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ МИКРОСТРУЙ ВОДОРОДА

Моисеева К.М.[1,@], Крайнов А.Ю.[1], Крайнов Д.А.[1]
[1]*Национальный исследовательский Томский государственный университет*
[@] Moiseeva_KM@t-sk.ru

Интерес к использованию водорода как горючего в энергетических установках обусловлен его высокой энергией сгорания и экологической чистотой продуктов горения.

В докладе представлены результаты математического моделирования горения затопленной микроструи водорода. Математическая модель состоит из уравнений сохранения массы газа и его компонентов, импульса, энергии, состояния идеального газа. записана в виде системы уравнений Навье-Стокса для вязкого, теплопроводного, реагирующего газа в осесимметричном приближении. Турбулентный перенос массы, импульса и энергии учитывается с использованием *k-e* модели турбулентности. Скорость реакции водорода с кислородом определяется зависимостью, приведенной в [1]/

Представлены результаты по численному алгоритму, написанному с использованием метода С.К. Годунова, и с использованием пакета Ansys Fluent. Численный алгоритм по методу С. К. Годунова дополнен явной аппроксимацией вязких, диффузионных слагаемых в уравнениях движения, сохранения массы компонентов и энергии газа.

Представлены результаты расчета горения микроструи водорода при диаметрах сопла подачи водорода от 3 мм до 1 мм, при скорости газа от 500 м/с до 2500 м/с. Результаты расчетов совпадают с результатами экспериментальных наблюдений формы факела горения микроструй водорода, приведенных в [2, 3].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 25-21-00663).

[1] Щетинков Е. С. М.: 1965. 740 с.

[2] Довгаль А. В., Козлов В. В., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. 2023, ПМТФ. Т. 64, № 1. 3-12.

[3] Тамбовцев А. С., Козлов В. В., Литвиненко Ю. А., Литвиненко М. В., Шмаков А. Г. 2024, ПМТФ. Т. 65, № 3. 4-12.

АНАЛИЗ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА РЕАКТОРА МАТРИЧНОЙ КОНВЕРСИИ МЕТАНА В СИНТЕЗ-ГАЗ МЕТОДАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

В.Г. Султанов[1,@], А.В. Размыслов[1], А.В. Никитин[1,2],
В.В. Отнельченко[1], А.Д. Данилов[2], И.В. Седов[1], В.С. Арутюнов[1,2]
[1]*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка*
[2]*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва*
[@] v.sultanov@icp.ac.ru

Основа современной газохимии – предварительная конверсия природного газа в синтез-газ. Сложность и высокое энергопотребление существующих промышленных технологий конверсии остается одним из препятствий для более интенсивного развития газохимии. Среди предлагаемых альтернативных технологий – некаталитический процесс матричного риформинга природного газа на основе внутренней конвективной и радиационной рекуперации тепла продуктов конверсии к матрице и натекающему потоку реагентов. Рекуперация тепла позволяет существенно расширить богатый предел конверсии метана вплоть до значений коэффициента избытка окислителя $\alpha \approx 0.3$ и тем самым повысить эффективность процесса за счет повышения выхода синтез-газа и сокращения потерь метана на полное окисление.

В настоящей работе численно изучается рабочий процесс в камере сгорания демонстрационной установки разработанного в ФИЦ ПХФ и МХ РАН реактора некаталитической конверсии природного газа, тракт которой перекрыт тонкой пористой металлической пластиной. Рассматривалась сопряженная задача течения через тракт и горения предварительно перемешанной метано-воздушной смеси и переноса тепла в пористой металической марице с учетом обмена между средами тепла и импульса. Показаны особенности течения и теплообмена в камере сгорания реактора и влияние на них проницаемости матрицы, расхода и коэффициента избытка окислителя газовой смеси.

Работа выполнена в рамках государственного задания FFSG-2024-0018.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ ИСТЕЧЕНИЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА ИЗ ВОДЫ В АТМОСФЕРУ ПРИ АВАРИЯХ ПОДВОДНЫХ НЕФТЕГАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ

А.В. Загнитько, С.Е. Сальников, Д.Ю. Федин, В.И. Алексеев, Н.П.Зарецкий

НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Россия, Москва, пл. Академика И.В. Курчатова, д.1

e-mail: Salnikov_SE@nrcki.ru

При горизонтальном и/или вертикальном истечении природного газа (ПГ) в слой морской воды в результате аварий подводных газовых скважин, промысловых и транспортных газопроводов ,например, подрыв «Северного потока» с давлением ПГ до 80 атм. и с выбросом более $2{,}2\times10^5$ тонн ПГ за 5–6 суток при температуре $T \approx 280 – 290$ К возникает газожидкостная струя, а на ее свободной поверхности развивается газожидкостный бугор с кипящим слоем. Это приводит к образованию в атмосфере облака топливовоздушных смесей (ТВС) с существенно неоднородной по концентрации углеводородной и аэрозольной оставляющей из капель морской воды и солевых частиц [1,2].

Цель работы заключалась в моделировании и анализе газокапельных истечений метана, гелия, водорода, аргона в атмосферу при барботаже морской воды с давлением их газовых струй от 1 до 80 атм. и приведенной скоростью барботирования $U = 0.005 – 250$ м/с при числах Фруда $Fr = 10^{-4} – 10^4$, Рейнольдса $Re = 0.01 – 10^6$ и Вебера $We < 10^3$ с генерацией пузырькового, пенного, струйного и фонтанирующего режимов выбросов смеси газов, капель и паров воды в атмосферный воздух с температурой от 270 до 320 К.

Создан комплекс анализа воспламеняемых истечений газокапельных потоков в атмосферу при разливах, барботаже и выбросах ПГ и паров сжиженного природного газа (СПГ), включающий аспираторы их аэрозольной и паровой компонент, инфракрасные (ИК) газоанализаторы, многоканальные лазерные анализаторы капель и емкостные датчики их осадков с передачей цифровых данных по кабелю через интерфейс связи RS-485 или радиоканалу на частоте 433 – 2400 МГц на удаленный и безопасный сервер [3–5]. ИК газоанализатор включает три оптических ИК датчика с длиной волны излучения $\lambda = 2.9$; 3.31 и 3.4 мкм с блоком отбора ПГ для мониторинга его газокапельных истечений из морской воды в атмосферу в смеси с воздухом, парами воды и морским аэрозолем с

аномальной концентрацией морских капель и солевых частиц до 100 – 1000 г/м^3 и с осуществлением контролируемой во времени эффективной фильтрации морского аэрозоля. Вследствие контролируемой во времени эффективной фильтрации значительных по массовой концентрации выбросов морского аэрозоля в атмосферу (до 1000 г/м^3) устранена возможность его попадания в набор из трех оптических ИК датчиков и его влияния на их характеристики и результаты анализа ПГ. Комплекс мониторинга газокапельных потоков в атмосферу может быть использован для контроля промышленной безопасности объектов ТЭК и разработки генераторов «мгновенных» аэрозольных барьеров в атмосфере на пути аварийных истечений топлив, токсичных и радиоактивных газов и т.п.

Показано, что измеренные значения скорости всплытия пузырьков гелия, метана, водорода, аргона и воздуха диаметром до 2 – 3 мм в технических маслах, мазуте, керосине и воде согласуются с расчетными по формуле Адамара-Рыбчинского [2–5]. Скорость их всплытия существенно зависит от вязкости жидкости и практически не зависит от типа газа. В процессе барботажа воды метаном, гелием, водородом и воздухом величины диаметра d, массовой концентрации M, оптической плотности D и поверхностной концентрация S морских капель существенно зависели от вязкости и поверхностного натяжения жидкостей, режимов барботажа и высоты над поверхностью жидкости. При этом наблюдались распад неустойчивых струй, седиментация, испарение, рассеивание и коагуляция капель с разбавлением ТВС атмосферным воздухом.

Проведен анализ испарения капель морской воды и СПГ диаметром от 1 до 5000 мкм при температуре атмосферы от 273 до 320 К согласно теории их диффузионного испарения Максвелла-Ленгмюра и теории конвективного переноса энергии и массы для капель СПГ, температура которых существенно отличается от температуры воздуха [3–5]. Морские капли с $d < 20$ мкм испаряются с образованием солевой фракции субмикронных частиц с примесями воды за время менее 0.05 с при концентрации соли в воде до 50 г/литр.

Показано, что ионы морской воды с удельным электрическим сопротивление до 0,1 Ом·м практически не влияют на ослабление

электромагнитного излучения с частотой от 400 до 2400 МГц морскими каплями в оптически плотных облаках ТВС.

В случае струйного режима ($Fr < 10^{-2}$, $U < 0.2$ м/с) размеры капель воды варьировались от 30 до 5×10^3 мкм, значения $D \approx 0.02 – 4$, $S \approx 1 – 300$ м^2/м^3 и $M = 30 – 500$ г/м^3 с интенсивным разбавлением воздухом. При фонтанирующем барботаже ($Fr > 5$, U =1–50 м/с) величина $D > 4$, наблюдались выбросы жидких фрагментов размером и концентрацией до 0.05 м и 5 кг/м^3 с интенсивными до 30 мм/с осадками. При этом, зоны ТВС с концентрацией капель и паров в масштабных облаках, превышающей их нижний предел воспламенения, как правило, развивались при струйном и фонтанирующем барботаже с их разбавлением атмосферным воздухом. Отметим, что поглощения метана водой практически не наблюдалось, так как при $T = 273 – 320$ К его растворимость составляет не более 2×10^{-5} г (метан)/г (вода).

При пузырьковом, струйном и фонтанирующем режимах барботажа воды метаном (газогидраты) наличие льда на ее поверхности с долей его площади до 90 % не влияло на поглощение метана, так как его растворимость во льду в 10^3 меньше, чем в воде. Наблюдалось образование его смесей с воздухом, парами и каплями воды в воспламеняемом диапазоне объемной концентрации $C = 5–16$ об. %. В процессе барботажа жидкого азота метаном при $Fr < 0.01$, $Re < 10^2$ и $U < 0{,}01$ м/с имело место его вымораживание с уменьшением C от 99 до 1.5 об. %. При их размораживании фиксировались газообразные выбросы метана с $C \leq 96$ об.%.

Из анализа данных следует, что при истечении ПГ в слой морской воды с образованием газожидкостного бугра с кипящим слоем развивающиеся над поверхностью моря масштабные облака ТВС с концентрацией капель воды и солевых частиц от 100 до 1000 г/м^3 с большой вероятностью являются пожаробезопасными при их стандартном методе воспламенения пламенем снизу вверх, вследствие ингибирующего влияния на их воспламенение аэрозольной составляющей и разбавления ветром ТВС.

Предложенные подходы и методики, созданные и испытанные на практике комплексы мобильной и радиоуправляемой диагностики взрывопожароопасных газокапельных истечений ПГ и СПГ при аварийных, масштабных разливах, барботаже и выбросах топлив в

атмосферу не имеют аналогов в РФ и за рубежом. Рабочие образцы диагностических блоков ТВС в течении ряда лет успешно испытаны на южном, центральном и северном полигонах РФ при температуре атмосферы от 250 до 320 К, защищены 35 патентами НИЦ «Курчатовский институт» за 2019–2025 гг. и отмечены двумя премиями И.В. Курчатова в 2020 и 2025 г. [3–5].

1. *Гамера Ю.В. и др.* Оценка размеров зоны загазованности над поверхностью воды при фонтанировании газовой скважины с подводным устьем // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 4 (72). С.70. http://journals.igps.ru; Диверсия на «Северных потоках». ru.vikipedia.org.

2. *Г.Н.Абрамович.* Теория турбулентных струй. 1960. М. Физматгиз. 715 с.

3. *Загнитько А.В., Зарецкий Н.П., Алексеев В.И. и др.* Экспресс мониторинг газокапельных выбросов СПГ в атмосферу // Ж. Газовая промышленность. 2021. № 5. С.82.

4. *Загнитько А.В., Пименов В.В., Сальников С.Е., Федин Д.Ю.* Быстродействующий двухканальный анализатор оптически плотных выбросов аэрозолей на основе диодных оптопар с длиной волны 0.65 и 3.4 микрона // Ж. Технической физики. 2023. Т. 93, Выпуск 2. С. 207. DOI: 10.21883/JTF.2023.02.54494.236.

5. *Загнитько А.В., Зарецкий Н.П., Мацуков И.Д., Сальников С.Е.* Низкотемпературные трехканальные газоанализаторы в оптическом мониторинге пожароопасных истечений сжиженного природного газа // Ж. Физической химии. 2023. Т. 97, № 1. С.183. DOI: 10.31857/S0044453723010375.

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА СИСТЕМ С ПОЛИХРОННОЙ КИНЕТИКОЙ

Самойленко Н.Г.[@], Шатунова Е.Н., Костин А.Ю.
Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия
[@]sam@icp.ac.ru

Полихронная (экспоненциальная) кинетика, основу которой составляет существование ансамблей частиц с распределенной реакционной способностью по энергиям активации или предэкспонентам, позволяет, с одной стороны, объяснить новые результаты исследований свойств конденсированных систем, с другой, повысить эффективность различных технологических процессов.

Целью работы являются численные исследования особенностей теплового взрыва систем с большими тепловыми эффектами и энергиями активации, реагирующих по закону полихронной кинетики. Для распределения реагирующих частиц по ансамблям взято обобщенное кинетическое уравнение, полученное в работе [1]. Исследован тепловой взрыв в периодическом реакторе в основных приближениях теории Семенова. В этом реакторе с заданным объемом и теплоотдающей поверхностью происходит экзотермическая реакция, которая характеризуется параметром полихронности, определяющим относительную величину интервала изменения энергий активации реагирующей системы. Рассмотрены два распределения энергий активации (возрастающее и падающее).

Проведенные исследования показали, что критическое условие теплового взрыва существенным образом зависит от параметра полихронности в очень узком интервале его изменения. Так увеличение этого параметра до пяти процентов резко уменьшает критическое условие в несколько раз. Для временных характеристик вблизи критического условия обнаружено, что время достижения максимального разогрева и период индукции уменьшается с ростом параметра полихронности.

Работа выполнена по теме госзадания, № темы 124020500064-2.

[1]. Блошенко В.Н. и др. 1999, Докл. акад. наук, **368**, 4, 501-502.

ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ

Смирнов Н.Н.[1,2,@], Михальченко Е.В.[1,2], Стамов Л.И.[2]
[1]*МГУ имени М.В.Ломоносова*
[2]*НИЦ Курчатовский институт - НИИСИ*
[@] mech.math.msu@inbox.ru

Исследования процессов горения и детонации горючих смесей имеет длинную историю и большое значение для развития человеческого общества. Особенный интерес представляет режим быстрого сверхзвукового горения – детонация, поскольку является одновременно и наиболее эффективным режимом горения, и наиболее разрушительным в силу быстроты протекающих процессов и возникающего ущерба. Поэтому изучение различных способов его возникновения имеет большое прикладное значение как с точки зрения инициирования детонации, к примеру, в перспективных силовых установках, основанных на детонационном сжигании топлива, так и с точки зрения его предотвращения и минимизации разрушительных последствий взрывов, например, при транспортировке и хранении различных топлив. При этом особое место занимают переходные процессы, когда медленное горение при некоторых условиях может перейти в детонацию.

Одной из интересных и актуальных задач, связанных с распространением пламени и возникновением детонации, является горение в заполненными перемешанными горючими смесями каналах с различными объектами и препятствиями. Наличие препятствий приводит к искажению фронта пламени и увеличению его скорости. Поэтому с точки зрения безопасности важно всесторонне изучить механизм взаимодействия пламени с препятствиями.

Водород является одним из самых экологически чистых видов топлива, поэтому прилагаются серьезные усилия, чтобы сделать его наиболее распространенным топливом. Однако водород, обладая высокой удельной теплотой сгорания, в смеси с воздухом при атмосферном давлении дает плотность энергии существенно ниже углеводородов из-за его малой молярной массы. Смеси водорода с воздухом очень чувствительны к воспламенению и взрыву, что создает проблему безопасности при использовании водорода в качестве топлива.

Химические ингибиторы продемонстрировали свою эффективность в подавлении режимов горения. Однако, впрыск

ингибитора и смешивание его с горючей смесью является процессом, обусловленным конвективной диффузией, которая имеет гораздо большее характерное время, чем детонация, сопровождающаяся распространением сверхзвуковой ударной волны. Таким образом, ингибитор вряд ли может быть эффективным для предотвращения детонации, будучи впрыснутым после случайного выброса газообразного топлива. Существует единственный вариант химического предотвращения начала детонации: предварительное смешивание ингибитора с топливом, так как он должен уже содержаться в топливе в случае случайного выброса топлива. Один и тот же ингибитор должен обладать обоими свойствами: подавлять возникновение детонации в смеси водорода с воздухом и поддерживать устойчивое горение в горелках разных типов. В цепных реакциях важнейшую роль играют радикалы как промежуточные продукты элементарных стадий. Без посредничества радикалов конечный продукт не образуется. В реакции H_2 и O_2 наиболее подвижным и активным радикалом является атомарный водород H. Если его активность снизить, реакция замедлится. Ингибитором и одновременно горючим, которое будет использоваться для снижения концентрации атомарного водорода, может быть ненасыщенный углеводород.

В докладе рассматривается совместное влияние геометрических неоднородностей объёмов, заполненных взрывоопасной смесью, и добавления горючих ингибиторов детонации на переход горения в детонацию в смесях водорода с воздухом.

При рассмотрении влияния ингибитора на сформировавшуюся детонационную волну было установлено, что при столкновении детонационной волны со стехиометрической водородно-воздушной смесью, содержащей 6,9% или более пропилена по объему, детонационная волна подавляется. Если смесь содержит менее 5,6%, то происходит лишь снижение скорости детонационной волны.

При рассмотрении влияния ингибитора на ускорение турбулентного пламени в стехиометрической водородно-воздушной смеси было установлено, что добавление 4,3% или более пропилена по объему предотвращает переход горения в детонацию. Добавление 2,9% или менее ингибитора позволяет фронту пламени перейти к детонации. Добавление 5,6% ингибитора в смесь снижает скорость турбулентного пламени до нескольких десятков м/с, а 6,9% — до нескольких м/с.

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ВОДОРОДНО-МЕТАНОВЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ В ПРОСТРАНСТВО С ПРЕГРАДОЙ

Смыгалина А.Е.[1@], Киверин А.Д.[1,2]
[1]*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*
[@] smygalina-anna@yandex.ru

Истечение газообразного водорода под высоким давлением в окислитель способно вызвать самовоспламенение [1]. При этом, для практики является важным определение пределов самовоспламенения при варьировании параметров процесса истечения.

Настоящая работа, проводимая методами численного моделирования газодинамики и горения, является продолжением работы [2] по исследованию пределов самовоспламенения водорода с добавлением метана при истечении под давлением через малое отверстие в атмосферу. В настоящем исследовании постановка задачи учитывает дополнительные факторы: истечение осуществляется через постепенно раскрывающуюся диафрагму, а также на пути струи установлена плоская поперечная преграда. Проводится серия расчетов при варьировании начального давления смеси, содержания метана, времени раскрытия диафрагмы. Преграда установлена на расстоянии 5 мм от диафрагмы. Дополнительно рассматривается истечение в открытое пространство.

В работе получено, что установка преграды расширяет пределы воспламенения по давлению и времени раскрытия, что обусловлено усилением нагрева и перемешивания в области контактной границы за счет отражения ударной волны от поверхности преграды. Кроме того, получено, что при учете указанных факторов: наличия преграды, постепенного раскрытия диафрагмы, очаг воспламенения возникает в области взаимодействия струи с преградой значительно выше оси симметрии, вдоль которой истекает горючая смесь. Добавление метана уже при 5% (об.) приводит к ингибированию воспламенения, в результате чего пределы воспламенения по давлению и времени раскрытия сужаются. При этом получено, что ингибирование происходит существенно интенсивнее в области высоких давлений (500 – 700 атм), и является незначительным в области умеренных давлений (50 – 300 атм). Повышение содержания метана до 20% (об.)

приводит к еще большему ингибированию воспламенения и сужению его пределов.

Полученные результаты могут быть полезны как для обеспечения отсутствия воспламенения смесей на основе водорода с целью безопасности, так и для организации поджига, например, в камере сгорания ДВС.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (No. 075-15-2024-543, 24 апреля 2024).

[1] Wolanski P., Wojcicki S., 1972, Symp. (Int.) Combust. **14.** 1217-23

[2] Smygalina A.E., Kiverin A.D., 2023, J. Energy Storage. **73.** 108911

ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ В ФИЗИКЕ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ В ГАЗОВЫХ И КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ

Султанов В.Г.
ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН, г. Черноголовка, РФ
v.sultanov@icp.ac.ru

В докладе рассматриваются основные особенности построения «цифровых моделей» для численного моделирования в физике горения и взрыва в задачах инерциального управляемого термоядерного синтеза, высокоскоростного удара, физики и химии ударно-волновых и детонационных явлений, воздействие пучков заряженных и нейтральных частиц, лазерного излучения на вещество и т.п., а также функционирования мощных энергетических установок, обеспечения исследований при высоких плотностях энергии и многих других. Затрагиваются вопросы использования в научных исследованиях и инженерном проектировании собственных разработок, в том числе большими коллективами авторов, и программных пакетов с открытым исходным кодом. Рассматриваются особенности их применения и полученные результаты, требуемые вычислительные ресурсы и роли, в которых выступают разработчики «цифровых моделей» и научные работники и инженеры, пользователи данных моделей

Работа выполнена в рамках государственного задания FFSG-2024-0018.

Влияние температуры внешней среды на характер воспламенения частицы древесной биомассы

Сыродой С.В.[1,@], Некрасов С.С., Кузнецов Г.В.
[1]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*
[@] ssyrodoy@yandex.ru

Теплоэнергетика остается значительным источником загрязнения, несмотря на переход к низкоуглеродным технологиям. Перспективное направление снижения выбросов – сжигание древесной биомассы. Однако механизмы горения таких систем изучены слабо, особенно переход от газофазного горения к гетерогенному режиму. Целью исследования является определение условий перехода от одного режима зажигания частицы древесной биомассы к другому при варьировании температуры внешней среды.

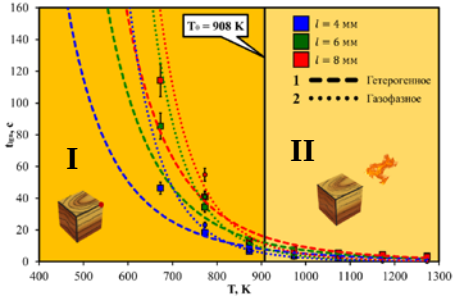


Рис. 1. Зависимости времён задержки зажигания (1 – гетерогенного и 2 – газофазного) от температуры окислителя пространства для древесины: сосны I – область гетерогенного зажигания, II – область газофазного зажигания.

На рисунке 1 приведены зависимости времен задержек воспламенения от температуры окислителя. Установлено, что температура перехода между гетерогенным и газофазным режимами существенно зависит от породы древесины: для сосны она составляет ~908 К, для березы ~778 К, для кедра ~858 К, для лиственницы 760-798 К. При этом для сосны, березы и кедра граница перехода от одного режима зажигания к другому не зависит от характерного размера частицы, в то время как для лиственницы установлена линейная зависимость температуры перехода режима зажигания от характерного размера частицы. Это обусловлено совсйтсвами (теплофизическими и фильтрационными) пористой структуры древесины и составом летучих.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-79-10092-П).

КАЛИБРОВКА УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА НА ОСНОВЕ ТРИАМИНОТРИНИТРОБЕНЗОЛА НА ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО РАЗЛЕТУ МЕДНЫХ ТРУБОК ДИАМЕТРОМ 20 ММ

Титова Виктория Борисовна, Кирюхина Маргарита Николаевна, Буренков Олег Михайлович, Ширшова Мария Олеговна, Зименков Алексей Александрович

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ИТМФ, г. Саров, Нижегородской обл., titova@vniief.ru

Проведено сравнение различных уравнений состояния ПВ, используемых в расчетах ВНИИЭФ. Выполнено сравнение экспериментальных и расчетных данных, полученных с учётом «идеальной» детонации и с учетом кинетики детонации МК с использованием численной методики ЛЭГАК. Приведен набор параметров нового УРС для ВВ на основе ТАТБ. Показано, что предложенное УРС позволяет описывать экспериментальные данные при больших степенях расширения ПВ.

В работе представлены результаты калибровки нового уравнения состояния продуктов взрыва для взрывчатого состава на основе ТАТБ. Для этого использовались экспериментальные данные ИЛФИ по радиальному и торцевому метанию медных трубок диаметром 20 мм.

Проведено численное моделирование экспериментов по методике ЛЭГАК с использованием «идеальной» детонации и кинетики детонации МК.

Выполнено сравнение различных уравнений состояния ПВ, используемых в расчетах ВНИИЭФ. На расчетах, проведенных с учетом «идеальной» детонации, все рассмотренные УРС дают отклонение от опыта в той или иной области. Наиболее точное соответствие с опытом показывает УРС в форме мод. Зубарева. С учетом экспериментальных данных на изэнтропе разгрузки и экспериментальных данных по радиальному и торцевому метанию получены параметры данного УРС.

Расчеты с учетом кинетики детонации МК с использованием УРС в форме мод. Зубарева в целом хорошо описывают экспериментальные данные, отличие находится в пределах различий в опыте на разных коллиматорах.

Показано, что новый УРС в форме мод. Зубарева с предложенным набором параметров позволяет описывать экспериментальные данные при больших степенях расширения ПВ при численном моделировании с учетом кинетики детонации МК.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ВЫХОДЕ ИЗ КС

Тропин Я.В.[1,2,@], Рашковский С.А.[2]
[1]*ОКБ им. А. Люльки – филиал ПАО «ОДК-УМПО»,*
[2]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук*
[@] tropin.ya@yandex.ru

Камера сгорания (КС) — ключевой и наиболее сложный узел газотурбинного двигателя (ГТД), определяющий его эффективность и надёжность. Физико-химические процессы в КС отличаются высокой сложностью: для их анализа требуются комплексные математические модели с множеством параметров, не поддающихся прямому расчёту, а верификация таких моделей затруднена из-за ограниченного объёма экспериментальных данных.

Цель работы — разработать и верифицировать численную модель процессов в кольцевой камере сгорания ГТД, воспроизводящую особенности температурного поля на выходе (в т.ч. температурные максимумы), и выявить причины их формирования.

Объектом исследования выступила кольцевая камера сгорания с 28 идентичными горелочными устройствами, равномерно расположенными вдоль окружности. Распределение температуры на выходе из КС измерялось набором термопар, установленных на поворотной платформе («гребёнке») в шахматном порядке.

Расчёты выполнены в программном комплексе STAR-CCM+. Для моделирования процесса распыла жидкого авиационного керосина использовался лагранжев метод с применением теории линейной нестабильной плёночной атомизации (LISA). Описание турбулентных течений и горения осуществлялось через систему уравнений Навье–Стокса для сжимаемого газа и k-ε realizable модель турбулентности. Распространение фронта пламени описывалось моделью стабильных ламинарных пламен (SLF) с учётом химико-кинетических параметров окисления суррогатного топлива.

Экспериментальные данные показали наличие 14 температурных максимумов на выходе из камеры сгорания — этот эффект связан с попарным объединением индивидуальных факелов на выходе из жаровой трубы [1]. Анализ результатов численного моделирования выявил ряд закономерностей. Во-первых,

упрощённый секторный подход не обеспечивает необходимой точности расчёта из-за неравномерности расхода топлива по форсункам. Во-вторых, отклонения массового расхода на отдельных форсунках от среднего значения приводят к существенному увеличению погрешности расчётов. Для корректного воспроизведения окружной и радиальной неравномерности температурного поля, а также для получения расчётных температурных максимумов, соответствующих эксперименту, необходим комплексный подход: детальный гидравлический расчёт топливного коллектора в сочетании с полным трёхмерным расчётом всей камеры сгорания с учётом всех конструктивных особенностей.

Разработанная численная модель позволяет адекватно описывать сложные физико-химические процессы в камере сгорания ГТД и воспроизводить особенности температурного поля на выходе, включая периодические особенности и температурные максимумы. Соответствие расчётных и экспериментальных данных подтверждает достоверность модели, а предложенный комплексный подход к моделированию (гидравлический расчёт + трёхмерный расчёт) обеспечивает существенное повышение точности прогнозирования температурных полей в КС.

Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования конструкции камер сгорания, оптимизации распределения топлива по форсункам, повышения эффективности и надёжности авиационных ГТД, а также для дальнейшего уточнения математической модели с учётом дополнительных факторов — например, износа элементов КС или изменения состава топлива.

[1] Тропин Я.В., Рашковский С.А. Особенности температурных полей в камере сгорания газотурбинного двигателя // Горение и взрыв, 2024. Т. 17. № 2. С. 25-34. doi: 10.30826/CE24170204

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 124012500440-9)

РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Л.И. Трутнева, Е.В. Романова, Б.В. Певченко, Р.Г. Никитин
АО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск
Romanovaev_tb@frpc-altay.ru

Статья посвящена одному из важнейших вопросов − разработке алгоритмов и программного обеспечения для расчета основных термодинамических, энергетических и детонационных характеристик при создании новых, перспективных взрывчатых составов (ВС) с высокими значениями работоспособности относительно тротила, таких как величина тротилового эквивалента по импульсу воздушной ударной волны, скорости детонации и др.

Взрывное действие взрывчатых составов (ВС) зависит от соотношения составляющих его компонентов, их энергетических, физико-химических и физико-механических свойств. Расчетно-теоретическое моделирование позволяет спрогнозировать свойства реализуемых ВС, опираясь на свойства индивидуальных компонентов и химическую архитектуру состава.

Ключевыми параметрами для оценки определены: тепловой эффект реакции взрывчатого превращения; плотность состава; кислородный баланс; теплота сгорания; удельное газосодержание продуктов взрыва; тротиловый эквивалент по импульсу воздушной ударной волны; скорость детонации.

Разработан и реализован в EXCEL и MATHCAD алгоритм расчета основных энергетических и детонационных характеристик ВС.

Методом расчетно-теоретического моделирования ключевых показателей были скомпонованы перспективные взрывчатые составы с прогнозируемо высокими показателями энергетических и детонационных характеристик.

Расчётные значения подтверждены экспериментальными данными, полученными на модельных образцах. Расчетные и экспериментальные данные удовлетворительно согласуются.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ ЖИДКОГО КИСЛОРОДА В АТМОСФЕРЕ ГАЗООБРАЗНОГО ВОДОРОДА

Тюренкова В.В.[1,2,@], Смирнова М.Н.[1,2], Стамов Л.И.[1,2], Закрия А.З.[2]
[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия*
[@] tyurenkova.v.v@yandex.ru

Работа посвящена нейросетевому подходу к моделированию неравновесного испарения капли жидкого кислорода в газообразном водороде. Для решения системы трансцендентных уравнений, описывающих квазистационарное состояние газовой смеси в окрестности капли, задействована глубокая полносвязная сеть. Модель состоит из четырех скрытых слоев с кусочно-линейной активацией, что обеспечивает высокую точность аппроксимации.

Модель обучена на выборке из 5000 точек, полученных численным решением указанной системы методом fsolve. Входными параметрами служат давление, температура окружающей среды, массовая доля кислорода, температура жидкости и параметр неравновесности. Достигнута высокая точность аппроксимации с коэффициентом детерминации выше 0,99 для числа Пекле, характеризующего массовую скорость испарения, и температуры поверхности капли. Средняя абсолютная ошибка для температуры поверхности составила 1.18 K. Нейросетевая модель обеспечивает ускорение вычислений более чем в 150 раз по сравнению с прямым численным решением при сохранении точности в пределах 3%. Учтено физическое ограничение на критическую температуру кислорода (154.58 K). Показано, что учёт неравновесных эффектов увеличивает время жизни капли в 2–5 раз, что необходимо учитывать при проектировании камер сгорания жидкостных ракетных двигателей.

Разработанный подход может быть применен для ускорения CFD-расчетов процессов в камерах сгорания жидкостных ракетных двигателей, где требуется моделирование испарения миллионов капель на каждом временном шаге. Учет неравновесных эффектов необходим для корректного определения длины факела распыла и обеспечения полного сгорания топлива.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ФРОНТА ПЛАМЕНИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА С ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ И КИСЛОРОДОМ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ ГОРЕНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМ ФТОР-АММИАЧНЫМ ФАКЕЛОМ

Федорова Т.А.[1,@], Пашкевич Д.С.[1,2]

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

[2]ООО «Новые химические продукты», г. Санкт-Петербург, Россия

[@] fyodorova_ta@mail.ru

Гексафторид урана, обогащенного по изотопу ^{235}U, получаемый на заводах по разделению изотопов, используют при производстве топлива для ядерных реакторов, а гексафторид урана, обеднённого по изотопу ^{235}U (ОГФУ), в основном отправляют на длительное хранение. В России количество ОГФУ увеличивается на 18–20 тысяч тонн ежегодно, а общий объем накопления составляет около 1 миллиона тонн. При этом UF_6 является веществом 1-го класса опасности, и его хранение может представлять угрозу окружающей среде.

Одним из направлений среди исследований по созданию эффективного метода переработки ОГФУ является его взаимодействие с водородсодержащими веществами и кислородом в режиме горения. В данном методе в качестве водородсодержащих веществ предлагается использование водорода (1) или метана (природного газа) (2), как самых распространенных и коммерчески доступных горючих:

$$UF_{6газ}+3.4H_{2газ}+1.2O_{2газ}\rightarrow UO_{2тв}+6HF_{газ}+0.4H_2O_{газ}-583\ кДж, \quad (1)$$

$$UF_{6газ}+1.5CH_{4газ}+2.5O_{2газ}\rightarrow UO_{2тв}+6HF_{газ}+1.5CO_{2газ}-1056\ кДж. \quad (2)$$

По экспериментальным данным [1], полученным на пилотном реакторе типа «туннельная горелка» установлено, что основным фторсодержащим продуктом процессов (1) и (2) является фторид водорода, а основным урансодержащим – оксиды урана, когда количество атомов водорода в реагирующей системе более или равно количеству атомов фтора и количество атомов кислорода в 2 раза превышает количество атомов урана для (1) и в 2.5 для (2).

При проведении физических экспериментов инициирование фронта пламени в системе ОГФУ – водородсодержащее вещество – кислород осуществляли с помощью самовоспламеняющейся пары фтор-аммиак [1], подаваемой по осесимметричной коаксиальной цилиндрической форсунке, установленной на верхней крышке реактора

под углом 20° к его оси. После самовоспламенения фтор-аммиачной пары, включали подачу O_2 и CH_4 или H_2 и после фиксации наличия факела включали подачу ОГФУ. Расход фтора составлял величину порядка 0.5 масс. % от расхода UF_6, расход аммиака рассчитывали по стехиометрическому уравнению.

Ранее для описания процесса (2) была разработана в программном комплексе «Ansys Fluent 2019 R3» и верифицирована математическая модель, в которой для расчета скорости химической реакции использовали модель дробления вихрей, в которой скорость реакции определяется только скоростью турбулентного перемешивания и концентрациями реагентов [2]. При использовании этой модели не требуется наличие инициатора процесса горения.

Однако несмотря на то, что диффузионная модель хорошо зарекомендовала себя при проведении инженерных оценок состояния реактора, стабильность формирования факела и его устойчивость при использовании данной модели оценить невозможно.

В настоящей работе приведены результаты численного моделирования процесса взаимодействия гексафторида урана с водородсодержащими веществами и кислородом, в котором для описания скорости химических реакций диффузионную модель заменили на кинетические модели окисления водородсодержащих веществ кислородом и гидролиза гексафторида урана, а инициирующий фтор-аммиачный факел моделировали на основе литературных данных по кинетике фторирования аммиака фтором.

На основе разработанной модели построены поля концентраций радикалов факела NH_3-F_2 и поля радикалов в факеле UF_6-O_2-CH_4/H_2 в условиях, моделирующих проведение физического эксперимента. Показано, что поля радикалов фтора, генерированных в инициирующем факеле, и поля радикалов CHF_3 и других пересекаются в основном факеле, что свидетельствует о генерации цепных процессов в основном факеле радикалами фтора из инициирующего факела, что приводит к стабилизации горения в основном факеле. При отключении факела NH_3-F_2 основной факел отрывается от кратера форсунки и вытесняется из реактора потоком исходных веществ.

Моделирование осуществлялось с использованием ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (scc.spbstu.ru).

[1] Пашкевич Д.С., 2025, ИФЖ. **98.** 154-162.
[2] Федорова Т.А., 2025, ИФЖ. **98.** 145-153.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ЗАРЯДА ТВЁРДОГО ТОПЛИВА С ПОМОЩЬЮ УРАВНЕНИЯ ЭЙКОНАЛА

Часовской А.П.[1, @], Рощин А.С.[1]
[1] *Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский Центр имени М.В. Келдыша», Москва, Россия.*
[@] *chasovskoi.ap@phystech.edu*

1 Введение

Для моделирования рабочих характеристик ракетного двигателя на твёрдом топливе (РДТТ) ключевое значение имеет расчёт эволюции поверхности горения заряда во времени. Именно геометрия горящего свода определяет динамику внутрикамерных процессов. Задача осложняется зависимостью скорости горения от давления в камере, влиянием эрозионных эффектов, а также возможной неоднородностью свойств топливной смеси по объёму. Цель настоящей работы заключается в разработке метода моделирования, способного с высокой точностью воспроизводить внутрибаллистические процессы в РДТТ, что позволит существенно сократить временные и ресурсные затраты на этапах проектирования и экспериментальной отработки двигателей.

Изменение площади горящей поверхности и течение продуктов сгорания представляют собой два тесно связанных, взаимообусловленных процесса. Здесь возникает петля положительной обратной связи: скорость горения зависит от текущего давления в камере, которое, в свою очередь, определяется величиной массового расхода газов. Расход же напрямую зависит от площади горящей поверхности, меняющейся пропорционально скорости горения. Таким образом, система замыкается в самоподдерживающийся цикл. Учитывая значительное различие характерных временных масштабов этих явлений, в работе обоснованно применяется метод раздельного поэтапного расчёта.

2 Моделирование горения

При моделировании этапа горения ТТ используется дискретное представление заряда. Для отслеживания фронта пламени применяется уравнение эйконала, описанное в работе [1], суть которого состоит в нахождении функции расстояния для каждой точки тела, с учетом положительно определенной функции скорости перемещения.

Область решения аппроксимируется неструктурированной сеткой, применение которой позволяет точнее представить форму заряда. Решение уравнения эйконала производится на основании метода

быстрых итераций FIM [2]. Реализованный алгоритм в отличие от FIM использует иной метод нахождения локального решения эйконала, заключающийся в решении задачи оптимизации в каждой ячейке. Для этого используется методы поиска квадратичной аппроксимацией и алгоритм Бройдена — Флетчера — Гольдфарба — Шанно, описанный в статье [3].

В рамках принятой модели предполагается, что закон горения топлива $f(x)$ известен и задан свойствами используемой рецептуры. Прогрев твёрдотопливного заряда в процессе работы двигателя во внимание не принимается. Анализ напряжённо-деформированного состояния конструкции, а также явления неустойчивости горения и акустических колебаний в камере сгорания выходят за пределы рассматриваемой задачи и не учитываются.

Для расчета течения в газовом тракте используется двухстадийное решение, продукты сгорания рассматриваются как идеальный газ. Сначала вычисляется поверхность горения в трехмерной постановке, затем с помощью одномерного решателя газовой динамики, определяются динамические параметры в процессе работы двигателя, за каждый шаг решения уравнения эйконала, для подстановки в зависимости скорости горения.

3 Заключение

Научная новизна данной работы заключается в комплексном подходе к моделированию процессов горения в РДТТ с учетом влияния давления на скорость горения и динамики горящей поверхности. Предложена методология, позволяющая одновременно учитывать газовую динамику и термодинамические процессы, что позволяет точно моделировать процесс работы твердотопливных двигателей. Результатом расчёта являются эквидистантные поверхности горения заряда и баллистические параметры двигателя. Численный расчет позволит ускорить и удешевить конструирование РДТТ, проектирование заряда твердого топлива.

[1] Osher S., Sethian J., 1988, J. of computational physics. V. 79., P. 12-49.

[2] Fu Z., Kirby R., Whitaker R., 2013, SIAM J. on Scientific Computing., V. 35., P. 473-494.

[3] Tankaria H., Sugimoto S., Yamashita N., 2021, J. of Computational Optimization and Applications., V. 82., P. 61-88.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПОРОХОВ В ПРОГРАММНОМ МОДУЛЕ «ЛОГОС ПРОЧНОСТЬ» ПАКЕТА ПРОГРАММ «ЛОГОС»

Ширшова М.О. [@], Володина Н.А., Краюхин С.А., Забусов П.В., Воронков Р.А., Князев В.Н., Трунова З.Д.
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.
moshirshova@vniief.ru

Целью данной работы является разработка модели горения порохового заряда в программном модуле «Логос Прочность» пакета программ «Логос» [1]. Для этого, в рамках прогрммного модуля решения высоконелинейных динамических задач прочности с использованием неподвижных неструктурированных сеток [2], разработана эмпирическая математическая модель горения пороха на основе геометрического закона горения (закон Вьеля) [3].

Разработанная модель позволяет пользователю в табличном виде задавать различные зависимости, описывающие геометрический закон горения порохового зерна, а также зависимость скорости горения пороха от давления в обобщенном виде. Таким образом разработанная модель может быть применима как для порохов с дегрессивными формами горения, так и порохов с прогрессивными (горящие с увеличением площади горения) и более сложной формой зерна (комбинированной, когда часть пороха сгорает прогрессивно, а остаток горит дегрессивнто).

[1] Пакет программ «Логос» [Электронный ресурс]: - режим доступа: http://logos.vniief.ru/products/logos.

[2] Володина Н.А., Голомидов Ф.О., Дьянов В.Ю., Наумова Е.И., Резвова Т.В., Тихонова А.П., Трунова З.Д., Уразов П.В., Циберев К.В., Ширшова М.О., Шувалова Е.В. Решение высоконелинейных динамических задач прочности с использованием неподвижных сеток в пакете программ «Логос» // Сборник научных трудов XIX Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование», 2024 г.

[3] Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет: учебник для вузов. М.Е. Серебряков. Москва: Оборонгиз. 1962. 3-е изд.

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ГАЗОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ ПОРОШКООБРАЗНОГО МАГНИЯ В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

Ягодников Д.А.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, daj@bmstu.ru

Порошкообразные металлы и окислители широко применяются в различных областях техники, в том числе как добавки к пиротехническим составам для фейерверков. Среди порошкообразных металлов для реактивных двигателей, использующих в качестве забортного окислителя воздух, воду или углекислый газ можно рассматривать бор, алюминий, магний и их химические соединения в виде, например, полиборидов алюминия и магния. [1]. В данной работе проводится анализ применения и разработка вероятностных методов моделирования процессов воспламенения и горения газодисперсных систем. При создании математических моделей горения частиц порошкообразных горючих необходим единый теоретический подход, пригодный для всех режимов течения (ламинарный или турбулентный) применительно к моно- или полидисперсным ансамблям частиц и удовлетворяющий следующим требованиям:

- учет влияния турбулентных пульсаций на интегральные и осредненные значения скоростей химических реакций и тепловых потоков;
- отражение реального полидисперсного распределения частиц горючего по размеру, скоростям и температуре с учетом отличия скоростей газа и частиц;
- описание кинетического или диффузионного режима взаимодействия частиц с окислительной средой при различных начальных условиях;
- контроль за состоянием оксидной пленки на частицах с произвольными значениями температуры и радиуса.

Для решения этих задач необходимо принимать во внимание большое количество изменяющихся и взаимосвязанных термо- и газодинамических параметров газовой и дисперсной фаз. Наиболее полно такой учет возможно осуществить с использованием аппарата статистической физики и, в частности, функции P плотности распределения вероятности (ПРВ) [2]. Показано, что в качестве независимых переменных функции ПРВ целесообразно выбирать температуру $T_к$, радиус $r_к$, скорость $u_к$ частиц и толщину оксидной

пленки $\delta_к$ на их поверхности, поскольку эти параметры оказывает значительное влияние на характеристики воспламенения и горения всей системы в целом. Тогда эволюционное уравнение ПРВ в случае использования первых трех параметров в одномерной нестационарной постановке может быть записано в виде

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial u_к P}{\partial x} + \frac{\partial F_к P}{\partial u_к} + \frac{\partial F \omega_к P}{\partial T_к} + \frac{\partial f_к P}{\partial r_к} + \frac{\partial \psi_к P}{\partial \delta_к} = W,$$

где $\omega_к$, $f_к$, $\psi_к$ - скорости изменения температуры и радиуса частицы; $F_к$- ускорение частицы, W- источниковый член, описывающий процессы коагуляции и дробления частиц. Для описания состояния газовой фазы могут использоваться различные модели турбулентности, например, однопараметрическая или k-ε. При этом становится реальным более корректно учесть влияние пульсаций различных параметров на значения скоростей химических реакций и тепловыделения, что достигается интегрированием зависимостей скоростей реагирования и нагрева отдельных частиц во всем диапазоне возможных значений аргументов функции ПРВ.

Использование вероятностного подхода дает возможность рассчитывать по функции ПРВ осредненные и пульсационные характеристики дисперсной фазы, позволяющие изучить закономерности межфазного взаимодействия и эволюцию начальных распределений частиц.

В качестве объекта моделирования рассмотрены процессы воспламенения и горения совокупности частиц магния в углекислом газе, что представляет фундаментальную научную и практическую задачу при обосновании возможности разработки и эффективности применения порошкообразного магния как самостоятельного горючего средного прямоточного реактивного двигателя (СПРД), функционирующего в атмосфере планет земной группы.

На основе рассмотрения результатов моделирования влияния начальных условий на интегральные (скорость горения, полнота сгорания топлива) и пульсационные (среднеквадратические отклонения, коэффициенты корреляции) характеристики горения моно- и полидисперсных газовзвесей показаны основные преимущества вероятностных методов расчета.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ по проекту №26-19-00442.

Литература

1. Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей. Справочник / Под ред. Л.С. Яновского. М.: Физматлит, 2008. 400 с.

2. Ягодников Д.А. Горение порошкообразных металлов в газодисперсных средах- – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 218.- 444 с.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ФРОНТА ГОРЕНИЯ ОБЕДНЕННЫХ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

Яковенко И.С.[1,@]
[1]*ОИВТ РАН*
[@] yakovenko.ivan@bk.ru

В работе методами численного моделирования исследуются особенности развития неустойчивости фронта пламени в обеднённых водородно-воздушных смесях, инициированной начальным возмущением малой амплитуды. Результаты получены как с применением традиционного подхода на основе приближения малых чисел Маха, так и с использованием современного бездиссипативного метода вычислительной газодинамики «КАБАРЕ», позволяющего с высокой точностью воспроизводить динамику малых возмущений фронта горения. Проведено сопоставление результатов моделирования плоского и расходящегося фронтов пламени; получены дисперсионные кривые, характеризующие динамику развития возмущений фронта. Показан переход к абсолютной устойчивости фронта горения в смесях с содержанием водорода около 10 об. %. Исследованы закономерности формирования пространственной структуры фронта при начальных возмущениях конечной амплитуды, масштаб которых сопоставим с шириной фронта горения. Показано, что при задании начальных возмущений с амплитудой равной или превышающей ширину фронта пламени, начальная линейная стадия изменения амплитуды отсутствует, а эволюция фронта сразу определяется нелинейными эффектами. Полученные результаты позволяют выявить влияние геометрии фронта и амплитуды начального возмущения на переход от неустойчивого к устойчивому режиму распространения пламени в обеднённых водородно-воздушных смесях.

Эксперименты и модель распространения ячеистого пламени в канале Хеле-Шоу

Якуш С.Е.[1,@], Рашковский С.А.[1,2], Алексеев М.М.[3], Семенов О.Ю.[3]
[1] *Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва*
[2]*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*
[3]*Сургутский государственный университет, Сургут*
[@] yakush@ipmnet.ru

Распространение пламени в узком пространстве между двумя близко расположенными пластинами (ячейка Хеле-Шоу) представляет фундаментальный интерес, поскольку позволяет исследовать гидродинамическую и тепло-диффузионную неустойчивость, ячеистую структуру и динамику пламени [1, 2]. В работе представлены экспериментальные и теоретические результаты по предварительно перемешанным метано- и пропановоздушным пламенам, включая смеси с добавлением водорода. Каналы были образованы двумя стеклянными пластинами с расходящимися боковыми стенками, зажигание осуществлялось у закрытого узкого конца канала.

Динамика и структура фронта пламени регистрировалась методом скоростной видеосъемки с последующей обработкой изображений. Для пропановоздушного стехиометрического пламени в канале Хеле-Шоу с прямолинейными расходящимися боковыми границами получены статистические характеристики ансамбля ячеек на фронте пламени, включая ширину ячейки (расстояние между угловыми точками), ее амплитуду (максимальный прогиб относительно хорды), скошенность (меру асимметрии), время жизни до поглощения соседними ячейками или деления [2].

Показано, что наблюдаемая форма ячеек с высокой точностью может быть аппроксимирована параболой, повернутой относительно своей хорды. Используя статистические зависимости, найденные в экспериментах, сформулирована динамическая модель распространения фронта ячеистого пламени, основанная на лагранжевом описании движения угловых точек фронта, соединенных ячейками параболической формы. Скорость движения угловых точек фронта определяется по принципу Гюйгенса в зависимости от формы ячеек, сходящихся в каждой точке. Кроме того, эмпирически учитывается взаимное притяжение угловых точек, порождаемое их гидродинамическим взаимодействием, обратно пропорциональное квадрату длины хорды ячейки.

Ключевым элементом модели является стохастическое описание деления ячеек, заключающееся в появлении новых угловых точек на фронте с вероятностью, зависящей от размера ячейки. Таким образом, в процессе эволюции фронта реализуется как его трансформация по принципу Гюйгенса, так и исчезновение ячеек при слиянии сближающихся угловых точек и рождение новых ячеек путем деления. Эти процессы протекают одновременно, обуславливая статистические свойства ячеистого пламени в целом. Кроме того, в модель введен учет глобальной скорости газа в канале, обусловленный расширением газа при горении и его дальнейшим сжатием при остывании вследствие теплопотерь в стенки канала Хеле-Шоу.

Проведенные расчеты показали, что модель правильно предсказывает качественный вид распространяющегося фронта как динамической системы ячеек, а также важнейшие характеристики ансамбля ячеек, реализующиеся за все время прохождения фронта – функцию распределения ячеек по размерам (гамма-распределение), время жизни ячейки до деления (закон радиоактивного распада), степень искривленности фронта (отношение истинной длины фронта к длине ломаной, соединяющей угловые точки). Принятая в модели схема деления и образования ячеек, а также полученная в расчетах форма фронта ячеистого пламени и траектории движения угловых точек показаны на рис. 1. Как общая рассчитанная эволюция, так и полученные количественные характеристики ячеистого пламени хорошо совпадают с экспериментальными данными [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.

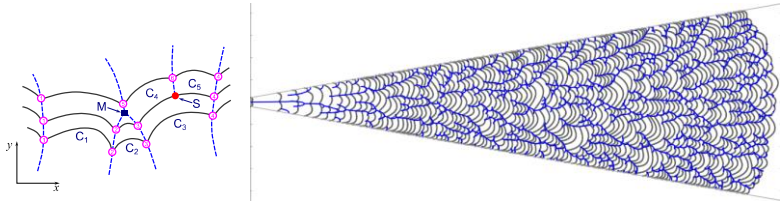


Рис.1 Схема движения угловых точек, слияния и деления ячеек (слева), результаты расчета распространения пропановоздушного пламени в диффузоре (справа)

[1] Joulin G., Sivashinsky G.I., 1994, Comb. Sci. Techn. **98.** 11–23.
[2] Rashkovskiy S.A., Yakush S.E., Alexeev M.M., Semenov O.Yu., 2026, Phys. Fluids, **38**. 088123.

СУБМИКРОСЕКУНДНАЯ 16-ТИ КАДРОВАЯ ВИДЕОКАМЕРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРЫХ ПРОЦЕССОВ

Бородин Д.В., Осипов Ю.В.
ООО "РТК Инпекс", Мытищи, РФ; rtcinpex@mail.ru

Для регистрации быстропротекающих процессов как правило используют камеры на основе КМОП фотоматриц с «окном интереса», уменьшая время чтения кадра за счет уменьшения его формата. Например, камеры EVERCAM для формата изображения 320×240 пикселей обеспечивают 12200 кадров/с. Количество кадров ограничивается памятью камеры.

Другой принцип регистрации – быстрая запись ограниченного количества кадров в самой фотоматрице с последующим выводом. Так камера Shimadzu HyperVision HPV-X2 позволяет регистрировать 128 кадров размером в 100 000 пикселей со скоростью до 10 Mfps.

Основой такой камеры является специализированная высокоскоростная КМОП фотоматрица.

Нами разработана КМОП фотоматрица формата 300×300 ячеек, позволяющая регистрировать 16 кадров изображения с субмикросекундными экспозициями и интервалами между кадрами. На ее основе разработана камера. Реализован ждущий режим запуска записи по внешнему сигналу начала регистрируемого процесса с 8-ю вариантами кадровой частоты, одинаковыми временами экспозиции и интервалами между экспозициями каждого из 16-ти кадров.

Параметры видеокамеры:

- Период кадров - в диапазоне от 200 нс до 820 мкс.
- Длительности экспозиции каждого кадра в интервале от 100 нс до 410 мкс.
- Время, в течение которого регистрируются 16 кадров: от 3,2 мкс до 13 мс.

На рис.1 показана зависимость сигнала в кадрах с 1-го по 16-тый от задержки импульса света относительно времени начала регистрации процесса. Длительность импульса света ~0,8 мкс. Длительность всего процесса регистрации – 25,6 мкс, время экспозиции каждого кадра 0,8 мкс.

На рис.2 приведена зависимость сигнала в одном из кадров от задержки светового импульса относительно времени экспозиции кадра. Длительность экспозиции кадра 0,8 мкс, импульса управления светодиодом 0,4 мкс и 0,2 мкс (реальное время высвечивания ~ 0,6 мкс и 0,4 мкс).

При экспозиции кадра 6,4 мкс, уменьшение длительности светового импульса дает монотонное уменьшение сигнала, что показано на рис.3.

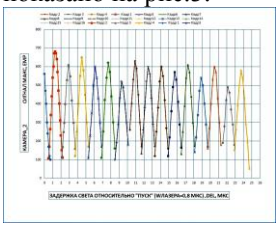


Рис.1



Рис.2

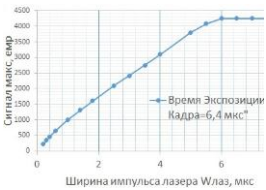


Рис.3



Рис.4.

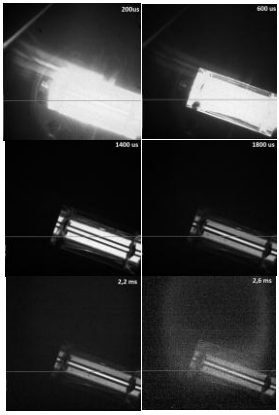


Рис.5.

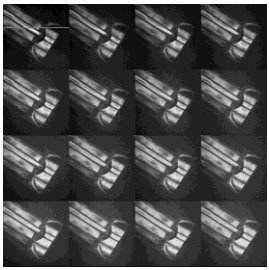


Рис.6.

На рис.4 приведены 16 кадров вращающегося вентилятора (частота 200 об/сек). Экспозиция каждого кадра 13 мкс, общее время регистрации 16 кадров - 410 мкс.

На рис.5 показаны первые 6 кадров разряда в газовой трубке. Экспозиция кадра 200 мкс.

На рис.6 - первые 25 мкс разряда фотовспышки. Экспозиция каждого кадра 800 нс, общее время регистрации 16 кадров - 25 мкс.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПАРОКИСЛОРОДНОГО РИФОРМИНГА МЕТАНА

Воронин А.В.[1,@], Иванов Д.В.[1], Усачёв В.Б.[1]
[1]*АО «НИИ НПО «ЛУЧ» Протвинский филиал*
[@] voral77@yandex.ru

АО «НИИ НПО «Луч» участвует в разработке химико-технологической части (ХТЧ) атомной энерготехнологической станции. Основной узел ХТЧ - блок конверсии природного газа, предназначенный для получения водорода методом паровой конверсии метана. Для проведения паровой конверсии метана используется энергия разных источников. Существенный энергетический вклад в проведении реакции происходит в реакторе парокислородной конверсии.

При отсутствии единой или нормативной методики расчёта данного аппарата было принято решение о разработке собственной расчётной модели протекающих внутри аппарата процессов. Расчётная модель была создана на основе программного пакета OpenFOAM. Проведена верификация расчётной модели с другими расчётными кодами, показавшая хорошую сходимость модели и адекватность получаемых результатов. Проведена валидация модели на результатах работы опытных реакторов по исследованию горения чистой пар метановой смеси.

Для более точной валидации модели с учётом более сложного состава конвертированного газа на входе в реактор, а также для исследования особенностей схем смешения в смесительных устройствах разных конструкций, принято решение о создании установки – «химико технологического эталонного модуля», основное предназначение которого получение экспериментальных данных о работе смесителя (горелки) в газо-фазной зоне протекания реакции.

Проведён предварительный расчёт работы исследовательского реактора с тремя типа смесительных устройств. В ходе технического проектирования решены вопросы создания системы наблюдения за зоной горения, отобраны приборы кип для фиксации параметров реакции в зоне горения.

САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ СТРУИ ВОДОРОДА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ИСТЕЧЕНИИ В ПОЛУОТКРЫТОЕ ПРОСТРАНСТВО

Головастов С.В. [1,@], Володин В.В.[1], Ельянов А.Е.[1], Бочарников В.М.[1], Микушкин А.Ю.[1], Анисимов В.М.[1], Киверин А.Д.[1,2], Голуб В.В.[1]

[1]*Объединённый институт высоких температур РАН*

[2]*Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН*

[@] golovastov@yandex.ru

Импульсное истечение сжатого водорода в воздух приводит к формированию ударной волны. Формируемая таким образом ударная волна может вызвать самовоспламенение струи водорода на контактной поверхности с окружающим воздухом. При истечении в полуоткрытое пространство условия, приводящие к самовоспламенения водорода, выполняются при давлениях, значительно превышающие значения, характерные при истечении водорода в ограниченный канал. В данной работе изучалось влияние начального давления водорода в сосуде высокого давления и диаметра отверстия, через которое истекал водород, на возможность его самовоспламенения.

В результате проведения экспериментов определены давления на фронте формируемой ударной волны. С помощью теневого метода со светоотражающим экраном определена ударно-волновая структура течения при разрыве диафрагмы. С использованием скоростной регистрации определена динамика очагов самовоспламенения водорода.

Показано, что при истечении водорода под давление ниже 270 атм самовоспламенение не возникает. При давлении от 270 до 500 атм формируется очаг воспламенения, который через 100-200 мкс гаснет. При более высоких давлениях формируется факельное горение струи водорода, истекающей из сосуда.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2024-543 от 24.04.2024.

Скоростная визуализация горения высокоэнергетических материалов и автоматизированный анализ изображений

Губарев Ф.А.[1,@], Давыдова Л.Ю.[1], Мостовщиков А.В.[2], Ли Л.[3]
[1]*Севастопольский государственный университет*
[2]*Томский политехнический университет*
[3]*Ляонинский технический университет*
[@] fagubarev@sevsu.ru

Высокотемпературное горение металлических нанопорошков и их смесей широко используется для решения задач синтеза материалов, локального нагрева, получения энергии в результате взрыва, а также для создания оптических и акустических эффектов [1]. Скоростная визуализация является одним из наиболее мощных инструментов для изучения механизмов различных взаимодействий, характеризующих определенные компоненты процесса. Горение высокоэнергетических материалов (ВЭМ) на основе нано- и микропорошков металлов происходит при высокой температуре с интенсивным выделением теплоты, которое сопровождается ярким свечением и разлетом продуктов сгорания [1], что существенно ограничивает возможности скоростной визуализации. При воспламенении ВЭМ лазерным источником также имеет место интенсивная засветка в локальной области инициирования.

Проблема наблюдения поверхности горящих материалов через пламя может быть решена с помощью лазерных оптических систем с усилением яркости [2]. Несмотря на то, что лазерный мониторинг позволяет фиксировать информацию о поверхности сквозь высокотемпературный слой плазмы, полученные изображения искажаются неравномерным гауссовым профилем излучения усилителя яркости, значительным спекл-шумом и интерференцией лазерного излучения на неровностях поверхности образца, что ограничивает как визуализацию материалов, так и быстрое определение параметров процессов [3]. Для решения этой проблемы предлагается использовать аппаратно-программный лазерный комплекс с усилением яркости, скоростной видеорегистрацией и последующей цифровой обработкой изображений.

В данной работе использован метод обработки изображений, включающий интеграцию вейвлет-преобразования и адаптивной нелокальной фильтрации, который улучшил качество изображений лазерного монитора и позволил визуализировать процесс горения с высоким отношением сигнал/шум и высоким контрастом, что важно для определения границ продуктов сгорания. Разработан автоматизированный метод обработки изображений, позволяющий определять скорость и направление распространения фронта горения по поверхности материала, идентифицировать форму и вычислять площадь образовавшихся продуктов.

В докладе рассмотрены различные варианты реализации систем лазерного мониторинга для исследования горения ВЭМ. Приведены результаты тестирования разработанной методики обработки изображений при визуализации горения нанопорошка алюминия и термитных смесей $Al+Fe_3O_4$ и $Al+MnO_2$.

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

[2] Gubarev F.A., Mostovshchikov A.V., Li L., 2023, Opt. Laser Technol. **159**. 108981.

[3] Li L., Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Antipov P.A., Shiyanov D.V., Gubarev F.A., 2021, Proc. Combust. Inst. **38**. 1695-1702

СПОСОБЫ УВЕЛИЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ БАЗЫ РЕГИСТРАЦИИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА

Калашников Д.А., Финюшин С.А., Фёдоров А.В., Чудаков Е.А., Гнутов И.С., Гогин И.И.

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия, dakalashnikov@vniief.ru

Экспериментальный метод квазинепрерывной лазерной регистрации перемещения отражающих поверхностей [1], [2] позволяет осуществлять исследования быстропротекающих процессов с помощью прецизионной регистрации координат исследуемых объектов. Показана возможность получения с его помощью экспериментальной информации о перемещении поверхностей различного структурного характера: сплошной и фрагментированный материал, струйные течения, пылевые потоки частиц [3], [4]. Однако согласно подтверждённым техническим характеристикам предельная база регистрации комплекса составляет 20 мм, что существенно ограничивает применение соответствующей методики измерений. В настоящей работе рассматриваются способы увеличения указанного значения с помощью модификации используемой оптической схемы лазерного дальномера, а также приводятся результаты серии экспериментов по подтверждению эффективности предложенных технических решений.

На первом этапе исследований модификация комплекса лазерного дальномера осуществлялась в части совершенствования дисперсионных элементов – блоков оптической схемы, отвечающих за уширение фемтосекундных лазерных импульсов. Одной из целей настоящей работы являлось исследование возможности использования по указанному назначению специализированных оптических блоков – модулей компенсации дисперсии. Предложенное решение позволило зарегистрировать перемещение зондируемых объектов на расстояние в 121 мм относительно начального положения.

Альтернативным способом увеличения максимальной базы регистрации является модификация оптической схемы с добавлением в участок опорного плеча интерферометра дополнительной ветви, увеличенной по длине относительно основного участка. Указанное решение тестировалось в серии опытов. Модернизированная схема позволила зарегистрировать перемещение исследуемой поверхности на расстояние в 115 мм относительно начального положения.

Список литературы

1. Xia H. and Zhang C. Ultrafast and Doppler-free femtosecond optical ranging based on dispersive frequencymodulated interferometry // Opt. Express. – 2010. – 18 (5). – P. 4118-4129.
2. La Lone, B.M. Simultaneous broadband laser ranging and photonic Doppler velocimetry for dynamic compression experiments / B.M. La Lone, B.R. Marshall, E.K. Miller, G.D. Stevens, W.D. Turley, and L.R. Veeser // Rev. Sci. Instrum. – 2015. – Vol. 86. – P. 023112-1–023112-7.
3. Калашников Д.А., Финюшин С.А., Фёдоров А.В., Чудаков Е.А., Гнутов И.С., Шмелев И.В., Разумков Е.А. Исследование свойств ударно нагруженных металлов с помощью одновременной лазерной диагностики скорости и перемещения зондируемой поверхности // Материалы IX Международной конференции Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике. – Новосибирск, 2020. – с. 183.
4. Калашников Д.А., Ерунов С.В., Финюшин С.А., Фёдоров А.В., Чудаков Е.А., Разумков, Чернов Л.В. Одновременное использование методов гетеродин-интерферометра и лазерного дальномера для регистрации параметров ударно-индуцированного пылевого потока. Журнал «Физика горения и взрыва», т. 60, №6, стр. 58-66. 2024 г.

КОМПЛЕКС МЕТОДОВ ПРОНИКАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭУ ПРИ ОСИ

Кондрашов Д.А., Ефимов В.Г., Финажин А.В., Охотникова А.Н., Хохлов Р.О., Курбатов А.В., Певченко Б.В.

Акционерное общество «Федеральный научно-производственный центр «Алтай»

Г. Бийск, Российская Федерация, post@frpc-altay.ru

Современные энергетические установки (ЭУ), являясь технически сложными и дорогостоящими изделиями, требуют высокого качества проектных работ, большого объема и точности измерений при испытаниях. Обеспечение приоритетных направлений при создании и отработке ЭУ связано с необходимостью применения экспериментальных высокоинформативных методов исследования внутрикамерных процессов, которые проявляются при огневых стендовых испытаниях (ОСИ) через изменение конфигурации элементов ЭУ.

Долгое время оставалась нерешенной проблема создания методической, технической и программной базы для количественного изучения внутрикамерных процессов. Авторам удалось разработать и изготовить опытный образец (ОО) испытательного стенда наземной экспериментальной отработки ЭУ с одновременным применением комплекса методов проникающих излучений.

ОО испытательного стенда, смонтированный на территории опытно-испытательных станций АО «ФНПЦ «Алтай», состоит из трех систем (радиационной визуализации, ультразвуковой и сверхвысокочастотной), предназначен для исследования внутрикамерных процессов в натурных и модельных ЭУ с целью определения текущих координат горящих сводов при ОСИ с последующим определением скорости перемещения фронта горения и оценки деформаций конструктивных элементов ЭУ.

В результате проведения предварительных испытаний ОО испытательного стенда были определены координаты перемещения фронта горения, рассчитана скорость горения. При этом были достигнуты погрешности: для натурных ЭУ диаметром до 1,5 м – 4,8 % системой ультразвуковой, 3,9 % СВЧ-системой, 2,4 % системой радиационной визуализации; для модельных ЭУ диаметром до 0,4 м – 3,2 % системой ультразвуковой, 0,8 % СВЧ-системой, 1,0 % системой радиационной визуализации.

Эффективность работы заключается в получении достоверной информации о внутреннем состоянии ЭУ, направленной на сокращение затрат и снижении длительности разработки изделий ракетно-космической техники на этапе наземной отработки перспективных конструкций ЭУ.

ОЦЕНКА НОРМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ УЛЬТРА-БЕДНЫХ СМЕСЕЙ ВОДОРОД-ВОЗДУХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВСПЛЫВАЮЩЕГО ПЛАМЕНИ

Медведев С.П.[@], Агафонов Г.Л., Андержанов Э.К., Бетев А.С., Иванцов А.Н., Тереза А.М., Хомик С.В.
ФИЦ химической физики им. Н.Н.Семёнова РАН, Москва, РФ
[@] medvedevlab@yandex.ru

Нормальная (ламинарная) скорость пламени S_L является одной из фундаментальных характеристик горючих газовых смесей, используемых для оценки потенциальной опасности при их воспламенении и описания режимов гомогенного турбулентного горения, включая гашение пламени. Особый интерес в связи с проблемами взрывобезопасности представляют ультра-бедные смеси водород–воздух с содержанием H_2 от 4% до 9%, т.е. вблизи нижнего концентрационного предела воспламенения. Анализ имеющейся литературы показывает, что для этого диапазона отсутствуют надежные сведения о величинах S_L. Это связано с изменением геометрии пламени при низких концентрациях водорода. В поле тяжести свободно распространяющееся пламя приобретает вид всплывающей полусферы, а в горизонтальном канале не имеет плоского фронта.

В данной работе предложен подход, позволяющий учесть влияние подъемной силы и оценить параметр S_L на основе результатов измерения видимой скорости V_f всплывающего пламени с помощью визуализации теневой картины течения или инфракрасной съемки. Эксперименты проведены в сферической камере сгорания диаметром 170 мм. Величина S_L рассчитывалась из соотношения $V_f=V_b+\sigma S_L$, где σ - степень расширения, V_b – составляющая скорости, обусловленная конвекцией в поле тяжести. При этом предполагалось $V_f=V_b$ для предельной концентрации около 4.5%H_2, при которой еще возможны измерения распространяющего фронта пламени. В результате обработки собственных, а также имеющихся в литературе данных в диапазоне концентрации H_2 до 9% получена линейная зависимость S_L(м/с)=0.014H_2(%)-0.056. В работе обсуждается влияние эффектов растяжения пламени и возможность описания результатов с помощью модифицированных кинетических механизмов.

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К УДАРУ

Мееров Д.Б.[1, @], Моногаров К.А.[1], Назарова А.А.[1], Крыкин М.Д.[1], Пивкина А.Н.[1], Фоменков И.В.[2]
[1]*ФИЦ ХФ РАН, Москва*
[2]*ИОХ РАН, Москва*
[@] mmeerov@mail.ru

Чувствительность энергетических материалов (ЭМ) к механическим воздействиям (удар и трение) является одним из основных параметров, определяющих возможность и условия безопасного обращения с ЭМ. Среди факторов, влияющих на чувствительность к удару, важную роль играют параметры образца, включающие размер частиц и массу тестируемой навески.

В работе исследована зависимость чувствительности к удару, полученная при испытаниях на копре типа ВАМ порошков перхлората аммония (ПХА) и его инертного имитатора (NaCl) от размера частиц и массы навески. Исходный ПХА был перекристаллизован и измельчен в планетарной шаровой мельнице с целью получения трех фракций порошка ПХА: К (D_{43} = 583 ± 2 мкм), С (109 ± 2 мкм) и М (10 ± 1 мкм). Аналогичным образом получены три идентичные по размеру фракции NaCl. Масса навески при испытаниях варьировалась от 10 до 60 мг.

Эксперименты с частицами NaCl показали, что чем меньше размер частиц, тем большая энергия падающего груза необходима для их разрушения, подтвердив хорошо известное экспериментальное наблюдение [1, 2].

На основе ранее разработанной авторами статьи методики определения энергетического баланса при испытании ЭМ на чувствительность к удару [3] установлены значения поглощаемой и передаваемой образцу ПХА энергии при 50% вероятности взрыва. Оказалось, что поглощаемая образцами энергия в среднем не зависит от размера частиц ПХА, а величина передаваемой образцу энергии для порошков ПХА крупной фракции К в 3,5 раза ниже, чем для мелкого порошка фракции М и не зависит от массы навески. Чувствительность образца промежуточной по размерам частиц фракции С изменяется в широком диапазоне, ограниченном чувствительностью крупного и мелкого ПХА.

Роль механических факторов при ударном нагружении исследована на примере анализа размера частиц ПХА, претерпевших ударное воздействие при энергии, соответствующей 50% вероятности

взрыва, но не прореагировавших. Установлено, что частицы крупной и средней фракций после ударного воздействия значительно разрушаются, в то время как размер частиц мелкой фракции практически не изменяется.

Сделан вывод о том, что наблюдаемая зависимость чувствительности к удару от размера частиц ПХА в значительной степени обусловлена процессами механического разрушения частиц.

[1] Афанасьев Г.Т., Боболев В.К., 1968, Наука, 172.
[2] Craig M. Tarver, Steven K. Chidester, and Albert L. Nichols, 1996, J. Phys. Chem., 100, 5794-5799.
[3] Моногаров К.А., Муравьёв Н.В., Мееров Д.Б., 2023, Горение и Взрыв. Т16, №2, 103-111.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЗОНЫ РЕАКЦИИ ТЕРМИТНОЙ СМЕСИ Al/CuO

Янковский Б.Д.[1], Арсёнов П.А.[1], Вакорина Г.С.[1], Гехт[2] М.Э., Долгобородов А.Ю.[1,3]

[1]*Объединенный институт высоких температур РАН*

[2]*МГТУ им Н.Э.Баумана*

[3]*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН*

[@] yiy2004@mail.ru

На основе регистрации электротехнических и оптических проявлений процесса горения линейных зарядов с односторонним инициированием сформулированы макрокинетические представления о распространении реакции 2Al+3CuO в пористой (50-60%) смеси. Смесь приготавливали посредством перемешивания и механической активации исходных порошков в шаровых мельницах. Формирование линейных зарядов насыпной плотности осуществляли порционной засыпкой смеси в цилиндрические каналы диаметром 2-5 мм на оси текстолитовых стержней (рис.). Один из торцов канала, как правило, оставляли открытым. Инициирование реакции в смеси осуществляли при электроискровом энерговыделении 48-115 мДж в течение 0,3-0,7 мкс. В экспериментах изменяли расположение точек измерения относительно точки инициирования заряда.

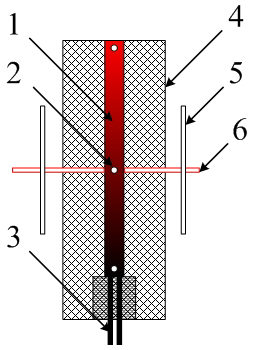


Рис.1. Схема экспериментальной сборки:
1 – заряд смеси;
2 – световоды;
3 – электроды электроискрового инициирования;
4 – текстолитовый корпус;
5 – электроды внешнего поля;
6 – контрольные электроды.

Скорость распространения реакции, по данным регистрации оптического излучения во всей серии экспериментов, дала разные значения в диапазоне 31-69 м/с.

Кроме того, регистрация моментов появления оптического излучения в диаметрально расположенных точках каждого сечения позволила констатировать неравномерность протекания реакции по сечению пористой структуры заряда.

Электрическую историю зоны реакции отслеживали во внешнем электрическом поле (~1÷3 В/мм) с помощью цилиндрических электродов (1,5 мм), размещаемых в противоположных отверстиях канала в одном его сечении. Электроды подключали либо непосредственно к сопротивлению 0,1 Ом либо к высокоомному входу осциллографа через кабель 1,5 м, либо к заряженному (~10 В) конденсатору. В режиме высокоомной нагрузки зафиксирован рост напряжения на электродах с увеличением напряженности внешнего электрического поля. В режиме низкоомной нагрузки на электродах зафиксировано хаотическое поведение напряжения, не повторяющееся от эксперимента к эксперименту. Зона реакции при разряде через нее заряженного конденсатора в присутствии внешнего электрического поля обладала меньшей удельной электропроводностью, чем при разряде конденсатора без подключения внешнего поля. Отмечены тенденции увеличения значения удельной электропроводности при переполюсовки внешнего поля по отношению к полярности электродов конденсатора и увеличения значений электрического заряда (от 0,5 до 25 мКл) и электропроводности зоны реакции (от 1 до 10 кСм/м) с увеличением диаметра канала.

Значительный разброс в значениях разных параметров обусловлен, по-видимому, неравномерностью протекания реакции в пористой структуре зарядов, определяемой как нюансами их формирования, так и условиями приготовления смеси.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ В СИСТЕМАХ РЕАКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ

Иванов В.С.[1,@], Фролов С.М.[1,2], Вовк М.Ю.[3], Арефьев К.А.[4], Гришин И.М[4], Сидоров Р.С.[4], Лигостаев В.В.[4]

[1]ФИЦ ХФ РАН

[2]НП «Центр ИДГ»

[3]ПАО «ОДК-УМПО» филиал ОКБ им. А.Люльки

[4]ГНЦ ФАУ ЦИАМ им. П.И. Баранова

[@] vsivanov@chph.ras.ru

В работе представлены последние результаты испытаний камер сгорания (КС) с управляемым непрерывно-детонационным (спиновым) горением для турбореактивных и ракетных двигателей.

В части турбореактивных двигателей (ТРД) в работе представлены результаты испытаний форсажных КС с управляемым непрерывно-детонационным горением авиационного керосина. Цель испытаний заключалась в определении условий возникновения непрерывно-детонационного рабочего процесса в детонационной форсажной камере сгорания (ДФКС) в составе ТРД в одноконтурной и двухконтурной схемах, экспериментального определения тяговых характеристик таких установок, а также оценки влияния ударных нагрузок на работу лопаточных машин ТРД.

Суммарно для двух схем проведено более 80 огневых испытаний, причем продолжительность устойчивого детонационного режима ДФКС достигала 30 с. Испытания проводились при работе ТРД на режимах 80–90% максимальной тяги. Суммарный коэффициент избытка воздуха в ДФКС, рассчитанный по расходам воздуха и жидкого керосина, был близок к 1. В испытаниях зарегистрировано непрерывно-детонационное горение керосина с одной детонационной волной. Максимальное влияние детонационное горение керосина в ДФКС на лопаточные машины оказывало в одноконтурной схеме. Двухконтурная схема позволила практически полностью нивелировать это влияние. Разделение воздушных потоков в двухконтурной схеме позволило обеспечить устойчивую работу силовой установки при включении ДФКС на разных режимах работы ТРД и устойчивое тепловое состояние стенок ДФКС.

Разработанная и испытанная ДФКС имеет значительно более простую, технологичную и компактную конструкцию по сравнению с форсажными КС традиционного исполнения. Измеренные тяговые характеристики разработанной ДФКС не менее чем на 30% превышают

аналогичные значения при традиционной организации рабочего процесса в форсажной КС.

В части испытаний ракетных двигателей представлены результаты огневых испытаний малогабаритной и полномасштабной моделей КС с управляемым непрерывно-детонационным горением на топливной паре метан-кислород.

В зависимости от заданной циклограммы продолжительность огневого испытания демонстрационного образца малогабаритной КС достигала 30 с. В ходе испытаний впервые определено тепловое состояние стенок КС. Получены данные о тепловых потоках в стенки КС, которые возрастали с увеличением среднего давления в КС. Так, в пуске с давлением в КС около 20 атм тепловые потоки в стенки превышали 20 МВт/м^2. Общие потери тепла в стенки КС при их охлаждении водой составили около 10% от общей тепловой мощности КС.

В рамках работы «Прометей-Э», финансируемой Фондом перспективных исследований с учетом испытаний малогабаритной КС была разработана полномасштабная модель непререрывно-детонационной КС жидкостного ракетного двигателя, работающего на топливной паре метан-кислород под расчетную тягу. Проведены испытания полномасштабного демонстратора непрерывно-детонационной КС ракетного двигателя второй ступени ракеты-носителя сверхлёгкого класса. Результаты испытаний показали, что по удельному импульсу на режиме со средним расходом непрерывно-детонационная КС не уступает традиционной. Возникающие вследствие непрерывно-детонационного горения высокоамплитудные высокочастотные колебания давления не приводят к разрушению конструкции камеры и имеют стабильную частоту, соответствующую одной вращающейся детонационной волне на всех пройденных режимах. Значительная тепловая мощность, отводимая от стенок непрерывно-детонационной КС, может быть использована для газификации жидких компонентов топлива.

МИКРОТРАСТЕРЫ С ТОПЛИВОМ НА ОСНОВЕ НАНОТЕРМИТОВ

Кириленко В.Г.[1,@], Бражников М.А.[1], Долгобородов А.Ю.[1,2]
[1]*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН*
[2]*Объединенный институт высоких температур РАН*
г.Москва, Россия
[@] vladgr-k@ya.ru

В настоящее время наблюдается устойчивый рост интереса к миниатюрным, эффективным и безопасным реактивным микродвигателям (микротрастерам). Такие устройства применяются для управления пространственным положением малых космических аппаратов, коррекции их курса и решения ряда других задач [1]. В связи с этим одним из активно развивающихся направлений исследований стало изучение нанотермитов — перспективных материалов, используемых в качестве топлива для подобных двигателей.

Нанотермиты (НТ) представляют собой твердофазные смеси наноразмерных металлов и оксидов. По сравнению с традиционными термитными составами из порошков микронного размера НТ демонстрируют более высокие значения таких параметров, как скорость горения, тепловыделение и сила тяги. Наиболее критичным требованием для любого микротрастера является минимизация общей массы системы при максимальных тяге и импульсе двигателя [2]. Это достигается за счет использования НТ-составов с добавками, увеличивающими газовыделение и, как следствие, их тяговые характеристики (без увеличения массы двигателя) [3].

Цель настоящей работы состоит в следующем:

- определить параметры горения и тягу трехкомпонентной стехиометрической смеси nAl+nCuO+B, в которой использовались порошки бора микронного размера с предварительной механической активацией в шаровой мельнице и не активированные;

- изучить влияние добавки нитрогуанидина (NQ) на характеристики горения топлива на базе нанотермита nCuO/nAl (температура воспламенения, скорость горения, длительность и максимальное значение импульса тяги, развиваемый удельный импульс);

- исследовать тяговые характеристики НТ-топлива в зависимости от конструкции микротрастера (открытая трубка, сопло Лаваля), пористости топлива и местоположения точки поджига.

В табл. 1 приведены сравнительные данные по скорости горения всех исследованных составов в стальных трубках диаметром 4 мм и длиной 100 мм.

Таблица 1. Скорость горения исследованных смесей в стальной трубке.

Основной состав НТ, масс. %	Добавка NQ, масс. %	Пористость смеси, ε	Скорость горения, м/с
nAl/nCuO/B (10/86/4)	0	0,82	330±20
nAl/nCuO/B_{act} (10/86/4)	0	0,79	350±20
nAl/nCuO (19/81)	0	0,82	660±30
	5	0,81	740±40
	16,5	0,78	1400±50

На рис. 1 представлена экспериментальная зависимость полного импульса тяги $\boldsymbol{I_\Sigma}$ от веса $\boldsymbol{W}$ (мН) топлива различного состава при насыпной плотности загрузки. Все результаты получены для стального микротрастера с соплом Лаваля. По тангенсу угла наклона линейной аппроксимации полученных зависимостей определялся удельный импульс топлива ($\boldsymbol{I_{sp}}$). На удельный импульс трехкомпонентной смеси с бором степень активации последнего практически не повлияла.

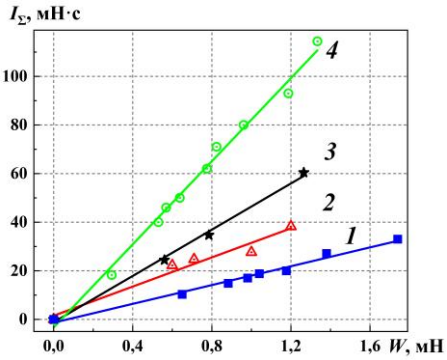


Рис. 1. Импульс тяги ($\boldsymbol{I_\Sigma}$) микротрастера с соплом в зависимости от веса топлива ($\boldsymbol{W}$):

Смесь nAl/nCuO/B_{act}:
1 – I_{sp}=19 с;

Смесь nAl/nCuO:
2 – I_{sp}=30 с (0% NQ)
3 – I_{sp}=48 с (5% NQ)
4 – I_{sp}=86 с (16,5% NQ)

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №25-23-00013.

[1] Kabganian M., Nabipour M., Saberi F. 2015. J Aero Eng. V. 229. P. 72-86.

[2] Romero-Diez S., Pearl J., Hitt D., McDevitt M., Lee P. 2018. Aerospace. V. 119. P. 1-18.

[3] Кириленко В.Г., Долгобородов А.Ю., Бражников М.А. 2025. Горение и взрыв. Т. 18(3), С. 111-126. DOI: 10.30826/CE25180311.

ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННАЯ ФОРКАМЕРА ДЛЯ ЗАЖИГАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОТОКА

Сметанюк В.А.[1], Садыков И.А.[1], Виноградов П.О.[1,2], Дудко Я.С.[1,2], Фролов С.М.[1,2,3,*]

[1]*ФИЦ ХФ РАН, Москва, Россия*

[2]*НИЯУ МИФИ, Москва, Россия*

[3] *ИТ СО РАН, Новосибирск, Россия*

**E-mail:* smfrol@chph.ras.ru

Зажиганию высокоскоростных потоков топливно-воздушных смесей посвящено значительное число исследований. В качестве источников воспламенения в них рассматривались искровые свечи [1], форкамеры [2], плазмотроны [3], лазерные системы [4] и импульсно-детонационные трубки [5].

Работа посвящена численному обоснованию и экспериментальной верификации условий формирования плоской детонационной волны (ДВ) в импульсно-детонационной форкамере (ИДФ). Форкамера предназначена для одновременного поджига плоского высокоскоростного потока по всей ширине проточной части (800 мм), что позволяет отказаться от сложной синхронизации отдельных источников зажигания. В работе реализован комплексный подход, сочетающий двухстадийное численное моделирование и натурный эксперимент. По результатам расчетов определены оптимальные геометрические параметры ИДФ, смесительного коллектора и трубки-предетонатора, а также найдены режимные характеристики газоподачи для инициирующей смеси (стехиометрическая смесь метан-кислород, рисунок *а*).

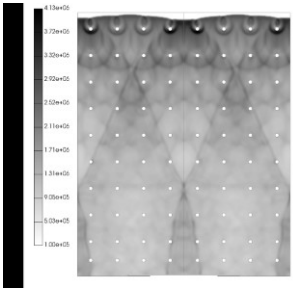


Рисунок (а) — Расчетные мгновенные поля давления при выходе плоской ДВ из ИДФ

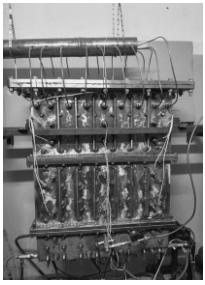


Рисунок (б) — Фотография экспериментального стенда

На основе полученных данных создан экспериментальный стенд с системой раздельной подачи компонентов и матрицей ионизационных зондов для диагностики волновых процессов (рисунок *б*). В ходе исследований продемонстрирована высокая сходимость расчетных и экспериментальных результатов для одного детонационного импульса. На основе анализа хронограмм обоснована природа локальных пиков измеряемой скорости фронта (до 3500 м/с), превышающих термодинамическую скорость детонации Чепмена–Жуге (2380 м/с), за счет проявления геометрического эффекта кажущейся фазовой скорости. Установлена инвариантность плоской формы фронта ДВ в ИДФ к процессу предварительного наполнения тракта горючей смесью. Разработанные подходы и конструктивные решения представляют практический интерес для прикладной газодинамики горения и проектирования перспективных воздушно-реактивных двигателей.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (государственный контракт №075-15-2024-543 от 24.04.2024 г.).

[1] Ombrello T.M., Carter C.D., Tam C.-J., et al., 2015, Proc. Combust. Inst. **35**. 2101–8.
[2] Kobayashi K., Tomioka S., Mitani T., J. Propuls. Power, 2004, **20**. 294–301.
[3] Takita K., Combust. Flame, 2002, **128**. 301–13.
[4] Li Q., Zhu J., Tian Y., et al., Physics of Fluids, 2023, **35**. 125133.
[5] Lee K.-H., Sung B.-K., Choi S.-W., et al., Combust. Flame, 2026, **287**. 114932,

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОНДЕНСИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ С ДИБОРИДОМ АЛЮМИНИЯ СВЧ-МЕТОДОМ

Шостов А.К.[1,@], Федотова К.В.[1]
[1]*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*
[@] shostov@bmstu.ru

Скорость горения энергетических конденсированных систем (ЭКС) представляет собой параметр, непосредственно влияющий на внутрикамерные рабочие процессы и внутрибаллистические характеристики двигательных установок. Величина данной характеристики носит многофакторный характер, среди которых ключевое значение имеет компонентный состав, включая природу окислителя, горючего-связующего и энергетических добавок [1].

С целью модификации энергетических характеристик ЭКС в их рецептуру вводятся дисперсные металлические горючие, преимущественно на основе чистого алюминия, бора, а также их интерметаллических соединений. В ряду перспективных высокоэнергетических компонентов особый интерес представляет диборид алюминия AlB_2, сочетающий в себе высокую объемную теплоту сгорания бора, а также высокую температуру горения алюминия.

На сегодняшний день не существует универсальной математической модели для расчета скорости горения ЭКС, поэтому для точного определения данной величины применяются различные экспериментальные методы, одним из которых является СВЧ-диагностика [2]. Данный метод обладает преимуществом – он обеспечивает непрерывную регистрацию текущей скорости горения образца в широком диапазоне давлений непосредственно в ходе одного экспериментального пуска.

В представленной работе проведено экспериментальное исследование скорости горения ЭКС на основе перхлората аммония (ПХА) с массовой долей 0,5. В качестве горючего-связующего вещества использовалась эпоксидная смола ЭД-20 с отвердителем аминного типа Этал-45. Энергетической добавкой в ЭКС служил AlB_2 с массовой долей 0,2.

Для повышения статистической достоверности получаемых результатов проведена серия из пяти испытаний. Зависимости скорости горения от давления показаны на рис. 1. Визуальный анализ полученных кривых свидетельствует о высокой степени их сходимости

на всем исследуемом диапазоне давлений. Экспериментальные зависимости располагаются в узком коридоре значений, практически полностью перекрывая друг друга своими доверительными интервалами.

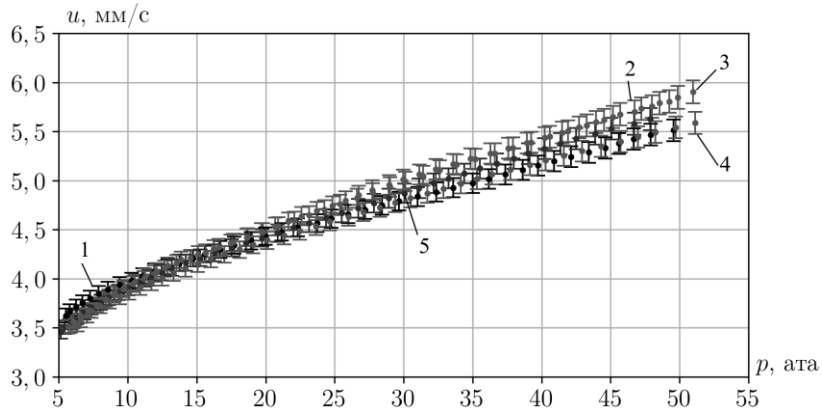


Рис. 1. Зависимости скорости горения от давления:
1 – Испытание №1; 2 – Испытание №2; 3 – Испытание №3;
4 – Испытание №4; 5 – Испытание №5

Полученные экспериментальные данные могут аппроксимироваться с использованием модели Стейнца, являющейся модификацией зависимости Саммерфильда для ЭКС на основе ПХА, которая учитывает наличие тепловыделения в конденсированной фазе за счет химических реакций.

[1] Штехер М.С. Топлива и рабочие тела ракетных двигателей, 1976, Машиностроение.

[2] Лавров Б.П., Шарай Ю.М., Сергеев А.В., Гавриленко И.В. Определение скорости горения твердого топлива с применением измерителя полных сопротивлений СВЧ-диапазона. Вестник МГТУ. Сер. Приб-ие. **1**, с. 28–36.

СИНТЕЗ ГОРЕНИЕМ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Алымов М.И.
Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН, Черноголовка, Россия

Процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), позже называемый «синтез горением», был открыт академиком А.Г. Мержановым, И.П. Боровинской и В.М. Шкиро в 1967 году [1, 2]. За прошедшие 60 лет были получены следующие основные результаты.

Получены новые теоретические и экспериментальные результаты в области структурной макрокинетики процессов синтеза многих важных, нашедших практическое применение, материалов: жаропрочных сплавов, металлов и интерметаллидов, высокотемпературной керамики, конструкционных и функциональных материалов, MXenes и MAX-фаз.

Разработаны технологии изготовления и организовано малотоннажное производство нового поколения порошков нитридов, карбидов и боридов металлов.

Разработаны новые методы консолидации, сочетающие процессы СВС и уплотнения порошков жаропрочных сплавов, интерметаллидов и композиционных материалов.

Разработаны новые методы синтеза износостойких покрытий и пористых функциональных материалов.

Разработаны методы синтеза сверхвысокотемпературной керамики.

Разработаны новые экспериментальные методы диагностики процессов горения: метод динамической высокотемпературной рентгенографии, методы измерения параметров процессов горения в условиях высоких температур и давлений,

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00530, https://rscf.ru/project/25-19-00530/»

[1] Merzhanov, A. G., Shkiro, V. M. and Borovinskaya, I. P. USSR Inventor's Certificate 255221, 1967; *Bull. Izobr*. no. 10.

[2] Merzhanov, A. G. (1994). Solid Flames: Discoveries, Concepts, and Horizons of Cognition. *Combustion Science and Technology*, *98*(4-6), 307-336. https://doi.org/10.1080/00102209408935417

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Г.В. Анцев, С.И. Дорошенко, А.П. Маштаков
АО «НПП «Радар ммс»

Актуальность исследований в области методов стабилизации процессов, протекающих при трансляции детонации в разнесенные точки инициирования, подтверждается значительным ростом исследовательского интереса со стороны зарубежных и отечественных высокотехнологичных компаний, связанного с ужесточением требований к показателям, определяемым соотношением эффективности, как интегрального показателя, и массогабаритных характеристик инженерных высокоэнергетических систем.

Стабильное, соответствующее замыслу конструктора, распространение детонационной волны в каналах трансляции позволяет создавать новые и модернизировать существующие инженерные высокоэнергетические системы, используя в них новые принципы. Комплексный подход к улучшению характеристик инженерных высокоэнергетических систем также предполагает разработку новых химических композиций, что можно наблюдать по публикациям и данным об исследованиях, проводимых в различных институтах.

Как известно, при создании нового образца химической композиции необходимо обеспечить баланс между потенциальной интенсивностью реакции, стабильностью при хранении и транспортировке, а также плотностью химической энергии и затратами на производство. Поэтому при развертывании работы в этой области обычно за основу берут уже зарекомендовавшие себя составы и действуют в направлении улучшения одной из нужных характеристик без ущерба для остальных. Принципиально новые соединения разрабатываются крайне редко.

В части стабильности работы проводников детонации в АО «НПП «Радар ммс» разработана модель платы с лабиринтом каналов с высокоэнергетической химической композицией и организована буферизация продуктов сгорания. В пакете прикладного программного обеспечения на основе разработанного комплекса математических моделей выполнена конечно-элементная модель корпуса, состоящего из нескольких деталей, содержащих каналы с химической композицией, с заданной точкой инициирования. В модели учтены термоупругопластические изменения геометрии металлических

элементов конструкции, свойства химической композиции и конструкционных материалов, сила предварительной затяжки крепежа, которая влияет на величину зазоров между элементами корпуса платы, образующихся в процессе детонации. Указанные технические решения позволяют разместить плату разнесенного инициирования в массе основной химической композиции.

Проведена экспериментальная отработка плат инициирования различной конструкции, варьирование параметрами позволило получить данные для уточнения математических моделей, а также обоснованно выбрать варианты с требуемыми характеристиками. Также выполнена экспериментальная отработка формирования множества кумулятивных струй определенной пространственной конфигурации. Некоторые результаты проведенных исследований внедрены в производство.

В серийных изделиях АО «НПП «Радар ммс», а именно в системе гарантированного уничтожения защищенных носителей информации и прочих узлов, применяются различные технические решения. С учетом специфических требований к указанной системе, например, по минимизации габаритов исполнительных элементов, надежности, гарантированного уничтожения узлов, которые зачастую являются достаточно защищенными, АО «НПП «Радар ммс» разработало и испытало изделие для разрушения объектов кумулятивными резаками, которые формируются из сплошной массы химической композиции.

Одним из основных испытанных и внедренных решений, обеспечивших одновременную работу резаков, является детонационная плата с каналами-ветвями. Плата изготавливается из титаностабилизированной аустенитной коррозионностойкой стали с каналами сечением порядка одного квадратного миллиметра, заполненными высокоэнергетическим веществом, обладающим высокой детонационной способностью и физико-химической стабильностью в широком интервале температур. В ходе испытаний было подтверждено, что интенсивность воздействия на преграду при групповой компоновке удлиненных кумулятивных зарядов и разнесенного инициирования химической композиции превышают соответствующие значения для одиночных структур. При этом, наряду с проникающей способностью кумулятивных резаков, подтвержденной пробитием стального листа, зафиксировано увеличение перепада давления во фронте воздушной ударной волны,

вероятно, за счет взаимодействия отраженных волн, сформировавшихся в результате разнесенного инициирования.

Также в указанном изделии разнесенное инициирование приводит к образованию «пульсирующей» воздушной ударной волны, имеющей несколько повторяющихся с интервалом 0,1 – 0,2 мс пиков давления, что повышает разрушающее действие. Показатели эффективности подтверждены серией опытных исследований. В экспериментах применялись заряды из различных высокоэнергетических химических композиций.

В АО «НПП «Радар ммс» разработан транслятор детонации, который обеспечивает перенос точки инициирования в определенную зону массы химической композиции, например, в геометрический центр заряда, что улучшает конфигурацию осколочного поля и увеличивает скорость осколков.

Транслятор инициируется ПИМом на базе серийно изготавливаемого электродетонатора, содержит пять детонирующих узлов с применением различных зарядов, в том числе удлиненный заряд, чем обеспечивается надежность и эффективность. Минимизация массы суммарной навески высокоэнергетической химической композиции, которая не превышает 4 грамм, позволяет использовать транслятор детонации в условиях ограниченных габаритов при модернизации существующих конструкций. В трансляторе применены новые химические композиции и изделия на их основе, за счет чего обеспечивается высокая детонационная способность и гарантируется работа основного заряда.

Разработанные математические модели при проектировании перспективных изделий позволяют прогнозировать детонационные процессы и образование осколков в конструкциях с трансляцией детонации, разнесенным инициированием и самоформирующимися элементами, а также являются основой дальнейших фундаментальных исследований с целью поиска качественно новых способов повышения перепада давления во фронте ударной волы, импульса, плотности и скорости осколков, создания безопасных и надежных систем разнесенного инициирования для высокоэнергетических систем, предназначенных для решения широкого круга задач и обладающих следующими свойствами:

- направленное действие осколочного поля за счет трансляторов детонации;

- повышенная скорость поражающих элементов за счет применения ударных ядер;

- увеличенное избыточное давления во фронте воздушной ударной волны за счет систем разнесенного инициирования.

СВОЙСТВА СУБМИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКОВ ГОРЮЧИХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ В ТОМ ЧИСЛЕ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ ПО ТЕХНОЛОГИИ СВС

Ворожцов А.Б.
Национальный исследовательский Томский государственный университет
@ abv1953@mail.ru

В работе представлены основные результаты исследований в области синтеза и исследования субмикро- и наноразмерных порошков горючих высокоэнергетических материалов.

Рассмотрены способы получения, модификации поверхности и свойства субмикро- и наноразмерных порошков, предназначенных для применения в составах высокоэнергетических материалов. Описаны подходы к получению горючих компонентов методами электрического взрыва проводников (ЭВП), самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и механической активации (МА). Также рассмотрено применение пневмоциркуляционного аппарата (ПЦА) для тонкого измельчения и классификации порошков горючих компонентов. Исследованы нанопорошки алюминия, порошки боридов металлов, систем алюминий-магний (Al-Mg), алюминий-цирконий (Al-Zr) и алюминий-титан (Al-Ti), а также биметаллические нанопорошки систем алюминий-медь (Al-Cu), алюминий-никель (Al-Ni) и алюминий-железо (Al-Fe).

Разработаны подходы по нанесению активных и пассивных полимерных покрытий на алюминиевые и биметаллические наночастицы для их микрокапсуляции. Такая обработка направлена на контролирование состояния поверхности и снижение склонности частиц к агломерации.

Для полученных материалов проведен комплекс исследований, включающий определение размера частиц, удельной поверхности, морфологии, фазового и элементного составов, химической устойчивости, степени деагломерации. Также установлены термодинамические и кинетические параметры процессов окисления.

Исследование проводилось при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-607 от 01/07/2025).

ПОЛУЧЕНИЕ ФТОРОВОДОРОДА ИЗ ОБЕДНЕННОГО ГЕКСАФТОРИДА УРАНА В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

Зимин А.Р.[1], Пашкевич Д.С.[1], Баженов Д.А.[2], Камбур П.С.[1], Алексеев Ю.И[3], Петров В.Б[3], Мухортов Д.А.[3], Капустин В.В.[1], Смолкин П.А.[4], Попов П.А.[5], Федорова Т.А.[1]

[1] ФГАОУ ВО СПбПУ

[2]ООО «Центротех-Инжиниринг»

[3]ООО «Новые химические продукты»

[4]АО «Сибирский химический комбинат»

[5]Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе

ars.zimin@mail.ru

Фтороводород находит широкое применение в различных отраслях промышленности: при производстве синтетического криолита, фреонов, фторполимеров, реагентов для микроэлектроники, с его использованием производят единственное известное летучее соединении урана – его гексафторид UF_6, которое используют при производстве топлива для энергетических реакторов.

В настоящее время практически единственным промышленным способом получения фтороводорода является сернокислотное разложение концентрата природного CaF_2. В России запасы CaF_2 требуемого качества исчерпаны, поэтому его приходится импортировать.

При производстве топлива образуется поток UF_6, обеднённый по U-235 (далее ОГФУ), который направляют на длительное хранение. На текущий момент в мире накоплено более 2 млн тонн ОГФУ, и более половины из этих запасов сосредоточены в России. ОГФУ содержит в своём составе ценный химический элемент фтор, который было бы целесообразно из ОГФУ регенерировать и направить вновь на производство фторидов природного урана.

Поэтому для замыкания топливного цикла по фтору было предложено провести исследование возможности получения фтороводорода из ОГФУ при его взаимодействии с водородсодержащими веществами и кислородом в режиме горения:

$UF_{6\,газ} + 3H_{2\,газ} + O_{2\,газ} \rightarrow UO_{2\,тв} + 6HF_{газ} – 583$ кДж,

$UF_{6\,газ} + 1{,}5CH_{4\,газ} + 3O_{2\,газ} \rightarrow UO_{2\,тв} + 6HF_{газ} + 1{,}5CO_{2\,газ} – 1056$ кДж.

Термодинамическими расчетам было показано, что в системе элементов U-F-H-O и U-H-F-O-C, когда число атомов фтора не превышает число атомов водорода, а число атомов кислорода в два раза выше числа атомов урана, при температуре выше 1150 K

основным урансодержащим веществом являются оксиды урана, а основным фторсодержащим – фтороводород. Температура продуктов реакции взаимодействия ОГФУ с метаном с учетом теплового излучения твёрдого UO_2 (40 % выделившейся энергии) и без учёта конвективного теплообмена и диссоциации веществ составляет величину около 2100 К.

Экспериментами на пилотной установке показано, что факел с ориентировочным содержанием исходных компонентов UF_6-$3H_2$-O_2 и UF_6-$1{,}5CH_4$-O_2 надежно формируется и стабильно горит при инициировании самовоспламеняющейся парой фтор-аммиак в вертикальном реакторе типа «туннельная горелка» при температуре стенки 90 °С. Показано, что основными урансодержащими продуктами процесса взаимодействия ОГФУ с метаном или водородом и кислородом, при избытке топлива и окислителя порядка 10 % являются оксиды урана, в основном UO_2 и U_3O_8, содержание ковалентно связанного с ураном фтора (UF_4, UO_2F_2) – порядка 1 %. Основным фторсодержащим продуктом процесса является смесь фтороводорода с водой, с содержанием фтороводорода порядка 95 %.

Остаточный фтор удаляли из оксидов урана действием паров воды при температуре 600 °С в течение 3 ч до уровня не выше 0,5 %.

Разработана математическая модель взаимодействия смеси UF_6 и O_2 с CH_4 (несжимаемая среда) в режиме турбулентного диффузионного горения, в предположении, что скорость реакции гидролиза UF_6 гораздо выше скорости окисления CH_4 и скорость окисления метана определяется турбулентной диффузией.

Математическая модель верифицирована путем сравнения результатов расчета полей скорости, температуры, функции тока и др., при горении метана в кислороде, полученных с использованием созданной модели, и с помощью расчёта во встроенной в пакет ANSYS FLUENT 2019R2 верифицированной модели, а также путём сравнения результатов расчёта поля температуры с измеренными в экспериментах значениями температуры и подбором степени черноты частиц UO_2 так, чтобы расчетные и экспериментальные значения температуры были близки. Расчётами было показано, что максимальная температура во фронте горения в проведённых экспериментах составляла около 2300 К, что хорошо коррелирует с результатами термодинамического расчёта.

На основе математического моделирования получены основные параметры промышленного реактора производительностью 6 тыс. т ОГФУ в год.

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ И ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПВВ ДЛЯ ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Комаров А.А., Печенев Ю.Г.
АО «ГосНИИ «Кристалл»
г. Дзержинск, Россия, Komarov_AA@mail.niikristall.ru

В АО «ГосНИИ «Кристалл» впервые в России был создан новый класс промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) для буровзрывных работ на основе обратных эмульсий «вода в масле» (ЭВВ), при этом удалось решить проблему безопасности и одновременного повышения взрывчатых характеристик. Уникальные свойства ЭВВ позволяют создать целую гамму различных составов ПВВ, отвечающих практически всем техническим требованиям потребителя.

Для получения качественных ЭВВ необходимо решить две основные проблемы - получение стабильной качественной эмульсии и перевод ее в детонационно-способное состояние. Для изготовления ЭВВ необходимо подобрать компоненты в заданном соотношении в составе, приготовить из них полуфабрикаты, провести процесс приготовления эмульсии и осуществить ее сенсибилизацию. При этом на основе расчетов необходимо подобрать стехиометрическую смесь горючего и окислителя для получения требуемых взрывчатых характеристик, а также минимального количества ядовитых газов. Как известно получение любой продукции связано с качеством исходных компонентов и не исключение составляют ЭВВ.

Одним из необходимых компонентов, без которого невозможно образование эмульсии является поверхностно-активное вещество или эмульгатор. Эмульгаторы должны производится с учетом потребностей заказчика и учитывать особенности технологического оборудования заказчика, требования к конечному продукту и совместимость с используемым сырьем. Лучшая зарубежная фирма Лубризол выпускает 8 марок эмульгаторов под различные технологические задачи. В России разработаны алогичные эмульгаторы под марками РЭМ. Однако основной компонент эмульгатора - полиизобутиленсукциновый ангидрид (ПИБСА) изготавливается из импортного полиизобутилена низкой молекулярной массы с активной частью. Необходимо разработать и внедрить технологию производства данного полиизобутилена в России.

Основным компонентом ЭВВ является аммиачная селитра и от ее качества зависит стабильность эмульсии. Норвежская фирма «Яра» кроме сельскохозяйственной продукции выпускает аммиачную селитру для применения в производстве ПВВ. В ней ограничено содержание нерастворимых примесей и содержание железа. Наличие железа и кремния обеспечивает образование гелеобразных структур в растворе селитры при нагреве, что отрицательно сказывается на качестве эмульсии. В России также назрела необходимость выпуска селитры по отдельной документации для эмульсионных ПВВ, как и в случае с пористой селитрой. Применение некачественной селитры и несовместимого эмульгатора приводит к нарушению процесса взрывчатого превращения и снижению взрывчатых характеристик ЭВВ, вплоть до выгорания заряда и в ряде случаев даже к отказам.

Кроме получения качественной эмульсии на результат взрыва важное значение имеет сенсибилизация матричной эмульсии. Для этого необходимо ввести в эмульсию газовые пузырьки или снизить ее плотность. Было показано, что для создания оптимальной плотности эмульсионного ПВВ необходимо ввести минимум 0,5% полимерных микросфер или до 3% стеклянных микросфер. Следует отметить, что стеклянные и полимерные микросферы имеют каждый свои достоинства и недостатки. Полимерные микросферы сильно пылят, имеют высокую горючесть и взрывоопасны. Стеклянные микросферы разрушаются при перевозке и смешении и их добавляют большее количество. В то же время они безопасны при обращении и меньше пылят. В конечном итоге выбор типа микросфер определяется соотношением параметра цена-качество. При этом на сегодняшний день отсутствует отечественное производство полимерных микросфер.

Другим способом сенсибилизации является введение газовых пузырьков за счет химических реакций, газовые пузырьки образуются при введении в эмульсию раствора нитрита натрия и дополнительных катализаторов для реакции с аммиачной селитрой. При этом для получения оптимального размера газового пузырька, в данном случае азота, приходится варьировать множеством факторов.

В настоящее время в шахтах опасных по газу и пыли взрывные работы проводятся тротилсодержащими аммонитами и нитроэфирным угленитом. Одним из недостатков данных ПВВ является выгорание, что приводит к взрыву метана и гибели шахтеров. В АО «ГосНИИ «Кристалл» показана возможность поучения предохранительных ПВВ на основе ЭВВ, которые не выгорают и выделяют меньшее количество ядовитых газов при взрыве.

Также большой объем применения ПВВ составляют дешевые и безопасные составы на основе смеси аммиачной селитры и дизельного топлива (АС-ДТ). В данном случае необходимо получить стабильные составы, в которых содержание дизельного топлива должно составлять в пределах 5,5%. Обычная селитра по ГОСТ 2-2013 удерживает в составе не более 2% и для изготовления стабильных составов применяется пористая селитра. В России пористая селитра выпускается различного качества, исследованиями АО «ГосНИИ «Кристалл» сформулированы требования к пористой селитре для производства смесей АС-ДТ.

В Правительстве РФ вышло постановление по развитию районов Крайнего Севера и Арктики, где предусматривается добыча стратегически важных полезных ископаемых. Однако в настоящее время ЭВВ имеют морозостойкость в пределах минус 40 ℃, необходима разработка составов с более высокой морозостойкость.

ЭВВ имеют невысокую теплоту взрыва в пределах 700 - 900 ккал\кг, отдельные специальные работы требуют более высокой теплоты взрыва 1500 ккал\кг и более, а также стабильность ЭВВ в процессе хранения до 2 лет. Вследствие чего необходима разработка составов с данными характеристиками.

Имеются случаи несанкционированных взрывов при разборке взрывной массы из-за отказавших скважин по различным причинам (2 случая на Михайловском ГОКе, последний в 2026 году). В связи с этим необходимо разработать способы определения отказавших зарядов сразу после взрыва.

Для создания требуемого ассортимента ПВВ в России необходимо продолжить исследования и решить ряд обозначенных выше проблем.

О ВЗРЫВООПАСНОСТИ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ НИТРАТА АММОНИЯ И МЕТОДАХ ЕЕ ОЦЕНКИ

Лавров В.В. [1,2,@]

[1]*ФИЦ ПХФ и МХ РАН г. Черноголовка Россия*

[2]*ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова г. Москва Россия*

[@] lavr@ficp.ac.ru

Ежегодный оборот составов, содержащих нитрат аммония (аммиачную селитру), достигает миллионы тонн в год по всему миру. Основной проблемой, возникающей при обращении с большими массами нитрата аммония и его смесей, является проблема обеспечения взрывобезопасности. Аварийные ситуации при производстве, перевозке и применении составов на основе нитрата аммония регулярно происходят в различных странах мира, в том числе с передовой экономикой. Среди самых громких катастроф можно назвать взрыв заводов в Опау (Германия) в 1921 г и в Тулузе (Франция) в 2001 г, взрыв в портах Техас Сити (США) в 1947 г и Бейрута (Ливан) в 2020 г.

Сложившаяся ситуация не меняется в лучшую сторону, в том числе и потому, что современные системы классификации веществ по степени опасности, основанные на использовании мелкомасштабных испытаний, не способны дать однозначный ответ на вопрос, насколько чувствительным является то или иное вещество, способно оно к детонации или нет. Особенно это касается продуктов с крайне низкой детонационной способностью, таких как нитрат аммония и удобрения с большим его содержанием.

В настоящей работе приведен обзор результатов мелкомасштабных стандартных, крупномасштабных и исследовательских методов оценки взрывоопасности нитрата аммония и составов на его основе различного назначения. Сделан вывод о том, что несанкционированные взрывы происходят и продолжают происходить по причине недостаточного понимания механизма взрывчатого превращения таких систем, из-за отсутствия надежных методов оценки взрывоопасности и несовершенства существующих регуляторных норм и правил. Даны рекомендации по мерам, которые могут быть приняты для предотвращения детонации данных продуктов при хранении по причинам халатности или в террористических целях.

Работа выполнена в рамках государственного задания №FFSG-2024-0001.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТУ И ГТД

Маркович Д.М.[@], Дектерев А.А., Дулин В.М., Чикишев Л.М.
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
[@] director@itp.nsc.ru

При проектировании современных энергетических и транспортных газотурбинных установок наибольшую сложность представляет разработка их “горячей части”, в частности – камеры сгорания. Даже при наличии современных вычислительных инструментов довольно трудно достоверно предсказывать хотя бы общий тренд – снижение или рост выбросов NOx после внесения изменений в конструкцию камеры сгорания и фронтового устройства. В связи с этим очень важно иметь возможность получить достоверные экспериментальные данные, позволяющие валидировать используемые численные коды, а также выявлять особенности механизмов стабилизации пламени в камерах сгорания ГТУ и ГТД. Поэтому представляется целесообразным детально исследовать процессы в модельных камерах сгорания с оптическим доступом в условиях, близких к реальным по температуре и давлению. Панорамные оптические методы диагностики потоков позволяют за довольно малое время получать достаточный массив экспериментальных данных о структуре течения, положении фронта пламени и характеристиках массопереноса, требуемый для верификации моделей, а также выявлять особенности механизма стабилизации пламени.

Актуальность данного направления исследований обусловлена острой необходимостью создания и развития отечественной современной энергоэффективной газотурбинной техники, удовлетворяющей высоким экологическим требованиям. В настоящее время наиболее перспективной технологией, позволяющей снизить выбросы вредных веществ, является сжигание бедной топливовоздушной смеси. Однако применение данной технологии сталкивается с рядом существенных проблем, без решения которых создание эффективного и надежного оборудования не представляется возможным. Пламя бедной смеси довольно сложно стабилизировать в широком диапазоне расходов, что необходимо для эффективной работы в режимах, отличающихся от номинального. В камере сгорания могут возникать термоакустические явления, которые приводят к вибрационному горению, погасанию пламени или его проскоку внутрь горелочного устройства и разрушению конструктивных элементов.

При разработке современных камер сгорания применяются методы численного моделирования процессов смесеобразования и горения как жидкого, так и газообразного топлива. Для проведения достоверных расчетов с использованием современных вихреразрешающих методов требуются значительные вычислительные мощности, не всегда позволяющие, тем не менее, обеспечивать достаточный объем оптимизационных численных экспериментов. Кроме того, даже при применении самых современных и ресурсо-затратных подходов довольно сложно прогнозировать возникновение нестационарных явлений, связанных с наличием крупномасштабных когерентных вихревых структур в потоке. Так, при организации закрученного течения в камере сгорания сложной конструкции критически важны наличие и протяженность областей возвратного течения, а также структура течения вблизи стенок жаровой трубы.

Очевидно, что при существенных затратах времени на проведение детальных расчетов существенную роль начинают играть экспериментальные исследования на упрощенных моделях камер сгорания, отражающих важные особенности режимов подачи топлива и воздуха, а также структуры течения. При использовании современных методов оптической панорамной диагностики потоков в единицу времени можно получать большой массив экспериментальных данных о мгновенной структуре течения. Проведение таких экспериментов, безусловно, требует высокой квалификации специалистов и является довольно сложной задачей, но при этом позволяет получить уникальную достоверную информацию, востребованную при проектировании реальных устройств.

В докладе будет представлен опыт по численному и экспериментальному исследованию процессов распыла и горения топлива в камерах сгорания модельной и реалистичной геометрии с применением современных вихреразрешающих методов математического моделирования и передовых методов оптической диагностики многофазных и реагирующих течений. Приведены примеры экспериментальных стендов, моделирующих гидродинамику и горение в камерах сгорания газотурбинного типа, описаны необходимые режимные параметры и используемые технические решения, позволяющие эффективно проводить измерения современными методами оптической диагностики.

Исследование выполнено за счет государственного задания в ИТ СО РАН (№ 126021217059-6).

КУМУЛЯЦИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В КОНУСЕ

Аксенов В.С.[1,2], Иванов В.С.[1], Садыков И.А.[1], Фролов С.М.[1,2,3*], Шамшин И.О.[1].

[1]*ФИЦ ХФ РАН,Москва, Россия*

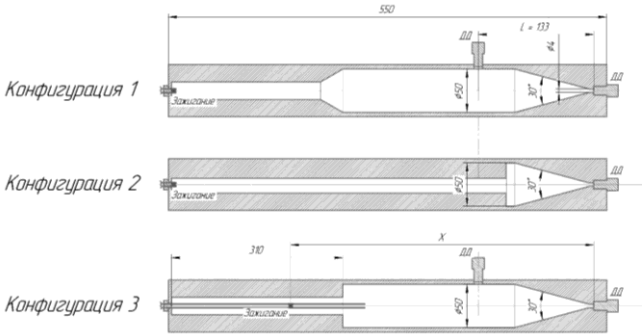
[2]*НИЯУ МИФИ, Москва, Россия*

[3]*ИТ СО РАН, Новосибирск, Россия*

**E-mail:* smfrol@chph.ras.ru

Газодинамика процессов в каналах переменного сечения, в частности особенности распространения ударных и детонационных волн в конических конфузорах и диффузорах, исследована в литературе достаточно подробно. Расширяющиеся конические каналы (диффузоры) традиционно применяются для демпфирования ударных волн (УВ) в газах [1], подавления детонационных режимов в реагирующих средах, а также при организации перепуска детонационных волн (ДВ) из узких трубок в каналы большего диаметра либо в открытое пространство [2]. Напротив, коническое сужение проточной части (конфузор) служит эффективным инструментом для кумуляции УВ [3], их фокусировки с целью контролируемого инициирования детонации [4] и генерации пересжатых детонационных режимов [5]. Кроме того, геометрия сходящегося конуса позволяет достигать экстремально высоких параметров давления и температуры в привершинной области при отражении волновых фронтов [6].

В работе исследованы особенности распространения газовой детонации в каналах переменного сечения с коническим сужением при вариации начального давления метанокислородной смеси в диапазоне 10–300 кПа и пространственного положения источника зажигания (конфигурации 1 и 2 на рисунке). Обнаружены два альтернативных газодинамических механизма экстремального роста коэффициента повышения давления K при отражении волнового комплекса в вершине конуса: режим нестационарного распада и последующего реинициирования ДВ при низких давлениях, а также локализация перехода горения в детонацию по типу «взрыва во взрыве» непосредственно внутри конической части при умеренных давлениях. Предложена модернизированная геометрия установки, позволяющая эффективно управлять преддетонационным периодом (конфигурация 3 на рисунке).



Принципиальные схемы исследуемых геометрических конфигураций

Впервые обнаружен и физически обоснован эффект пространственно-временной синхронизации волновых фронтов. Показано, что контролируемое приближение источника зажигания к вершине конуса обеспечивает квазисинхронное наложение лидирующей УВ и догоняющей пересжатой ДВ. Данный эффект приводит к кратному ударному сжатию привершинного объема смеси и взрывному росту пикового давления до рекордных значений K = 2500–2600 с достижением абсолютных давлений свыше 1 ГПа.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (государственный контракт № 075-15-2024-543 от 24 апреля 2024 г.).

[1] Фролов С.М., ПМТФ, 1993, **1**. 35-9.
[2] Когарко С.М., Изв. АН СССР, Отд. хим. наук, 1956, **4**. 419–26.
[3] Duong D.Q., Milton B. Exper. Fluids, 1985, **3**(3). 161-8.
[4] Фролов С.М., Аксенов В.С., Скрипник А.А. ДАН, 2011, **436**(3). 346–50.
[5] Бивол Г.Ю., Головастов С.В., Голуб В.В., ТВТ, 2017, **55**(4). 576–81.
[6] Минеев В.Н., Набоко И.М., Паршиков А.Н. и др., ТВТ, 1999, **37**(2). 313–18.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ

Соснин В.А.
АО «ГосНИИ «Кристалл»
Sosnin_VA@mail.niikristall.ru

Промышленные взрывчатые вещества (ПВВ) применяются в основном для добычи полезных ископаемых, которые обеспечивают около половины доходов федерального бюджета и определяют развитие экономики и обороноспособность страны. Россия остается мировым лидером по запасам полезных ископаемых и добыче более, чем 40 видов минерального сырья, критически важного для самых разных сфер, от фармацевтики и строительства до ядерной промышленности и ракетостроения.

По данным Росстата, объем продукции полезных ископаемых в денежном выражении за 5 лет с 2020 года увеличился более чем в 2 раза с 14,6 до 32,2 трлн. рублей в 2024 году. Также, по данным Росстата, в 2025 году в России наблюдалось снижение добычи некоторых видов полезных ископаемых, но отмечался рост в ряде других сегментов. В целом за год снижение в добывающем секторе составило 1,6%. При этом, согласно стратегии, падение должно было составить только 0,3%, и поэтому неизвестно выполнится ли предусматриваемый рост 1,7% в 2026 году. Доля добычи твердых полезных ископаемых с помощью взрыва составляет около 8 трлн. рублей. Добыча угля в 2025 году обеспечила около 1,93 трлн рублей, что соответствует снижению примерно на 4% по отношению к 2024-му. В сегменте прочих полезных ископаемых отмечено падение на 7,1% с итоговым результатом 902,9 млрд рублей. Значительный рост добычи металлических руд: показатель в денежном выражении поднялся на 27% до 4,23 трлн рублей.

После резкого падения объемов ПВВ до 2000 года идет резкое увеличение в течение 10 лет на 82%, и далее каждую пятилетку объем ПВВ увеличивался на 20-25% или 4-5% в год. Рост объемов ПВВ в основном осуществлялся за счет внедрения эмульсионных ПВВ на горных предприятиях и на местах применения в настоящее время изготавливается более 80% ПВВ.

На специализированных заводах выпускаютя тротилсодержащие граммониты, аммониты и небольшой объем предохранительных ПВВ. Из ассортимента граммонитов основной объем занимают граммонит 79/21, а из аммонитов аммонит 6ЖВ в

патронах 32мм. Наибольший объем ПВВ приходится на выемку угля, более половины (52,5 %), далее идет добыча золота (20,8 %) и приблизительно равные доли - железная руда и полиметаллы.

Для добычи полезных ископаемых владельцы карьеров часто нанимают сервисные компании, имеющие свои производства ПВВ, буровой инструмент и взрывников и их доля составляет 67%. Из сервисных компаний первое место занимает Азот-взрыв с 421 млн. куб. м. и далее идут КРУ, Управление БВР, Современные горные технологии, Нитро Сибирь и т.д. Из добывающих компаний: Полюс, Междуречье, Карельский окатыш и т.д.

По данным геологической службы США (United States Geological Survey, сокр. USGS), которая занимается анализом и прогнозами добычи полезных ископаемых в мире и США, все страны в данной области разделены на 3 группы: восьмерка великих горнодобывающих стран (2/3 сырья), далее - с развитой промышленностью и страны третьего эшелона. По данным ООН, за последние 50 лет объем добычи в мире увеличился в 4 раза и в последующие 30 лет увеличится в 2 раза. Такими же темпами должен расти и объем выпуска ПВВ в мире. По объемам добычи лидирует Китай, далее Индия и Россия на 5- 6 месте.

В мире взрывные работы составляют 32,1% от всех буровзрывных работ, и к 2035 году будет наблюдаться некоторое снижение до 31,8%. Распределение по областям применения в мире в 2025 году следующее: 73,1% горнодобывающая промышленность, далее строительство и разработка карьеров. По объемам применения ПВВ 1 место занимает Азиатско-тихоокеанский регион с увеличение добычи с 37,1% до 41% и далее Северная Америка - 23%, Океания -14%, Европа – 12% и Африка -7%. Китай производит 24,6% мирового объема, из них 9% в патронированном виде. Всего в мире выпускается 26,034 млн. тонн ПВВ и на 1 месте Китай 5,478 млн. тонн, а Россия занимает 4 место после Австралии и Индии. В 2025 году выпущено в мире взрывчатых веществ на 32 млрд. долларов, из них для горнорудной промышленности 16,1 млрд. долларов. В мире пять ведущих поставщиков ПВВ, которые контролируют около 41% рынка в 2025 году.

ГАЗОГИДРАТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Стрижак П.А.[1@], Подгорная, Е.Р.[1]
[1]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*
[@] pavelspa@tpu.ru

В настоящее время газовые гидраты привлекают большое внимание исследователей благодаря широкому спектру возможных областей применения. Среди наиболее известных направлений можно выделить энергетику, транспортировку и хранение природного газа в гидратной форме, а также сепарацию газовых смесей, опреснение и очистку воды. В 1 м^3 гидрата может содержать до 180 м^3 газа [1] (в пересчете на нормальные условия), что делает его перспективным средством транспортировки природного газа. Термобарические условия хранения газового гидрата намного мягче, чем для СПГ (-162 °С) или КПГ (20-25 МПа) [2]. Так, гидрат природного газа может находится в стабильном состоянии при температурах чуть ниже 0 °С и атмосферном давлении. Транспортировка природного газа в гидратном состоянии безопаснее, чем при КПГ или СПГ, поскольку при нарушении герметичности транспортировочной емкости выход газа из гидрата будет медленным, что минимизирует утечки и вероятность взрыва. В настоящее время разрабатывается технология получения гидрата повышенной плотности (пеллеты), который может содержать 170-180 объемов газа. Данная технология позволит транспортировать больший объем газа за раз.

Гидратные технологии позволяют осуществлять сепарацию различных газовых смесей. Особую ценность имеют метансодержащиее газы, такие как природный газ, попутный нефтяной, шахтный и свалочный. Газогидратная сепарация позволяет из бытовых и промышленных отходов получить энергоноситель с содержанием метана до 98%. Газогидратная сепарация основана на том, что у разных газов различные термобарические условия гидратообразования, что позволяет избирательно переводить в гидратную фазу только целевой компонент. Определены оптимальные условия гидратной сепарации попутного нефтяного газа с компонентным составом 79,27 моль% CH4 + 2,23 моль% C2H6 + 10,01 моль% C3H8 + 0,31 моль% i-C4H10 + 4,72 моль% n-C4H10 + 0,27 моль% O2 + 2,33 моль% N2 + 0,86 моль% CO2. При давлении 8 бар и

температуре 271.15 K получена газовая шапка над гидратом с максимальным содержанием метана 86,7 моль%.

Особый интерес представляет энергетическое применение гидратов. В силу высокого содержания воды прямое моносжигание гидрата нецелесообразно. Предлагается предварительно извлекать газ из гидрата и сжигать его с отходами угольной и нефтяной промышленности. Наличие водяных поров в гидратном газе позволяет снизить антропогенные выбросы от сжигания отходов. Такой подход позволит не только утилизировать нефтяной и угольный шлам, но и получить тепловую и электрическую энергию с минимальными выбросами загрязняющих веществ. Выполнено совместное сжигание угольного шлама с гидратным газом. Наличие водяных паров в гидратном газе снизило концентрацию SO_2 вдвое, CO– на 30 %, NO – на 45 % и CO_2 – на 25 %.

Исследования выполнены при поддержке Национального исследовательского Томского политехнического университета (12-999.ЛАБ.ИШФВП.2026).

[1] Xuan Z, Liu D, Sun X, Chen Y, Li H, Zhang Y, 2025, Recent advances in high-efficiency formation of gas hydrates within fixed beds: Classification, mechanism, applications and challenges. Chem Eng J 505.159611.

[2] Li B, Li Y-L, Liu X-M, Zhang T-T, Wan Q-C, Li G-C, 2025, Rapid formation of high-energy-density methane hydrates promoted by L-cysteine: A promising approach for solidified natural gas, Gas Sci Eng. 139.205638.

О ВЛИЯНИИ ПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ НА ФИЛЬТРАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ ПОРИСТЫХ СРЕД

Фецов С.С.[1,@], Луценко Н.А.[1]
[1]*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН*
[@] fetc95@mail.ru

Настоящая работа посвящена исследованию фильтрационного горения пористых сред, состоящих из горючих и инертных материалов с металлическими примесями, способными плавиться в волне горения. Разработка средств моделирования и понимание закономерностей горения пористых углеродсодержащих сред с металлическими примесями позволит создать технологию эффективного извлечения редких и ценных металлов из углей и тяжёлых нефтей [1] методом фильтрационного горения. Для исследования этих процессов предложена новая модель, основанная на концепции взаимодействующих взаимопроникающих континуумов. Модель реализована в пакете OpenFOAM. Основные уравнения решаются с помощью итерационного вычислительного алгоритма на основе конечно-объёмной дискретизации и метода SIMPLE [2], главная идея которого – построение разностной схемы из условия точного сохранения массы в каждой ячейке расчётной сетки. Модель прошла успешную валидацию на экспериментальных данных по горению гранулированной смеси берёзового активированного угля и технического сапфира [3].

Расчеты показали, что присутствие металлических примесей приводит к увеличению скорости волны горения и либо к повышению, либо к понижению температуры в зоне реакции в зависимости от теплофизических параметров компонентов смеси: теплопроводности, объемной теплоемкости, теплоты фазового перехода. Фазовый переход вызывает понижение температуры в зоне горения, а в некоторых случаях может также незначительно снизить скорость распространения волны горения. Влияние плавления/кристаллизации на процесс меньше, чем влияние других теплофизических свойств металла, и обычно относительно невелико, хотя иногда может быть заметным.

[1] Салганский Е.А. и др., 2019, ЖПХ. **92**(12)**.** 1514–1533.
[2] Патанкар С., 1984, Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат.
[3] Амелин И.И. и др., 2011, Изв. АН. Сер. хим. **6.** 1125–1132.

ОГНЕСТОЙКОСТЬ ТЕРМОВСПЕНИВАЕМОГО СТИРОЛ-АКРИЛОВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, НАПОЛНЕННОГО ИНТЕРКАЛИРОВАННОЙ СЛЮДОЙ

Богданова В.В.[1,@], Кобец О.И.[1], Перевозникова А.Б.[2]

[1] Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем»

[2] Белорусская государственная академия связи

[@]v.bogdanova2015@gmail.com

Предотвращение распространения пожаров по полимерным конструктивным элементам в зданиях и сооружениях, увеличение предела огнестойкости металлоконструкций в строительной отрасли эффективно при использовании термовспениваемых композиционных материалов (ТВКМ), представляющих собой огнезащитные краски, обмазки или вкладыши в составе превентивных средств огнезащиты (например, противопожарных муфт). Для повышения огнестойкости ТВКМ, снижения стоимости в их состав наряду с азот-фосфорсодержащими антипиренами вводятся интеркалированные (модифицированные) различными соединениями внедрения минеральные наполнители слоистой алюмосиликатной природы (монтмориллонит, галлуазит, тальк, вермикулит, бентонит). Модифицированные алюмосиликаты при высокотемпературном воздействии способны к расслоению в составе ТПКМ на мелкодисперсные фрагменты, создавая плотный термоизолирующий барьер.

С целью исследования влияния добавок модифицированной слюды, предварительно обработанной азотсодержащими соединениями (гексаметилентетрамином (ГМТА) или роданидом аммония (РА)), на огнестойкость и одновременно на физико-механические свойства продуктов прогрева базового термоизолирующего стирол-акрилового вспениваемого композита [1] (таблица, ТВКМ1) проведены сопоставительные исследования характеристик горючести, вспенивания и механической прочности пенококсов композитов, дисперсности и термических свойств образцов исходной и интеркалированной слюды.

В ходе эксперимента установлено, что введение в состав базового термоизолирующего композита (ТВКМ 1) добавки модифицированной (Сл–ГМТА, Сл–РА) или исходной слюды (Сл-исх) способствовало снижению обеих характеристик горючести (ГОСТ 12.1.044–89): для ТВКМ 2 – ТВКМ 4 они соответствовали стандарту ($\Delta T_{max} < 60$ °С и $\Delta m <$ 60 %) в отличие от ТВКМ 1. По объемному вспениванию продуктов прогрева для ТВКМ 2 – ТВКМ 4 получены удовлетворительные показатели ($K_V \geq 10$), а по остаточной деформации сжатия пенококсы этих же

ТВКМ показали лучшую механическую прочность ($\varepsilon \leq 10$ %) или на уровне базового композита в отличие от ТВКМ 4, содержащего Сл-исх.

Таблица – Горючесть ТВКМ и физико-механические свойства продуктов их прогрева

№ ТВКМ	Добавка[1] в ТВКМ	Характеристики горючести		Физико-механические свойства[2] при 300 / 500 / 800 °С	
		ΔT, °С	Δm, %	K_V	ε, %
1	–	52	65,1	4,5 / 25,9 / 15,2	1,1 / 9,1 / 24,9
2	Сл–ГМТА	48	47	3,1 / 17 / 10	2,4 / 6,8 / 7,9
3	Сл–РА	46,5	48,8	7,5 / 19,4 / 13,0	6,7 / 8,0 / 26,6
4	Сл-исх	40	43,3	10,3 / 29,6 / 19,6	11,5 / 34,6 / 60,7

Примечание 1. Содержание добавки – 23,9 %.
Примечание 2. K_V – коэффициент объемного вспенивания;
ε – остаточная деформация сжатия.

В сопоставительных условиях исследованы дисперсность и термические свойства (ДСК, ТГ, ДТГ) образцов Сл–ГМТА, Сл–РА и Сл-исх: установлено более высокое содержание мелкодисперсных частиц с $d \leq 10$ мкм после прогревания и образование газообразных продуктов, участвующих в формировании термоизолирующих структур для модифицированной слюды.

Таким образом, показано, что при сохранении термоизолирующих свойств на уровне базового состава для композитов на основе стирол-акрилового пленкообразователя с добавками модифицированной слюды достижение стандартных характеристик огнестойкости обусловлено термодеструкцией слоистой структуры слюды на мельчайшие фрагменты под влиянием процессов газификации ГМТА или РА, внедренных в межслоевое пространство. Образование механически прочного в широком температурном интервале (300–800 °С) вспененного изолирующего слоя в конденсированной фазе, а также дополнительное поступление азотсодержащих ингибиторов горения в газовую фазу при термолизе ГМТА или РА изменяет тепломассоперенос, усиливая огнестойкость ТВКМ.

[1] Bogdanova V.V., Kobets O.I., Buraya O.N., Ustinov A.A., Zybina O.A. 2022. Influence of expandable compositions on fire resistance of nodes of intersection of building structures with polymer pipelines // Magazine of Civil Engineering. **8**, art. 11607. DOI: 10.34910/MCE.116.7

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ АВАРИЙНЫХ СТРУЙНЫХ ВЫБРОСАХ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ

Болодьян И.А., Вогман Л.П.
ФГБУ ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха, Россия
e-mail: 3.5.2@vniipo.ru

Исследования выполнялись на лабораторном стенде, а также на полигонной установке в условиях, близких к реальным [1]. Экспериментальные результаты исследований сопоставлены с расчетами, которые осуществлены с использованием математических моделей излучения многоточечного источника и твердого тела.

Принятые математические модели с выбранными коэффициентами удовлетворительно отражают изменение теплового потока с расстоянием от устья струи в ближней зоне настильного факела в широком диапазоне расходов природного газа G от 0,01 до 4,5 млн м^3/сутки, описывая уменьшение излучаемого теплового потока с увеличением расстояния от устья выброса пламени.

В таблице 1 приведены результаты измерений и расчетов теплового излучения природного газа для настильного факела (координаты X = 20 м, Y = 20 м по вертикали) при коэффициенте пропускания через атмосферу τ = 0,8 по двум моделям: модель полуцилиндра и модель многоточечного источника в широком диапазоне расхода газа G от 0,01 до 4,5 млн. м^3/сутки.

Таблица 1 - Плотность теплового потока q, кВт/м^2, на вертикальную мишень (X = 20 м, Y = 20 м) от настильного факела в диапазоне интенсивности подачи газа G от 0,01 до 4,5 млн. м^3/сутки, или объемного расхода газа V м^3/с

Объемный расход газа, V, м^3/с	Эксперимент	Расчет (модель полуцилиндра)	Расчет (модель многоточечного источника)
4,6	1,4	1,2	1,0
4,7	2,0	1,5	1,3
15	4,5	4,0	3,4
19,7	4,3	4,8	4,3
25,5	5.0	5,8	5,2
31,2	5,1	6,5	6,0
42,8	6,3	7,5	7,1
52	9,1	8,1	7,8

Как следует из таблицы, результаты расчетов и экспериментов изменяются симбатно и близки по значениям.

По сравнению с горением высокоскоростной струи природного газа рассеянный факел характеризуется наличием значительного количества сажи и в условиях стационарного горения. Характер и режим горения в этом случае подобен режиму горения жидкого топлива на большой площади. Важным наблюдением является и то, что при больших расходах газа время от времени возникают огненные шары меньших размеров, чем первоначальный (при зажигании) огненный шар, что свидетельствует о горении струи в условиях недостатка окислителя. Для расчета теплового потока от рассеянного факела его форма может быть аппроксимирована наклонным цилиндром длиной $L = 24\ G^{0.4}$ и радиусом $R = 0{,}15\ L$.

В результате выполненных экспериментальных исследований на полигонной установке при воспламенении струй природного газа, истекающих в открытое пространство, не было зафиксировано существенное увеличение давления. Даже при расходе 4,5 млн. $м^3$/сутки, когда размеры горючего облака составляли примерно 65х10х10 м, избыточное давление не превышало 2,5 кПа. Такое давление не представляет опасности для человека и оборудования и может быть сравнимо с шумом не горящей струи газа в 130 дб при указанном расходе и на минимальном расстоянии от струи 10 м.

При аналогичных экспериментах с рассеянным факелом избыточное давление воспламенения было еще ниже. Следовательно, при истечении природного газа в открытое пространство (с загромождением мишени или без загромождения) опасность образования взрывных волн для окружающих объектов во внимание можно не принимать.

[1] Болодьян И.А., Вогман Л.П., Карпов В.Л. Экспериментально-аналитические исследования факельного горения паров и газов криогенных топлив// Безопасность труда в промышленности. № 1, 2023 г., - С.17- 22

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНТАКТНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ ГОРЕНИЯ КОМПОЗИТНОГО ОБРАЗЦА УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ МАЛОГО ОБЪЕМА

Давыдова Л.Ю.,[1,@] Губарев Ф.А.[1]

[1]*Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия*

[@] lydavydova@sevsu.ru

Оценка пожаровзрывоопасности угольной пыли при ведении горных работ является актуальной задачей для обеспечения промышленной безопасности. Важным представляется установление зависимости энергии активации угольной пыли от критической температуры самовозгорания, а также определение механизма взаимодействия угольных частиц и кислорода. При горении и взрыве угольной пыли необходимо учитывать химическую активность разрушенных макромолекул угля при их взаимодействии с окружающей средой. Для исследования процесса инициирования горения экспериментальным методом необходимо создание температурных условий, способствующих горению, и оценка поведения исследуемого вещества в этих условиях. В качестве образцов для исследования в данной работе была использована угольная пыль шахты им. А.А. Скочинского.

Анализ результатов исследований [1] по определению зависимости энергии активации окисления для частиц угольной пыли шахтопластов Донбасса от фракции показывает, что уменьшение размера фракций угольной пыли до значения 50 мкм влияет на химическую активность угля и энергию активации процесса окисления. Исследования термохимических показателей угольного вещества показали, что пожаровзрывоопасность углей и их пылевидных отложений связана с метастабильностью макромолекул угольного вещества и возможностью образования наночастиц угольной пыли, которые обладают пирофорностью. Для угля марки Ж энергия разложения наночастицы угля определяется выделяющейся

энергией, которая зависит от теплоты образования макромолекул угольного вещества. Таким образом, значительный интерес представляет исследование воспламенения и последующего горения угольной пыли при контактном инициировании, а также изучение механизма теплообмена с двухсоставными образцами угольной пыли и веществами, выступающими в качестве дополнительных источников теплоты (нанопорошок алюминия, порох пироксилиновый флегматизированный).

Исследования проводились с применением лабораторной установки с двухканальной скоростной визуализаций на основе лазерного монитора и скоростных камер Evercam F 1000-16-C [2] с адаптацией для решения задач эксперимента с учетом состава и свойств образцов.

В докладе рассмотрены практические аспекты реализации методики исследования горения угольной пыли на основе скоростной визуализации и мониторинга изменения состояния поверхности составного образца в период инициирования и развития устойчивой фазы горения с целью: выяснения явлений теплообмена, установления периода индукции, установления критических параметров воспламенения.

[1] Калякин С.А., Лабинский К.Н., Головченко Е.А., Белокобыльский М.А., 2024, Научный вестник НИИГД Респиратор **3(61)**, 7-14

[2] Gubarev, F.A., Davydova, L.Y., Zykov, A.A., 2026, Instrum Exp Tech **69**, 241–248

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВИАЦИОННОГО ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ ВОДНЫМИ РАСПЫЛЕННЫМИ СОСТАВАМИ ОГНЕТУШАЩИХ ВЕЩЕСТВ

Копылов Н.П.[1,@], Стрижак П.А.[2], Волков Р.С.[2], Кузнецов А.Е.[1], Сушкина Е.Ю.[1]

[1]*ФГБУ ВНИИПО МЧС России*

[2] *Научно-исследовательский Томский политехнический университет*

[@] np.nanpb@mail.ru

Для противопожарной защиты населенных пунктов, объектов различного назначения от перехода лесных пожаров широко применяется авиация – самолеты ИЛ-76, БЕ-200, вертолеты МИ-8, МИ-26, КА-32 [1] с авиационными приборами водослива (ВАП-2, ВСУ-7, ВСУ-15, НСУ-2, НСУ-8). Напорные сливные устройства (НСУ) обеспечивают вытеснение огнетушащего состава под давлением до 8 атм. с образованием мощной компактной струи. Эффективность тушения, повышение огнезащитных свойств заградительных полос можно повысить за счет распыления огнетушащих составов насадками, устанавливаемыми на срезе выходного трубопровода (напорного рукава) из НСУ.

С целью оценки характеристик тушения с использованием струйных и закручивающих насадков выполнена серия стендовых огневых экспериментов по тушению модельных очагов низовых лесных пожаров.

Объектами экспериментов выбраны огнетушащие вещества:

– водный раствор долговременного замедлителя горения «Лес-01» с концентрацией 2,5 % об.;

– водный раствор пенообразователя ПО-РЗМ(2%)-3 с концентрацией 1 % об. (концентрация смачивателя);

– вода.

Для измерения характеристик распыленных огнетушащих веществ использовались скоростная видеосъемка и специальный программный пакет Piv для обработки экспериментальных данных.

В результате выполненных экспериментов получены значения максимального времени тушения модульных очагов:

– для 2,5%-го раствора «Лес-01» - 11 с;

– для воды – 23 с;

– для 1%-го раствора пенообразователя ПО-РЗМ(2%)-3 тушение не достигнуто.

Коэффициент эффективности 2,5%-го раствора «Лес-01» составил 2,1.

Наилучший результат получен при использовании закручивающей насадки.

На рис. 1 показаны характеристики аэрозольного облака.

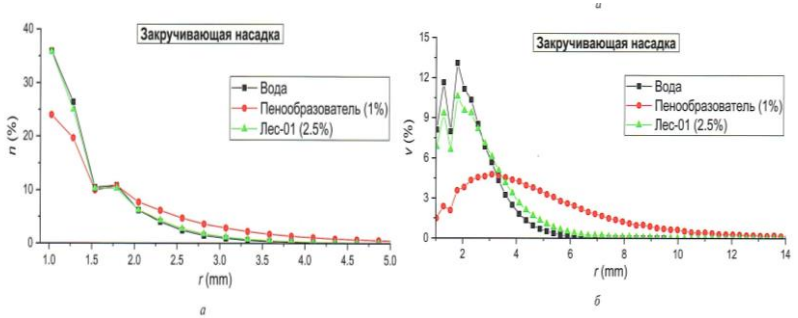


Рис. 1. Распределение количественной (а) и объемной (б) доли капель исследованных составов по размерам на расстоянии около 4 м от сопла при использовании закручивающей насадки для давления $P \approx 5$ атм в системе подачи тушащего состава

Выводы: составы с пенообразователем подвержены более сильному дроблению на мелкие капли, что способствует их уносу конвективными потоками от очага горения. Использование таких составов не рекомендуется к практическому применению. Эффект применения состава «Лес-01» при равных характеристиках с водой по степени дробления на капли и их скорости осаждения усиливается, очевидно, за счет антипирирующих свойств полифосфата аммония, входящего в его рецептуру.

[1] Пиджаков А.Ю., Решецкий Ф.Н., Гаврилова О.С. Применение авиации МЧС России при тушении лесных пожаров // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2011. № 1. С. 68-71.

[2] Кононов Б.В. Разработка напорных сливных устройств для тушения лесных пожаров с вертолетов методом прокладки противопожарных полос огнетушащими растворами // О мерах по совершенствованию борьбы с лесными и торфяными пожарами. Материалы науч.-практ. конф. М.: ВНИИПО. 2002. С. 211-218.

ПРЕДЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ЗАЖИГАНИЯ ОБРАЗЦОВ БИТУМА

Кудашев Ш.Р.[1@], Кропотова С.С.[2], Дорохов В.В.[2]
[1] *ООО «БИОЭН Нефтепродукт»*
[2]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*
[@] cpg@live.ru

Обеспечение пожарной безопасности резервуаров с высоковязкими углеводородами при хранении и транспортировке остается ключевой проблемой в нефтегазовой отрасли [1]. Проведены экспериментальные исследования по определению предельных условий воспламенения высоковязкого углеводорода на примере битума и образцов теплоизоляции, пропитанной битумом, с целью прогнозирования аварийных ситуаций, вызванных разливами на теплоизоляцию цилиндрических резервуаров с нефтепродуктами. Для изучения стадий и характеристик термического окисления образцов битума и теплоизоляции использовался термогравиметрический анализатор METTLER-TOLEDO TGA/DSC 3+. Для валидации полученных на термогравиметрическом анализаторе данных, а также для воспроизведения условий аварийной ситуации (длительное изотермическое воздействие, большая масса образца, возможность прямого измерения температуры в битумном слое), проведены дополнительные экспериментальные исследования с использованием трубчатой муфельной печи. Температуры нагрева 140-250 °C, скорость нагрева 5, 10, 30 и 50 °C/мин. Определены кинетические константы (энергия активации и предэкспоненциальный множитель) и массовая скорость испарения битума. Установлены предельные температуры, при которых проливы высоковязкого углеводорода на волокнистую негорючую теплоизоляцию приводят к самовозгоранию паров, тлению и устойчивому пламенному горению. Полученные данные позволяют количественно оценить пожарную опасность аварийных ситуаций на резервуарах.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 26-19-00437).

1. Kwon K., Kim Y., Kwon Y., Koseki H. Study on accidental fire at a large-scale floating-roof gasoline storage tank (2021) Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 73, 104613.

СКОРОСТЬ ВЫГОРАНИЯ АЦЕТОНА: ЭКСПЕРИМЕНТ И АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Михалкин В.Н.[@], Агафонов Г.Л., Андержанов Э.К., Тереза А.М., Хомик С.В., Медведев С.П.
ФИЦ химической физики им. Н.Н.Семёнова РАН, Москва, Российская Федерация
[@]E-mail: mikhalkinvn@mail.ru

Прогнозирование параметров пожаров при аварийных разливах (pool fires) требует достоверных сведений о скорости выгорания легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ). Существующие инженерные модели [1, 2] базируются на эмпирических корреляциях для «стандартных» топлив (н-гептан, бензин) и не учитывают специфику кислородсодержащих растворителей, таких как ацетон (температура вспышки T_{flash} = -18C, пределы распространения пламени 2.5–12.8% об.). Особую проблему представляет описание зависимости массовой скорости выгорания m" от диаметра источника D в области малых и средних масштабов (D < 0.2 м), характерных для лабораторных установок и начальных стадий аварий.

Исследования проводились в условиях естественной конвекции. Использовались вертикальные цилиндры диаметром D от 11 мм до 151 мм из различных материалов: стекло, металлические поддоны. Скорость выгорания определялась весовым методом в стационарном режиме горения. Для всех исследованных случаев наблюдается локальный минимум скорости в диапазоне $D \approx 40$ мм – 100 мм, описанный в [3] для бензина, керосина и дизельного топлива. Ниже этого диапазона скорость растет из-за вклада тепла от стенок и изменения структуры ламинарного диффузионного факела. Выше — начинает работать механизм радиационного насыщения.

Модель [1] $m''(D)=m''_\infty[1-\exp(-kD)]$ удовлетворительно описывает рост скорости выгорания с увеличением диаметра и выход на асимптоту m''_∞. Однако экспериментальные данные для малых диаметров (D < 0.2 м), характерных для лабораторных сосудов, технологических поддонов и начальной стадии разлива, демонстрируют существенные отклонения. В работах [2, 3] указывалось на влияние теплопроводности стенок и конвективных потоков, однако явная аналитическая зависимость, описывающая весь диапазон диаметров (включая область минимума скорости), отсутствовала.

Для математического описания наблюдаемой U-образной кривой предложена модель, состоящая из двух слагаемых:

1. Радиационный член: Классическая функция насыщения, описывающая выход на плато при больших D [1].

2. Член краевых эффектов/стенок: или аналогичный [3] в виде полинома Лорана, учитывающего краевые эффекты и массоперенос $b_0 + b_1/D^2 + b_2/D$, или в виде функции с экспоненциальным затуханием $A*\exp(-b_3 D)$, где b_0, d_1, b_2, b_3 и A - эмпирические коэффициенты.

На основе регрессионного анализа полученных данных (МНК) подобраны численные значения для эмпирических коэффициентов и проведены расчеты для двух предложенных функций:

$m''(D)=m''_\infty[1-\exp(-kD)]+b_0+b_1/D^2+b_2/D=0{,}039[1-\exp(-1{,}9D)]+0{,}005+4{,}9\ 10^{-6}/D^2+0{,}9\ 10^{-4}/D$

$m''(D)=m''_\infty[1-\exp(-kD)]+b_0+A\exp(-b_3 D)=0{,}039[1-\exp(-1{,}9D)]+0{,}005+0{,}11\exp(-80\ D)$

На рис.1 приведены результаты расчета и эксперимента скорости выгорания ацетона. Кривая 2 лучше описывает эксперимент при малых диаметрах, чем кривая 3.

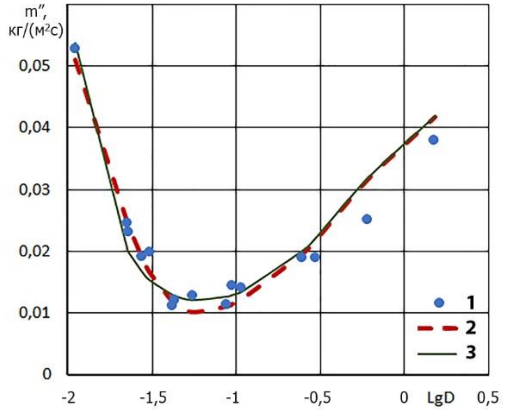


Рис. 1. Точки 1 – эксперимент, четыре точки справа из [2], кривая 2 – 2-ой член в виде экспоненты, кривая 3 – 2-ой член в виде полинома.

Полученные корреляции могут быть использованы для уточнения инженерных методик расчета времени выгорания аварийных разливов в технологических емкостях малого объема и поддонах.

[1] Babrauskas V. Estimating large pool fire burning rates. / Fire Technology. 1983. Vol. 19. P. 251–261.

[2] Hamins A., Yang J.C., Kashiwagi T. A Global Model for Predicting the Burning Rates of Liquid Pool Fires. / NISTIR 6381. 1999.

[3] Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. — М.: Наука, 1961.

ОСОБЕННОСТЬ ВЗРЫВООПАСНОСТИ АЭРОВЗВЕСИ МЕЛАМИНА

Полетаев Н.Л.
ФГБУ ВНИИПО МЧС России, г.Балашиха, Россия
nlpvniipo@mail.ru

Меламин ($C_3H_6N_6$) относится к горючим материалам, весьма востребованным химической промышленностью в мелкодисперсном состоянии, что подтверждается постоянно растущим годовым производством. В процессе пневмотранспортировки мелкодисперсного меламина (далее – меламина) в условиях его производства с необходимостью возникает вопрос о взрывоопасности аэровзвеси меламина, однозначный ответ на который отсутствует. В большинстве стран аэровзвесь меламина принято относить к взрывобезопасным материалам, с чем в некоторых странах (например, в Австрии) не согласны. Этот факт заставляет применять термин «максимальный размер d_{cr} взрывоопасных частиц полидисперсного материала» к полидисперсной аэровзвеси меламина с повышенной осторожностью, чему и посвящена данная работа.

Появление термина d_{cr} обязано известному утверждению о том, что при достаточно высокой степени измельчения любого твердого горючего материала образуется пыль, взрывоопасная в состоянии аэровзвеси. На основании разумных предположений в [1] разработана методика оценки размера d_{cr}, отделяющего частицы полидисперсной аэровзвеси с размером менее d_{cr}, активно реализующие механизм распространения пламени, от остальных частиц с размером более d_{cr}. Применение методики к известным массивам экспериментальных данных о взрывоопасности полидисперсных аэровзвесей в стандартной взрывной камере объемом 1 куб. м, позволил оценить d_{cr} для ряда веществ, например, ядерного графита (менее 5 мкм), железа (36 мкм), поливинилхлорида (38 мкм), пирротина (40 мкм), алюминия (46 мкм), пирита (107 мкм), полиэтилена (118 мкм), молочной сыворотки (750 мкм). За исключением сыворотки, d_{cr} представляется достаточно малой величиной, чтобы разрешить использование лабораторных взрывных 20-л камер для ее оценки.

Параметр d_{cr} не является константой и, вообще говоря, может зависеть от параметров состояния аэровзвеси, например, температуры, давления и содержания кислорода в газовой фазе, первый из которых (температура) представляется наиболее важным. Резкая зависимость d_{cr} от температуры аэровзвеси в значительной степени обесценивает

использование параметра d_{cr} в прогнозе взрывоопасности аэровзвеси без проведения ее огневых испытаний. Ниже будет показано, что полидисперсный меламин принадлежит именно к таким материалам с трудно предсказуемой взрывоопасностью.

Известно [2], что стандартные исследования меламина в крупномасштабной взрывной камере объемом 1 куб. м с мощным пиротехническим источником зажигания (ИЗ), имеющим запас энергии E_{ig} = 10 кДж, показывают слабый взрыв (давление взрыва $P_{max} \leq$ 50 кПа) для образцов материала со средним размером частиц d_m < 10 мкм и отсутствие взрыва ($P_{max} \leq$ 10 кПа) для образцов материала с d_m = 52 мкм. На основании этих данных разумно полагать, что d_{cr} полидисперсного меламина составляет величину порядка нескольких микрон (менее 10 мкм) при нормальных атмосферных условиях.

Также известно, что стандартные исследования меламина в лабораторной взрывной камере объемом 20 л (E_{ig} от 2 кДж до 2,5 кДж), выявляют сильный взрыв меламина (P_{max} > 400 кПа) как для мелкодисперсных образцов материала, так и для образцов меламина со средним размером частиц d_m = 60 мкм и более. На основании этих данных можно полагать, что d_{cr} полидисперсного меламина составляет величину порядка нескольких десятков микрон при условиях, соответствующих начальным условиям формирования аэровзвеси в лабораторных испытаниях.

Согласно [3] отличие лабораторного и крупномасштабного тестирования меламина касается начальной температуры аэровзвеси, которая в 20-л камере оказывается не менее, чем на 60 градусов выше. Таким образом, увеличение температуры аэровзвеси меламина на 60 градусов приводит к увеличению d_{cr} на порядок, что будет препятствовать прогнозам взрывоопасности аэровзвеси без проведения ее огневых испытаний. Отметим, что дополнительным следствием этой работы является утверждение о взрывоопасности технологических процессов, в которых допускают транспортировку меламина в горячем (85 ºС и выше) воздухе.

[1] Полетаев Н.Л., 2014, Пожаровзрывобезопасность. **9**. 15-26.
[2] Полетаев Н.Л., 2017, Пожаровзрывобезопасность. **9**. 15-28.
[3] Полетаев Н.Л., 2017, Пожаровзрывобезопасность. **6**. 5-20.

О ПРОГНОЗЕ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ВСПУЧИВАЮЩЕЙСЯ ПРИ НАГРЕВАНИИ ПЫЛИ

Полетаев Н.Л.
ФГБУ ВНИИПО МЧС России, г.Балашиха, Россия
nlpvniipo@mail.ru

Современные нормативные документы, касающиеся вопросов обеспечения взрывобезопасности объектов, на которых обращаются пыли твердых горючих материалов, формулируют весьма затратные предложения по обеспечению персонала объекта достоверными сведениями о показателях взрывоопасности упомянутых дисперсных материалов. Трудный поиск компромисса между интересами собственников объектов, страховых компаний и занятых исследованиями опасности пыли научных организаций несложно проследить по трансформации определения взрывоопасной пыли в нормах и требованиях к оборудованию для тестирования пыли.

На протяжении нескольких десятилетий к пыли относили дисперсные материалы, размер частиц которых, независимо от разновидности пыли, не превышал заданного значения d_{max}, причем d_{max} с годами мог меняться в диапазоне (600±300) мкм, а иногда исчезать вовсе, не допуская различия между понятиями «пыль» и «дисперсный материал». В настоящее время упомянутый диапазон сжался, в основном, к размерам от 420 мкм до 500 мкм.

К надежным установкам по оценке взрывоопасности пыли принято относить взрывную камеру объемом порядка 1 куб. м, имеющую мощный пиротехнический источник зажигания с энергией E_{ig} = 10 кДж. Чрезмерно высокие стоимость и продолжительность исследований, а также малое количество доступных установок такого типа в мире (около 10 штук), привели к широкому (несколько сотен установок) распространению лабораторной взрывной камеры с объемом 20 л (E_{ig} от 2 кДж до 10 кДж). Эта установка по шутливому заявлению американских специалистов предназначена для имитации результатов крупномасштабных испытаний, и, действительно, приводит к многочисленным ошибкам, особенно при исследовании пыли с низкой взрывоопасностью.

Величина d_{max} используется на практике для грубой оценки содержания взрывоопасной фракции без огневых испытаний. Это происходит путем просеивания рассматриваемого дисперсного

материала через набор сит и выделения фракции частиц с размером менее d_{max}.

Следует отметить, что независимость d_{max} от химической природы дисперсного материала предполагает чрезмерный запас надежности описанной выше грубой оценки. В частности, для пыли органического полимера, например, полиэтилена реальная величина максимального размера взрывоопасных частиц d_{cr} примерно в 3 раза меньше d_{max} [1]. Этим обстоятельством следует воспользоваться, если у исследуемого полимера не присутствует важная особенность, которой посвящено данное сообщение.

К упомянутой важной особенности (далее – особенности) относится способность полимерного материала частиц вспучиваться при нагревании из-за наличия определенных химических добавок, в частности, полиакриламида. Экспериментальные исследования показывают, что полимер с такими добавками при нагревании вспучивается, увеличивая свой объем в десятки раз, что соответствует эффективному увеличению размера частиц полимера в 4 – 5 раз. В этом случае возможно превышение частицами размера d_{cr} и выход аэровзвеси из взрывоопасного состояния.

Наличие упомянутой особенности у полимерного материала частиц с необходимостью вынуждает прибегать к экспериментальному исследованию взрывоопасности аэровзвеси. Опыт таких исследований демонстрирует возможность принадлежности пыли к дисперсным материалам с низкой взрывоопасностью [2]. Исследование подобных материалов в 20-л взрывной камере должно учитывать упомянутые выше сомнения по вопросу надежности результатов исследований в этой камере. Необходимые рекомендации по повышению надежности результатов исследования в 20-л камере приводятся в [3].

[1] Полетаев Н.Л., 2014, Пожаровзрывобезопасность. **9**. 15-26.

[2] Полетаев Н.Л., 2017, Пожаровзрывобезопасность. **6**. 5-20.

[3] Полетаев Н.Л., 2024, Тезисы XVII Всероссийского симпозиума по горению и взрыву, Суздаль. 216-18.

ПОВЫШЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Б.Ж. Рахметулин[1], М.М. Альменбаев[1], Ф.Б. Абдукадиров[2], Б.А. Мухамедгалиев[2], А.Б. Сивенков[3]

[1]Академия гражданской защиты им. Малика Габдуллина; г. Кокшетау, Республика Казахстан; [2]Ташкентский архитектурно-строительный университет г. Ташкент, Республика Узбекистан; [3]ФГБОУ Академия ГПС МЧС России (г. Москва)

E-mail: b.rahmetulin@mail.ru

Теоретические и технологические принципы создания древесно-полимерных композитов (ДПК) пониженной горючести формировались на протяжении последних десятилетий. Наиболее известными способами повышения термической устойчивости материалов на основе целлюлозы и древесины является применение объемной или поверхностной пропитки антипиренами целлюлозной и древесной массы, модифицирование органических смол антипиренами, добавление в массу материала различных термостойких наполнителей или волокон, а также поверхностное нанесение различных видов огнезащиты. Данные способы могут применяться как в отдельности, так и в комбинации. В условиях ламинирования и обеспечения повышенной долговечности древесно-полимерных материалов наиболее приемлемым является добавление антипиренов [1-3] или наполнителей (порошки, сферы, волокна и т.д.) [4-5] в древесную массу материала, а также модификация полимерного связующего [6-7]. Результаты научных исследований в области материаловедения и химических технологий последних десятилетий способствовали появлению достаточно большого ассортимента новых средств огнезащиты для материалов и конструкций на основе древесины, а также модификации известных огнезащитных технологий. Вместе с этим, необходимо акцентировать внимание на ограниченном количестве работ, направленных на изучение возможности снижения пожарной опасности древесных материалов и конструкций, а также повышения огнестойкости деревянных и деревоклееных конструкций путем применения огнезащиты, что определяет необходимость исследований в данном направлении.

В настоящей работе использованы различные химико-технологические подходы получения древесных композитов пониженной пожарной опасности путем применения различных видов

антипиренов и способов их применения. Изучены свойства мочевиноформальдегидной смолы, модифицированной фосфорсодержащими антипиренами, для производства материалов на основе древесины. Проведена сравнительная оценка эффективности различных видов антипиренов (фосфор-, азот, бор-, металл- и крахмалсодержащих (на основе модифицированного крахмалсодержащего сырья) антипиренов для снижения пожарной опасности древесно-полимерных композитов. Замедлители горения вводили в качестве модификаторов в состав органического карбамидоформальдегидного связующего, а также использовали для объемной и поверхностной пропитки древесно-стружечной массы, состоящих из древесных гранул различного размера (0,2…0,25 мм и 2…4 мм). По результатам исследования установлено, что модифицированная смола обладает повышенной устойчивостью к воздействию высоких температур с улучшением функциональных качественных характеристик. Показана высокая эффективность в снижении пожарной опасности древесностружечного материала полимерного фосфорсодержащего антипирена, а также фосфорорганических соединений по сравнению с низкомолекулярными неорганическими антипиренами по характеристикам потери массы, температурным показателям и отсутствию беспламенного тлеющего горения. Показано, что применение полимерных антипиренов продуктов реакции фосфорной кислоты в качестве модификаторов органических смол, используемых в технологии изготовления древесностружечных материалов, позволяет расширить возможности химической огнезащиты, создать более устойчивые к воздействию пожара материалы на основе древесины и целлюлозы с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Вместе с этим, при использовании низкомолекулярных неорганических соединений для объемной пропитки древесных частиц можно значительных улучшить показатели защиты древесного материала от пожара.

В работе также рассмотрена технология получения древесно-полимерных композитов на основе прессования древесной муки насыпной плотностью 150 кг/м^3 (размер древесных гранул в пределах 0,2…0,25 мм и органических связующих с использованием различных замедлителей горения (антипиренов) позволяющих осуществлять сшивку и модификацию лигноуглеводного комплекса древесных частиц с объемными расходами от 20 до 80 кг/м^3, рис. 1.



Рисунок 1. Общий вид древесной муки с антипиренами после сушки: а – борсодержащий антипирен (обьемный расход антипиренов до 20 кг/м^3); б – фосфорсодержащий антипирен (обьемный расход антипиренов до 20 кг/м^3); в – антипирен на основе модифицированного крахмального реагента (обьемный расход антипиренов до 20 кг/м^3).

Достижение необходимого количества сухих солей антипиренов в древесном композите проводилось изменением рабочей концентрации солей в водных растворах антипиренов (в пределах от 5 до 33 %). Полученная технология позволяет получить древесно-полимерные пластики на основе древесной массы устойчивые к воздействию высоких температур с кислородным индексом до 50, трудногорючие, слабогорючие, трудновоспламеняемые, нераспространяющие пламя по поверхности материалы, с малой дымообразующей способностью и малоопасные по токсичности продуктов горения. Кроме того, отработана технология пропитки древесно-стружечных материалов с более высоким значением размера древесных гранул древесной массы (размер древесных гранул от 2 до 4 мм) для фосфора-, бор- и крахмалсодержащих (биополимерных) антипиренов. Установлены различные огнезащитные эффекты в зависимости от вида антипирена и его количества, фракционного состава древесной массы, содержание антипиренов во внешнем и внутреннем слоях материала (10...20 %). Для древесно-стружечных плит получены характеристики эксплуатационной надежности материала в целом, соответствующие требуемым показателям. При использовании отдельных антипиренов показана возможность получения малоопасных по токсичности (по классу эмиссии свободного формальдегида) плит, а также перспективы получения экологически безопасных материалов. Определены перспективы применения комбинированных способы пропитки материалов на основе древесины в аспекте повышения огнезащитного эффекта и экологической безопасности.

Результаты работы являются основой для получения специальных с повышенной термостойкостью и устойчивых к

воздействию пожара строительных материалов на основе древесины и полимеров в виде отделочных и облицовочных материалов, погонажных изделий, элементов для ограждающих и несущих конструкций на основе ДПК.

[1] Fedotov I.O., Sivenkov A.B., Khasanova G.Sh. Efficiency of various fire protectants for wooden structures // Eurasian Chemico-Technological Journal - Алматы, республика Казахстан.: «Институт проблем горения Республики Казахстан», 2022 г. № 1 (24). С. 33-41.
{2] Rolff Ripke Leisted, Hjalte Bengtsson, Grunde Jomaas Experimental Study of the Effects of Flame Retardants Applied to Chipboard // Fire Safety Day 2012. Sweden. 2012 – 73 p.
[3] Gumus, N., Doganci, E. & Aytac, A. Evaluations of the effects of different flame retardants combinations on particleboards produced using urea–formaldehyde resin. *Eur. J. Wood Prod.* 82, 747–759 (2024). https://doi.org/10.1007/s00107-024-02054-6.
[4] N. Ismita, Mandape AS, Kumar S, Shukla S and Kishan Kumar VS. (2019). Fire efficacy improvement of particle boards by nanoclay. World Journal of Advanced Research and Reviews, 4(2), 90-95.
[5] Ülker, O., and Burdurlu, E. (2015). "Effects of some mineral wools and adhesives on burning characteristics of particleboard," *BioRes*. 10(2), 3775-3789.
[6] Zhou, X.X., Yu, Y. & Chen, L.H. Effects of zirconaluminate coupling agent on mechanical properties, rheological behavior and thermal stability of bamboo powder/polypropylene foaming composites. *Eur. J. Wood Prod.* **73**, 199–207 (2015). https://doi.org/10.1007/s00107-014-0853-1.
[7] Wei, A.; Ou, M.; Wang, S.; Zou, Y.; Xiang, C.; Xu, F.; Sun, L. Preparation of a Highly Flame-Retardant Urea–Formaldehyde Resin and Flame Retardance Mechanism. Polymers 2024, 16, 1761. https://doi.org/10.3390/polym16131761.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СМЕСЕЙ

Стаханов В. В., Рякин А. А., Шарапов И. К., Давлетчин Ю. Ф.
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Россия, г.Снежинск.
E-mail: stakhanovvv@vniitf.ru

В настоящее время активно развивается водородная энергетика. Одним из способов производства водорода в промышленных масштабах является парокислородный риформинг метана на атомной энерготехнологической станции с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором [1]. Технологическая схема процесса содержит в себе ряд промежуточных реакторов, содержащих в себе преимущественно газовые смеси водорода и метана с примесями оксидов углерода и водяного пара. Также рассматриваются технологии, в которых для снижения выбросов углекислого газа к природному газу подмешивается водород [2]. Для обеспечения пожаровзрывобезопасности рассмотренных технологий важно знание концентрационных пределов воспламенения используемых смесей. В открытой литературе имеется обширный массив данных по пределам воспламенения отдельных газов, например, водорода или метана [3], однако для смесей, содержащих две и более компоненты данных значительно меньше. В связи с этим для прогнозирования пределов воспламенения многокомпонентных газовых смесей актуальным является применение расчетных методик, для валидации которых требуется набор экспериментальных данных. Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование пределов воспламенения многокомпонентных водородсодержащих смесей.

Эксперименты проводили на комплексе экспериментальных исследований пожаровзрывобезопасности (КЭИП) [4], состоящем из сферического реакционного сосуда, сосуда для подготовки смеси объемом 100 л (далее — ресивер), термокамеры, систем измерения и управления. На одной из стенок реакционного сосуда имеется иллюминатор из оптического сапфира. Реакционный сосуд помещали в термокамеру для обеспечения начальных условий по температуре. Температуру в испытательной камере измеряли термопарами с абсолютной погрешностью измерения $\Delta = \pm 2.0$ °C. Требуемый состав газовых смесей подготавливали методом парциальных давлений, контроль которого осуществляли преобразователем давления с диапазоном измерения от 0 до 0.6 МПа и относительной погрешностью

измерения δ = ± 0.025 %. Горение инициировали электродными воспламенителями с мощностью искры до 0.1 Дж, расположенными в центре реакционного сосуда. Давление после воспламенения измеряли датчиком давления, относительная погрешность измерения давления составляла δ = ± 0.25 %. Регистрацию распространения пламени проводили через иллюминатор с использованием тепловизора в инфракрасном диапазоне (длина волны от 2.0 до 5.7 мкм) с частотой 200 кадр/с.

Перед каждым экспериментом реакционный сосуд вакуумировали до давления 0.01 кПа, заполняли компонентами смеси в необходимых пропорциях по методу парциальных давлений до конечного давления 100 кПа. После заполнения смесь перемешивали в течение 15 мин, отбирали газовые пробы для анализа газового состава. Затем инициировали горение смеси и запускали съемку инфракрасной камерой. После воспламенения отбиралась газовая проба для анализа газового состава, относительная погрешность измерения которого равна δ = ± 2.5 %. Критерием воспламенения является выход пламени за границу наблюдаемой в эксперименте области, диаметром 150 мм (рис. 1). Данная установка успешно применялась для определения пределов воспламенения многокомпонентных водородсодержащих газовых сред с примесью водяного пара [5,6].

Из рисунка 2 видно, что с увеличением содержания водорода в смеси с метаном, пределы воспламенения расширяются, в том числе, возрастает минимальное флегматизирующее содержание CO_2 (30.8 об. % для смеси H_2+CH_4=1:2 и 37.5 об. % для смеси H_2+CH_4 =2:1).

При горении смеси H_2+CH_4=1:2 вблизи ВКПВ было обнаружено, что в условиях недостатка кислорода метан практически полностью расходуется, а водород, напротив, образуется (табл. 1). Предположительно, это происходит вследствие реакции метана и водяного пара при повышенной температуре в очаге пламени.

Таблица 1 – Газовый состав в реакционном сосуде до и после воспламенения в эксперименте по определению ВКПВ

До воспламенения		После воспламенения	
C [H_2], об. %	C [CH_4], об. %	C [H_2], об. %	C [CH_4], об. %
6.00±0.16	12.00±0.31	12.78±0.33	0.31±0.01

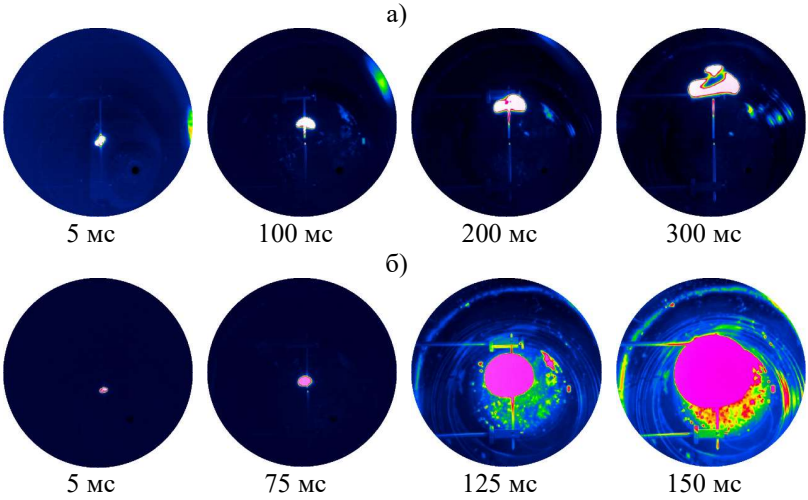


Рисунок 1 – Кадры распространения пламени в эксперименте вблизи: а) НКПВ и б) ВКПВ. Диаметр кадров – 150 мм.

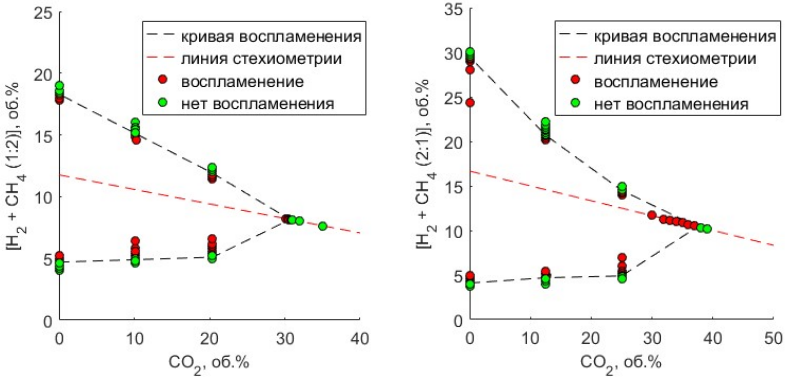


Рисунок 2 – Пределы воспламенения смеси H_2-CH_4-воздух-CO_2

[1] Фатеев С.А. и др., 2023, Атомная энергия. **133**. 243— 249.
[2] Rosa N. et al. 2025, Int J of Hydrogen Energy. **105**.
[3] Coward H.F., Jones G.W. 1952, Limits of flammability of gases and vapors, US Bureau of Mines Bulletin 503.
[4] Безгодов Е.В., и др., 2023, Атомная Энергия. **134**. 187-94.
[5] Стаханов В.В. и др., 2025, Физика горения и взрыва. **61**. 13-24.
[6] Stakhanov V.V. et al., 2026, Int J of Hydrogen Energy. **223**.

ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКТИВНЫХ И ДЕКОРАТИВНО-ОТДЕЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ БЫСТРОВОЗВОДИМЫХ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ (ЮРТ)

Хасанова Г.Ш.[1], Сивенков А.Б.[2], Нагановский Ю.К.[3]
[1]Академия гражданской защиты МЧС Республики Казахстан (г. Кокшетау);
[2]Академия ГПС МЧС России (г. Москва); [3]ВНИИПО МЧС России (г. Балашиха),
e-mail: make_hasanov@mail.ru, sivenkov01@mail.ru, reut11731@mail.ru

В работе представлен комплекс термогравиметрических характеристик древесины (сосна, береза) и текстильно-войлочных материалов на основе натуральных и синтетических волокон (войлок, шерсть, хлопок и полиэстер). Исследования проведены с целью выявления закономерностей массопотерь, температурных интервалов основных стадий термической деструкции и остаточной массы, как показателей, имеющих важнейшее значение для прогнозной оценки пожарной опасности материалов. Сравнительный анализ термогравиметрических (ТГ) и дифференциально-термогравиметрических (ДТГ) кривых позволил установить особенности протекания процессов пиролиза исследуемых материалов и их характерные различия в зависимости от состава и структуры. По результатам исследования показано, что древесина и текстильно-войлочные материалы характеризуются многостадийным характером термического разложения, при этом температурные интервалы интенсивной деструкции и величина пиролизного остатка существенно различаются, рис. 1.

Заметно влияние на максимальную скорость потери веса и температуру, ей соответствующую, соотношения в древесине хвойных и лиственных пород между содержанием низкомолекулярных олигомерных компонентов (экстрактивов и гемицеллюлозы) и высокомолекулярной частью композита (целлюлозой и лигнином). Чем выше содержание экстрактивов, тем больше максимальная скорость потери массы древесины в этой низкотемпературной зоне и тем значительнее снижение начальной температуры разложения древесины [1, 2]. Изменяется и положение максимума первого иногда «скрытого» пика (в виде плеча на ДТГ кривой) в сторону меньшей температуры.

а. б.

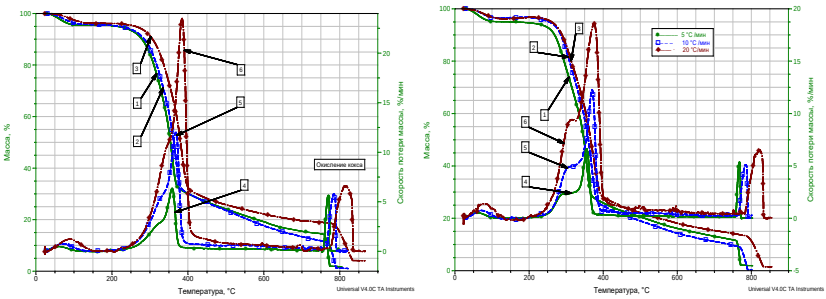


Рисунок 1. ТГ(1, 2, 3) и ДТГ(4, 5, 6) кривые образцов древесины сосны (а) и березы (б) со сменой атмосферы, азот до 750 °С далее воздух: 1,4 – скорость нагревания 5 °С /мин; 2,5 – скорость нагревания 10 °С/мин; 3,6 – скорость нагревания 20 °С/мин.

Указанный факт подтверждает концепцию, что вещества, экстрагируемые из древесины, являются наименее термостабильными по сравнению с другими основными компонентами древесины. Особенно явно низкотемпературный пик проявляется на ДТГ кривых пиролиза образцов древесины березы.

В таблице 1 приведены результаты определения кинетических параметров пиролиза образцов древесины в зависимости от степени превращения: α=20-30% для низкотемпературной области, в которой возможна деструкция экстрактивов и гемицеллюлоз, а также α=60-70 % - разложение основной части компонентов древесины – целлюлозы и лигнина. Порядок реакции пиролиза древесины равен 1.

Таблица 1– Кинетические параметры пиролиза образцов древесины.

Кинетический показатель	Порода древесины	
	Сосна	Береза
α=20-30%		
$E_{эфф.}$, кДж/моль	159,4/163,5	182,9/221,6
lgk_0 (k_0, мин$^{-1}$)	13,09/13,29	15,48/18,62
α=60-70 %		
$E_{эфф.}$, кДж/моль	165,2/162,5	194,7/186,7
lgk_0 (k_0, мин$^{-1}$)	13,13/12,90	15,67/14,86

Совместное применение древесины и текстильно-войлочных материалов в помещениях юрт способствует увеличению пожарной нагрузки и создает условия для быстрого развития опасных факторов пожара. На рис. 2 представлены термограммы ковровых изделий на основе различного волокнистого состава растительного и животного происхождения (ковровая дорожка Bal Teksti lKaravan W490A (полипропилен, джут), ковровая дорожка OBAM Yke (хлопок, шерсть).

а. б.

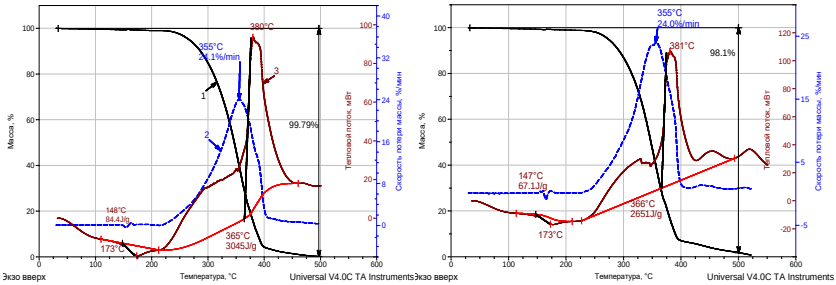


Рисунок 2. ТГ (1), ДТГ (2) и ДСК(3) кривые образца ковровой дорожки *Bal Tekstil Karavan W490A*, (а) и образца ковровой дорожки *OBAM Yke*, (б) (20 °С/мин; атмосфера – воздух).

Установлено, что пожарная опасность коврового материала *Bal Tekstil Karavan W490A* значительно зависит от химической природы и высоты ворса. Наблюдаются типичные кривые ТГ, ДТГ, ДСК для полипропилена с температурной границей начала разложения порядка 200 °С и максимальной скоростью разложения при температуре 355 °С (кривая ДТГ). При нагревании установлен фазовый переход плавления (-84,4 кДж/г), начало которого лежит в интервале температур 140...150 °С. Ковровое покрытие *Bal Tekstil Karavan W490A* содержит джутовое волокно, которое является натуральным растительным материалом на основе природного полимера целлюлозы с высоким содержанием лигнина. Снижение термической устойчивости волокнистого материала коврового покрытия *Bal Tekstil Karavan W490A*, создаваемой в присутствии джутового волокна, по-видимому, связано с особенностями его морфологической структуры и химического состава материала. Термическое разложение начинается при температуре 250 °С, что свойственно материалам на основе целлюлозы.

Характер полученных термогравиметрических зависимостей для хлопково-шерстяного покрытия *OBAM Yke* указывает на то, что при температуре 100-110 °C происходят фазовые превращения влаги в пар (-67,1 кДж/г). Очевидно, что при терморазложении и горении материалов с подобной химической основой при температурах выше 200 °C в ограниченном помещении могут образовываться летучие продукты, оказывающие токсическое действие на организм человека (монооксид углерода, цианистый водород и др.) [3].

Полученные данные могут быть использованы для прогнозной оценки пожароопасных свойств материалов, скорости термической деструкции и выделению токсичных продуктов горения. Результаты термического анализа могут быть использованы при разработке рекомендаций по совершенствованию нормативных требований и выбору технических решений по повышению пожарной безопасности каркасных быстровозводимых зданий (юрт).

[1] Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings. Germany: Springer Series in Wood Science, Springer. - 2014. - 280 p.
[2] Sivenkov A.B., Berlin A.A., Mukhamedgaliev B.A., Almenbayev M.M., Makishev Zh.K., Rakhmetulin B.Zh. Fire Hazard and Fire Resistance of Wooden Structures. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2023. 269 p. doi:10.1007/978-3-031.
[3] Асеева Р.М., Заиков Г.Е. Горение полимерных материалов // М., Наука, 1981 г. – 280 с.

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ПОТОКЕ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ

Шебеко Ю.Н.

Всероссийский ордена "Знак Почета" научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г.Балашиха, Россия

yn_shebeko@mail.ru

Распыленная вода является одним из эффективных средств тушения пожаров. В ряде работ предлагается ее применение для целей взрывопредупреждения и взрывозащиты на объектах, где одной из характерных аварий является сгорание предварительно перемешанных газовоздушных смесей. Однако было выявлено, что воздействие распыленной воды на пламена, распространяющиеся по газовоздушным смесям, может приводить как к подавлению горения, так и к его интенсификации. В этом состоит существенное отличие характера воздействия капель распыленной воды на диффузионные пламена, для которых типично подавление горения, и на пламена, распространяющиеся в предварительно перемешанных смесях. В связи с этим представляется интересным и практически важным определить условия, при которых реализуется интенсификация или подавление горения. С этой целью в настоящей работе проведен анализ публикаций, посвященных исследованиям воздействия распыленной воды на кинетические пламена.

На основании проведенного анализа сделаны следующие выводы.

1. Основным фактором, влияющим на возможность как интенсификации, так и подавления горения газовоздушной смеси, является дисперсность капель. При размерах капель менее 20-30 мкм, как правило, наблюдается подавление горения, а при больших размерах – его интенсификация.

2. Полного подавления горения с помощью распыленной воды достичь, как правило, не удается вплоть до ее массовой

концентрации 700 г/м^3. При размерах капель менее 20 мкм происходит снижение максимального давления взрыва, скорости нарастания давления взрыва и скорости пламени. Полной флегматизации горючих газовых смесей с помощью распыленной воды удается достичь лишь для медленно горящих смесей (например, для смесей водород-воздух при содержании H_2 не более 7-8 %(об.).

3. Для снижения параметров детонации газовоздушных смесей оказывается возможным применение распыленной воды с каплями диаметром до 1000 мкм, что связано с возможностью их дробления в ударной волне.

4. При воздействии крупных капель (диаметр более 50 мкм) на пламена, распространяющиеся в газовоздушных смесях, происходит, как правило, интенсификация горения вплоть до перехода в детонацию. Это связано с тем, что капли не успевают существенным образом испариться во фронте пламени и флегматизировать процесс горения, но турбулизируют фронт с интенсификацией происходящих в нем процессов.

5.С точки зрения практического применения распыленной воды в целях взрывопредупреждения и взрывозащиты могут быть отмечены следующие достоинства и недостатки этого защитного мероприятия, зависящие от ее параметров, таких, как дисперсность и скорость движения капель.

К числу достоинств следует отнести:

а) возможность флегматизации горючей газовой смеси;

б) возможность подавления распространяющегося пламени.

К числу недостатков следует отнести:

а) возможность турбулизации горючей газовой смеси с интенсификацией горения вплоть до перехода горения в детонацию;

б) возможность короткого замыкания в незащищенном электрооборудовании.

ОСОБЕННОСТИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Михайлов Ю.М.[1], Купцов П.В.[2]
[1]*АО «Спецхимия» Госкорпорации «Ростех»*
[2]*АО «НПП «Краснознамёнец» г. Санкт-Петербург, Россия*
[@] info@krzn.ru

В современном мире эффективность горнодобывающего производства связана, помимо прочего, с определением выбора способа изъятия грунта. Самым распространенным способом являются буровзрывные работы, однако конкретный способ инициирования взрывного процесса зависит от таких факторов, как безопасность, себестоимость, отсутствие сейсмического воздействия и так далее.

Целью работы является определение перспективного направления дальнейшего развития буровзрывных работ. Для этого поставлена задача проанализировать особенности инициирования взрывных процессов, оценить их эффективность, безопасность и надежность. В основе — анализ существующих способов инициирования взрывных процессов, расчеты интервала замедления, сейсмической безопасности, параметров инициирования для уступа, описание условий предотвращения подбоя взрывной сети.

Установлено, что первый способ инициирования является простым и дешевым, однако относительно опасным, а второй является безопасным, однако его работоспособность зависит от блуждающих токов различной природы. При этом, третий способ безопасен и нечувствителен к блуждающим токам, но не позволяет контролировать целостность цепи, а четвертый - высоконадежный и безопасный, но имеет высокую стоимость и требует особой квалификации работников.

Авторами предложено перспективное направление дальнейшего развития буровзрывных работ с учетом описанных особенностей инициирования взрывных процессов.

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ: НОВАЯ ХИМИЯ, СТАРЫЕ ВОПРОСЫ

Муравьев Н.В.[1,@]
[1]*ФИЦ ХФ РАН*
[@] nikita.muravyev@chph.ras.ru

Термическая стабильность органических соединений представляет несомненный фундаментальный и практический интерес. При этом, несмотря на значительное развитие методов синтеза и инструментальных методов анализа данных соединений, многие вопросы относительно термической стабильности, которые занимали исследователей еще в 60-е годы 20 века [1] остаются актуальными и сейчас. К таких нерешенным вопросам можно отнести: (1) получение кинетических данных для реальных сложных процессов термического разложения, (2) соотношение скоростей реакции в твердом и жидком состоянии (также известное, как тормозящий эффект кристаллической решетки), (3) прогнозирование термической стабильности в область меньших температур, по сравнению с экспериментальным диапазоном исследования (хранение веществ, их применение в химических реакциях), и в область больших температур (зажигание, горение). В настоящем докладе будут представлены результаты недавних работ автора, посвященные данным проблемам.

[1] Гарнер В., 1961, Химия твердого состояния. М.: ИИЛ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ВНЕДРЕНИИ В ПРОИЗВОДСТВО ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТАВОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Е.В. Романова, Л.И. Трутнева, Б.В. Певченко, Р.Г. Никитин
АО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск
romanovaev_tb@frpc-altay.ru

В настоящее время в РФ и мире в целом проводятся широкомасштабные исследования по созданию высокоэнергетических составов (ВЭС) нового поколения и технологий их производства. Решение данной проблемы представляет собой скоординированную совокупность поисковых и прикладных исследований, направленных на интенсификацию, повышение конкурентоспособности отечественного промышленного комплекса и смежных отраслей. В России перед предприятиями ракетно-космической и оборонной техники РФ поставлена задача создания высокоэффективных ВЭС и изделий на их основе в кратчайший срок. Постановка и необходимость решения данной задачи в настоящее время обусловлена комплексом технических, экономических и социальных проблем России; соответствует стратегическим национальным приоритетам страны в части повышения обороноспособности страны, повышения безопасности населения и обеспечения национальной безопасности. На нашем предприятии работы в направлении создания ВЭС нового поколения ведутся постоянно, однако ускоренное проведение работ в данном направлении не снижает требований, предъявляемых к комплексу характеристик данной продукции.

На нашем предприятии для решения поставленной проблемы разработан и внедрен системный подход, основанный на методологии математического и физического моделирования с использованием лабораторных или малоразмерных стендовых экспериментальных установок разных масштабов с последующей экстраполяцией полученных данных на полномасштабные промышленные объекты (технологические установки и т.п.) и условия их натурного функционирования. Результаты системного анализа по оценке безопасности при разработке и внедрении изделий в производство на нашем предприятии включают в себя следующие основные этапы [1-4]:

1) обработка исходных данных и компоновка ВЭС с учетом требуемого уровня характеристик, необходимого для создания образца ВЭС нового поколения;

2) разработка математической модели объекта исследования, включающей математическое описание объекта и химического процесса в нем;

3) изготовление лабораторных и/или малоразмерных экспериментальных образцов разных масштабов;

4) имитационное и физическое исследование поведения объекта в различных условиях (сценариев) его функционирования для анализа его степени безопасности (определению комплекса взрывчатых характеристик ВЭС на основе методик, ГОСТов, ОСТов и других отраслевых документов, принятых в РФ);

5) расчет коэффициента безопасности на основе оценки возможности развития процесса взрывчатого превращения и тяжести его последствий, оптимального выбора средств защиты персонала и инфраструктуры;

6) выдача заключения – рекомендации о допуске ВЭС к переработке в условиях опытного производства;

7) изготовление модельного или экспериментального крупногабаритного образца с подтверждением его характеристик на испытательном стенде (полигоне).

Каждый представленный этап реализует самостоятельную сложную научно-техническую задачу, требующую для своего решения использования специфических средств, методов, инструментов, наличия обеспечивающей инфраструктуры. Использование разработанного на нашем предприятии системного подхода представляет собой инновационное направление решения практической задачи обеспечения технологической безопасности при создании, изготовлении и внедрении в производство вновь разработанных изделий на основе ВЭС. Сочетание методов математического моделирования и обязательное использование экспериментальных методов исследования на лабораторных и экспериментальных установках разных масштабов позволяет значительно повысить качество и надежность результатов, значительно сократить временные и экономические затраты на проведение исследований, качественно изменить весь процесс исследования, резко повысить его эффективность.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований:

- значительно сократились финансовые, временные, человеческие ресурсы на проведение исследований;

- качественно изменился весь процесс отработки технологии изготовления новых рецептур ВЭС для изделий за счёт повышения эффективности внедрения их в опытное производство (сокращен срок отработки с 10 - 12 лет ранее разрабатываемых ВЭС по традиционной технологии, до 10-12 месяцев согласно внедрённому в настоящее время системному подходу);

- минимизирована возможность возникновения и развития процессов взрывчатого превращения путём оценки и предупреждения развития различных сценариев аварийных ситуаций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Романова, Е.В. Агломерация металлизированного горючего и накопление остатков продуктов сгорания в камерах двигателей на смесевых конденсированных составах с низкой скоростью горения / Е.В. Романова [и др.]// Доклады V Всероссийской научно- практической конференции молодых ученых и специалистов «Материалы и технологии XXI века», часть 2, 2015. − С.68-70.

2. Романова, Е.В. Прогнозирование возможности развития процессов взрывчатого превращения в смесевых ракетных твёрдых топливах при различных видах внешних воздействий по степени диспергирования высокоэнергетических материалов / Е.В. Романова, Б.В. Певченко, Р.Г. Никитин // Успехи в науке о детонации; под ред. С.М. Фролова. − 2022. − С.64-65.

3. Романова, Е.В. Зависимость скорости детонации взрывчатых составов от дисперсности алюминиевого порошка / Е.В. Романова [и др.] // Материалы Всероссийской конференция «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения». − Новосибирск: СО РАН, 2023. − 237с.

4. Сурначев, И.Н. Влияние размера частиц алюминия на скорость детонации взрывчатых составов / И.Н. Сурначев [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. − 2023. − № 5 (51). − С. 114-121

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ДОБЫЧИ СУЛЬФИДСОДЕРЖАЩИХ ГОРНЫХ ПОРОД

П. И. Савин, Б. В. Певченко, Е. А. Петров
АО «ФНПЦ «Алтай». Ул. Социалистическая, 1. г. Бийск, Россия
post@frpc-altay.ru; ogt-03@frpc-altay.ru

В области производства и добычи промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) актуальной является проблема низкой термической и химической стабильности взрывчатых составов, применяемых для добычи сульфидсодержащих горных пород. Компоненты ВВ (прежде всего аммиачная селитра) могут вступить в реакцию термического разложения с сульфидной рудой, при этом возможно задымление месторождения, возгорание ПВВ, переходящее в детонацию [1,2]. Для повышения безопасности применения ПВВ технический регламент таможенного союза (ТР ТС 028/2012) «О безопасности взрывчатых веществ и изделий на их основе» обязывает определять «совместимость ПВВ с агрессивными средами (для взрывчатых веществ, применяемых в сульфидных месторождениях)».

Поэтому к проектированию ПВВ, предназначенных для добычи сульфидсодержащих горных пород, необходимо подходить комплексно и использовать методы и методики взаимодополняющие друг друга:

- необходимо исследовать pH руд и скважинных вод, т.к. агрессивные сульфидные руды образуют с ПВВ сильнокислую среду с pH=1-2, которая является катализатором разложения взрывчатого состава;

- необходимо исследовать изменение температуры начала потери массы и температуры тепловых эффектов разложения с помощью дифференциально-термического анализа и термогравиметрического анализа, т.к. агрессивные сульфидные руды сдвигают данные показатели в низкотемпературную область;

- необходимо исследовать изменение давления продуктов разложения в течении времени на установке «Вулкан» в изотермическом режиме при температурах от комнатной до +80 °С. По результатам испытаний строятся графики зависимости давления образующихся газообразных продуктов от времени эксперимента. Химически ста-

бильными являются составы, в результате термостатирования которых, прекращается рост давления, и кривая роста выходит на «плато» в течение 24 часов;

- результаты, полученные на установке «Вулкан», могут быть дополнены исследованиями состава продуктов разложения на наличие/отсутствие оксидов азота, катализирующие процессы разложения ПВВ. Состав продуктов разложения определяется с помощью ампульно-хроматографического метода анализа с использованием газового хроматографа.

Для повышения безопасности применения ПВВ, при их проектировании в состав вводят компоненты-ингибиторы, повышающие термическую и химическую стойкость в сульфидной среде. Например, дифениламин, уротропин, мочевина оказывают стабилизирующее действие при концентрации более 2 %, но продукты реакций нейтрализации снижают взрывчатые характеристики ВВ и, например, в ряду Карбамид> Дифениламин> Уротропин каждый последующий член ряда снижает работоспособность ПВВ большим образом [3].

Снижение концентрации ингибитора до 0,75-1% достигается с помощью совместного применения мочевины и дифениламина. Это позволяет разрабатывать ПВВ с высокой химической и термической стабильностью в сульфидных средах [4].

Литература

[1]. Колганов, Е.В. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества – 1-я книга (составы и свойства) / Е.В. Колганов, В.А. Соснин. – Дзержинск Нижегородской области ГосНИИ «Кристалл», 2009. – 592 с.

[2]. Коваленко, И.Л. Взаимодействие эмульсионных взрывчатых веществ и их компонентов с сульфидными минералами [Текст]/ И.Л. Коваленко, В.П. Куприн //Взрывное дело. – 2010. – №103/60. – С. 154 – 159.

[3]. Маслов И.Ю. Влияние вида и содержание ингибитора на детонационные характеристики сульфидоустойчивых ЭВВ/ И. Ю. Маслов С.А. Горинов// Взрывное дело. – 2020. – 129/86. – С.188 – 205.

[4]. Савин П.И., Петров Е.А. Исследование химической стабильности промышленных ВВ в сульфидных рудах// Южно-сибирский научный вестник. – 2023. - № 5(51). – С.192-198.