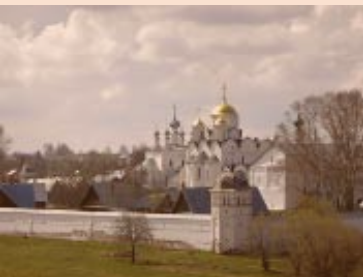


Научный Совет РАН по горению и взрыву
Отделение химии и наук о материалах РАН
Отделение энергетики, машиностроения, механики и
процессов управления РАН
при поддержке Российской академии наук и Федеральной
службы по экологическому, технологическому и атомному
надзору (РОСТЕХНАДЗОР)

ТЕЗИСЫ

XVI Всероссийского симпозиума по горению и взрыву

Суздаль 2022



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

**при поддержке
Российской академии наук и Федеральной
службы по экологическому, технологическому и
атомному надзору (РОСТЕХНАДЗОР)**

ТЕЗИСЫ

**XVI Всероссийского симпозиума
по горению и взрыву**

Тезисы XVI Всероссийского симпозиума по горению и взрыву

В сборнике представлены тезисы докладов XVI Всероссийского симпозиума по горению и взрыву (Суздаль, 4 – 9 сентября 2022 г). Доклады отражают современное состояние исследований в области физики горения и взрыва. В сборнике рассмотрены: термодинамика горения и взрыва, кинетика химических превращений в процессах горения и взрыва; ударные волны, горение и детонация в конденсированных средах, свойства вещества при высоких давлениях и температурах; макрокинетика и газодинамика реагирующих систем, научные основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза; математическое моделирование процессов физики горения и взрыва; методы экспериментальной диагностики быстропротекающих процессов в реагирующих средах: горение в авиационных, ракетных и поршневых двигателях; научные основы промышленного применения процессов горения и взрыва; наука о горении в интересах обеспечения пожарной безопасности; научное обеспечение промышленной безопасности производств, занятых разработкой, производством и применением ВМ.

Под редакцией:

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

ISBN 978-5-91845-099-4

ISBN 978-5-91845-099-4



9 785918 450994

ОГЛАВЛЕНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

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

<i>Арутюнов В.С.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАНО-ВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ В СВЕТЕ ИХ СВОЙСТВ И ОСОБЕННОСТЕЙ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ.....	15
<i>Байков А.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	16
<i>Банникова И.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ.....	18
<i>Вадченко С.Г.</i> ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ СМЕСЕЙ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА FeNiCoCrCu с Ti+C.....	20
<i>Волкова Н.Н.</i> КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ.....	22
<i>Гудкова И.Ю.</i> ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГИДРОКСИАММОНИЕВЫХ СОЛЕЙ НИТРОАМИННЫХ ПРОИЗВОДНЫХ НЕКОТОРЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ГЕТЕРОЦИКЛОВ В КАЧЕСТВЕ КОМПОНЕНТОВ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ.....	24
<i>Головастов С.В.</i> УСКОРЕНИЕ ФРОНТА ПЛАМЕНИ В КАНАЛЕ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПОРИСТЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ	26
<i>Денисюк А.П.</i> УСЛОВИЯ НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ КАТАЛИЗА ГОРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	27
<i>Ежов В.М.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА ИНДУКЦИИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ Н-ГЕПТАНА	28
<i>Ждан С.А.</i> НЕПРЕРЫВНАЯ ДЕТОНАЦИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СМЕСЕЙ КЕРОСИН-НАГРЕТЫЙ ВОЗДУХ	30
<i>Зудов В.Н.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПОТОКЕ.....	31
<i>Казаков А.И.</i> КИНЕТИКА ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ТЕРМО-РАСПАДЕ ПРОИЗВОДНЫХ АЗЕПИНОВ.....	33

<i>Казаков А.И.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ И ЭНТАЛЬПИИ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОИЗВОДНЫХ АЗЕПИНОВ	35
<i>Калмыков П.И.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ АКТИВНЫХ СВЯЗУЮЩИХ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ МИНУС 50 °С	37
<i>Кислов В.М.</i> ПОГЛОЩЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ СЕРЫ КАЛЬЦИЙ-СОДЕРЖАЩИМИ СОРБЕНТАМИ ПРИ ФИЛЬТРАЦИОННОМ ГОРЕНИИ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ МОДЕЛЬНЫХ СОСТАВОВ	40
<i>Кислов В.М.</i> ПОЛУЧЕНИЕ ПРОДУКТОВ НЕКАТАЛИТИЧЕСКОЙ И КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ С НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ СМОЛЫ МЕТОДОМ ПАРЦИАЛЬНОГО ОКИСЛЕНИЯ ВОЗДУХОМ	42
<i>Козлов А.С.</i> ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТЕРМОСТОЙКОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА РУХ	44
<i>Колотушкин Р.Н.</i> ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ САЖИ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ В ПРЕДВАРИТЕЛЬНО-ПЕРЕМЕШАННОМ ПЛАМЕНИ	46
<i>Коротких А.Г.</i> ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ БОРСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИЙ.....	48
<i>Кориунова М.Р.</i> ОБРАЗОВАНИЕ ПАУ И САЖИ ПРИ ПИРОЛИЗЕ ЭТИЛЕНА С ДОБАВКАМИ БИОТОПЛИВ.....	50
<i>Лавренев В.А.</i> НИЗКОУГЛЕРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ.....	52
<i>Лазарев П.А.</i> ПОЛУЧЕНИЕ БЕСПОРИСТОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ Ti-Al-Si МЕТОДОМ СВС-КОМПАКТИРОВАНИЯ	54
<i>Лемперт Д.Б.</i> АЛЛИЛЗАМЕЩЕННЫЕ ФУРАЗАНОАЗЕПИНОВ. СТРУКТУРА, ЭНТАЛЬПИЯ ОБРАЗОВАНИЯ, БАЛЛИСТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ.....	56
<i>Лемперт Д.Б.</i> ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНЫЕ 1,2,3,4-ТЕТРАЗИНЫ С N-ОКСИДНОЙ ГРУППОЙ КАК КОМПОНЕНТЫ СМЕСЕВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	58
<i>Лемперт Д.Б.</i> ОПТИМАЛЬНЫЙ СОСТАВ СМЕСЕВОГО ТОПЛИВА БЕЗ МЕТАЛЛА С МАКСИМАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНОЙ УДЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА КАК ФУНКЦИЯ ЭНТАЛЬПИИ ОБРАЗОВАНИЯ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ОКИСЛИТЕЛЯ.....	61
<i>Малинин В.И.</i> РАСЧЁТ ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В СМЕСИ «O ₂ +He» С УЧЁТОМ ДИССОЦИАЦИИ КИСЛОРОДА В ПРЕДПЛАМЕННОЙ ОБЛАСТИ	63
<i>Мансуров З.А.</i> ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА САЖЕОБРАЗОВАНИЕ ПРИ ГОРЕНИИ УГЛЕВОДОРОДОВ	65

<i>Мелешко В.Ю.</i> ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЦЕПТУР И ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ПАСТООБРАЗНЫХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ.....	67
<i>Мелешко В.Ю.</i> ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЕЩЕСТВ С ВЫСОКОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ	69
<i>Набатова А.В.</i> ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ К УДАРУ И СКОРОСТЬ РЕАКЦИИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ	71
<i>Никитин В.Ф.</i> ИНГИБИРОВАНИЕ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ ДЕТОНАЦИИ ГАЗОВОЙ ДОБАВКОЙ	73
<i>Николаева Е.В.</i> ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ГАЗОФАЗНОЙ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ <i>МОНО</i> -ЗАМЕЩЕННЫХ НИТРОАРЕНОВ С ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИМИ ЗАМЕСТИТЕЛЯМИ.....	75
<i>Пехотин К.В.</i> ТЕРМОЛИЗ ОКТОГЕНА В ПРИСУТСТВИИ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ.....	77
<i>Пинчук В.А.</i> АКУСТИКА ГОРЕНИЯ И ЕЁ ПРОЯВЛЕНИЯ	79
<i>Полианчик Е.В.</i> ВОЗМОЖНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ПАРОВОЙ КОНВЕРСИИ УГЛЕВОДОРОДОВ В СИНТЕЗ-ГАЗ.....	81
<i>Рогаев К.С.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПЛОТНОГО ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ ПОСТОЯННОГО ОБЪЕМА	83
<i>Салганский Е.А.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ УРОТРОПИНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ФИЛЬТРУЮЩЕГОСЯ ГАЗА С ПОЛУЧЕНИЕМ ГОРЮЧИХ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ	85
<i>Савватимский А.И.</i> ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТУГОПЛАВКИХ КАРБИДОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ (ДО 5000К)	86
<i>Синдицкий В.П.</i> ОСОБЕННОСТИ И ЗАГАДКИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАСПАДА И ГОРЕНИЯ 1,1-ДИАМИНО-2,2-ДИНИТРОЭТИЛЕНА	88
<i>Соколов С.Д.</i> ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В СОСТАВАХ ВЭМ	90
<i>Станкевич А.В.</i> МЕХАНИЗМ, КИНЕТИКА, ТЕРМОДИНАМИКА РАЗЛОЖЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ СМЕСЕЙ ФТОРИДА КОБАЛЬТА (III) С КРЕМНИЕМ И БОРОМ.....	91

<i>Станкевич А.В.</i> МЕХАНИЗМ, КИНЕТИКА И ТЕРМОДИНАМИКА РАЗЛОЖЕНИЯ ЭНЕРГОЁМКИХ ПРОИЗВОДНЫХ [1,2,4]ТРИАЗОЛО[4,3-В][1,2,4,5]ТЕТРАЗИНА.....	93
<i>Тен К.А.</i> ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЫЛЕВОГО ОБЛАКА ИЗ ВОЛЬФРАМА. СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК.....	94
<i>Тереза А.М.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПЛАМЕНИ В БЕДНЫХ СМЕСЯХ ВОДОРОДА С ВОЗДУХОМ.....	95
<i>Тесленко В.С.</i> ВЛИЯНИЕ N ИСКРОВЫХ ИНИЦИАТОРОВ НА КИНЕТИКУ СЖИГАНИЯ ПРОПАН-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ.....	97
<i>Ткачев Д.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТАВОВ ДЛЯ АДДИТИВНОЙ ПЕЧАТИ.....	100
<i>Фалеева Ю.М.</i> ВЛИЯНИЕ МЕЖКОМПОНЕНТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА.....	101
<i>Федотов И.О.</i> О ВЛИЯНИИ СРЕДСТВ ОГНЕЗАЩИТЫ НА КЛЮЧЕВЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ОГНЕСТОЙКОСТЬ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	103
<i>Филимонова Е.А.</i> РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ В ГИБРИДНОМ КОМПРЕССИОННОМ ДВИГАТЕЛЕ С ИНИЦИАЦИЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ КОРОННЫМ РАЗРЯДОМ.....	105
<i>Чернов А.А.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИПОТЕЗЫ ЗЕЛЬДОВИЧА-БАРЕНБЛАТТА.....	107
<i>Шмаков А.Г.</i> ХИМИЯ И МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ.....	109
<i>Якуш С.Е.</i> РЕДУЦИРОВАННАЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ СХЕМА ГАЗОФАЗНОГО ГОРЕНИЯ МЕТИЛМЕТАКРИЛАТА.....	111

**УДАРНЫЕ ВОЛНЫ, ГОРЕНИЕ И ДЕТОНАЦИЯ
В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ, СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА
ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ**

<i>Бирюкова М.А.</i> ПОСТРОЕНИЕ УДАРНЫХ АДИАБАТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ИЗОТЕРМИЧЕСКОМУ СЖАТИЮ.....	113
<i>Быстров Н.С.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОМЕРОВ ПЕНТАНОЛА С МОЛЕКУЛЯРНЫМ КИСЛОРОДОМ ЗА УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ АРАС-МЕТОДОМ.....	115

<i>Гордеев В.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОТЕРМИТНОЙ КОМПОЗИЦИИ $\text{Vi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me}-3\text{N}$ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ РЕЦЕПТУРНОЙ КОМПОНОВКЕ.....	117
<i>Долгобородов А.Ю.</i> ИМПУЛЬСНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ НАНОТЕМИТОВ.....	119
<i>Дудин С.В.</i> СЖАТИЕ АРГОНА НА ВЗРЫВНОЙ МОДЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ.....	120
<i>Жуков А.Н.</i> РЕНТГЕНДИФРАКЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО УДАРНОГО СЖАТИЯ НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ КВАРЦА.....	122
<i>Забелинский И.Е.</i> РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УДАРНО НАГРЕТОГО ВОЗДУХА В ШИРОКОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ.....	124
<i>Зиборов В.С.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В МАТЕРИАЛЕ ПОДОБНОМ ВОДНОЙ ЭМУЛЬСИИ.....	127
<i>Зубарева А.Н.</i> О КОРРЕЛЯЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ДЕТОНАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ЭМУЛЬСИОННОГО ВВ НА ОСНОВЕ НИТРАТА АММОНИЯ И ТРИНИТРОТОЛУОЛА.....	128
<i>Клёнов А.И.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ СО СПЛОШНОЙ И ОБЪЁМНО-ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ.....	130
<i>Ковалев А.Е.</i> АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО – ВРЕМЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ МАРКИ 12Х18Н10Т И МЕДИ МАРКИ М1.....	131
<i>Козлов П.В.</i> ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕН ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПРОПАН-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ НА УДАРНОЙ ТРУБЕ.....	132
<i>Кривошеев П.Н.</i> О ДИНАМИКЕ, СТРУКТУРЕ И ФОРМЕ ФРОНТА РЕАКЦИИ ПРИ УСКОРЕНИИ ПЛАМЕНИ.....	135
<i>Мочалова В.М.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИИ В СМЕСИ НИТРОМЕТАН/МИКРОСФЕРЫ.....	137
<i>Наймарк О.Б.</i> О НЕКОТОРЫХ АВТОМОДЕЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ФОРМИРОВАНИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ФРОНТОВ И РАЗРУШЕНИЯ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ.....	139
<i>Радченко А.В.</i> ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ И УГЛА АТАКИ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТАЛЬНЫХ И ТЯЖЕЛОСПЛАВНЫХ УДАРНИКОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПРЕГРАДАМИ.....	141

<i>Радченко А.В.</i> РАЗРУШЕНИЕ АНИЗОТРОПНОЙ КОМПОЗИТНОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ НАГРУЗКАХ.....	143
<i>Рапова Д.Ю.</i> ОСОБЕННОСТИ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННОГО ФРОНТА В ЖИДКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ.....	145
<i>Смирнов Е.Б.</i> УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ВВ В ФОРМЕ JWL НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО СХЕМЕ CYLINDRTEST С СИНХРОТРОННОЙ ДИАГНОСТИКОЙ.....	147
<i>Соковилов М.А.</i> ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ СПЛАВОВ ЛОКАЛИЗОВАННЫМ СДВИГОМ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ НАГРУЗКАХ	148
<i>Федоров А.В.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ, СОСТОЯНИЙ ПИКА НЕЙМАНА И ЧЕПМЕНА-ЖУГЕ В ГОМОГЕННЫХ ВВ.....	150
<i>Султанов В.Г.</i> ФОРМИРОВАНИЕ СХОДЯЩЕЙСЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ С ОБРАТНОЙ КРИВИЗНОЙ ФРОНТА	151
<i>Шорохов Е.В.</i> О ПЕРЕДАЧЕ ДЕТОНАЦИИ ЧЕРЕЗ ЗАЗОР В НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОМ ВВ.....	152
<i>Якушев В.В.</i> ПОВЫШЕННОЕ УПЛОТНЕНИЕ ПОРИСТОГО АЛЮМИНИДА НИКЕЛЯ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ.....	154

МАКРОКИНЕТИКА И ГАЗОДИНАМИКА РЕАГИРУЮЩИХ СИСТЕМ, НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

<i>Алымов М.И.</i> МАТЕРИАЛООБРАЗУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА	155
<i>Грачёв В.В.</i> РЕЖИМЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ В СВС-РЕАКТОРАХ.....	156
<i>Камынина О.К.</i> СВС СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НИОБИЯ И ГАФНИЯ	157
<i>Полианчик Е.В.</i> РЕАКТОР SWISS ROLL ДЛЯ СЖИГАНИЯ НИЗКОКАЛОРИЙНЫХ ГАЗОВ: КАЧЕСТВЕННАЯ ТЕОРИЯ.....	159
<i>Поляков М.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ CoCrFeNiCu НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ВЫСКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА	161
<i>Рогачев А.С.</i> СВС В НАНОСИСТЕМАХ: НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДА СИНТЕЗА ГОРЕНИЕМ.....	163

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЗИКИ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

<i>Володин В.В.</i> СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ПОЛУЧЕННОЙ СКОРОСТИ РОСТА ВОЗМУЩЕНИЙ ФРОНТА	
--------------------------------------------------------------------------------------------	--

МЕТАНО-ВОЗДУШНОГО ПЛАМЕНИ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ.....	165
<i>Гулбоев Б.Дж.</i> ФИЛЬТРАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ МЕТАНОВОЗ- ДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕНОСА.....	167
<i>Кабиров М.М.</i> ТЕПЛОВОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ГАЗОВОЙ СМЕСИ В ИНЕРТНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕ- ДЕ.....	169
<i>Кабиров М.М.</i> ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОГО ДАВЛЕНИЯ СМЕСИ НА ПАРАМЕТРЫ ВОЛНЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВ.....	172
<i>Касимов А.Р.</i> О РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ.....	174
<i>Киверин А.Д.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЕНИЯ ПЛАМЕНИ И ПЕРЕХОДА В ДЕТОНАЦИЮ - "ВЕЧНОЗЕЛЕНАЯ" ТЕМА АКА- ДЕМИКА ФОРТОВА.....	176
<i>Крайнов А.Ю.</i> О ВЛИЯНИИ ГОРЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ВЗРЫВА В ШАХТЕ ...	177
<i>Крайнов А.Ю.</i> О ВЛИЯНИИ ГАРМОНИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАН- НОГО СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА.....	179
<i>Михальченко Е.В.</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНА- ЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С НЕПРЕРЫВНОЙ ДЕТОНАЦИОН- НОЙ ВОЛНОЙ.....	181
<i>Моисеева К.М.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАНА ПРИ НЕДОСТАТКЕ ВОЗДУХА НА ПОРИСТОЙ МАТРИЦЕ.....	183
<i>Моисеева К.М.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ УГЛЕ-МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С УЧЕТОМ ПОДЪЕМА ПЫЛИ.....	184
<i>Размыслов А.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАНА ПРИ НЕДОСТАТКЕ ВОЗДУХА НА ПОРИСТОЙ МАТРИЦЕ.....	187
<i>Рашковский С.А.</i> ОБРАЗОВАНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ СМЕСЕВЫХ ТВЕР- ДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ.....	188
<i>Самойленко Н.Г.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ ЭКЗО- ТЕРМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ В ПРОТИВОТОЧ- НОМ РЕАКТОРЕ ВЫТЕСНЕНИЯ.....	190
<i>Скрылева Е.И.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОГО ВЫ- ТЕСНЕНИЯ НЕФТИ С УЧЁТОМ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ МЕЖДУ ФАЗАМИ.....	191

<i>Смирнов Н.Н.</i> ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ В МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СРЕДАХ	193
<i>Смыгалина А.Е.</i> САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ ВОДОРОДА ПРИ ЕГО ИСТЕЧЕНИИ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ В ОКИСЛИТЕЛЬ	194
<i>Стамов Л.И.</i> ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ ФОКУСИРОВКЕ УДАРНЫХ ВОЛН	197
<i>Федорова Н.Н.</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ЗАПИРАНИЯ КАНАЛА ПРИ ГОРЕНИИ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ.....	199
<i>Червакова А.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖЕНИЯ КОНГЛОМЕРАТОВ ЧАСТИЦ БОРА В УСКОРЯЮЩЕМся ПОТОКЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАЧАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ	200
<i>Яковенко И.С.</i> ВЛИЯНИЕ ВЗВЕШЕННЫХ МИКРОКАПЕЛЬ ВОДЫ НА УСКОРЕНИЕ ПЛАМЕНИ И ПЕРЕХОД К ДЕТОНАЦИИ В ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ НА ОСНОВЕ ВОДОРОДА	202
<i>Ярков А.В.</i> МЕХАНИЗМЫ НЕСТАЦИОНАРНОГО УСКОРЕНИЯ ПЛАМЕНИ И ПЕРЕХОДА К ДЕТОНАЦИИ В ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ НА ОСНОВЕ АЦЕТИЛЕНА	204

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В РЕАГИРУЮЩИХ СРЕДАХ

<i>Бенин А.И.</i> ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	206
<i>Емельянов А.Н.</i> СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ В ДИНАМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ.....	208
<i>Загнитъко А.В.</i> ИНФРАКРАСНО-ОПТИЧЕСКИЕ АНАЛИЗАТОРЫ В ЭКСПРЕСС МОНИТОРИНГЕ ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ ПОЖАРООПАСНЫХ СЖИЖЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ.....	210
<i>Рудинский А.В.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ	212
<i>Савватимский А.И.</i> ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ.....	214
<i>Стрижак П.А.</i> ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОЧАГА ВОЗГОРАНИЯ В ПОМЕЩЕНИЯХ НА СТАДИИ ИНИЦИИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ГОРЕНИЯ	216

<i>Федоров Ю.И.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ.....	218
<i>Шимченко С.Ю.</i> ИЗМЕРЕНИЕ ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ НА УСТАНОВКЕ БЫСТРОГО СЖАТИЯ.....	220

**ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ
НАУКИ О ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА**

ГОРЕНИЕ В АВИАЦИОННЫХ, РАКЕТНЫХ И ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

<i>Луценко Н.А.</i> О МОДЕЛИРОВАНИИ ГАЗИФИКАЦИИ ДВУХСЛОЙНОГО ПОРИСТОГО ПОЛИМЕРА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА	222
<i>Мигалин К.В.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ АВИАЦИИ.....	224
<i>Папырин П.В.</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ПРЯМОТОЧНОГО ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ПОРОШКООБРАЗНОМ АЛЮМИНИИ.....	227
<i>Рудинский А.В.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРИБАЛЛИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГРД ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ	229
<i>Тихонов О.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРИЙНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТУ НК-38СТ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ...	230
<i>Тупикин А.В.</i> ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНЫХ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОДИНАМИКОЙ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ СО СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ ТЕЧЕНИЯ НА ВХОДЕ.....	232
<i>Федотова К.В.</i> ЧИСЛЕННОЕ ИСЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРЕНИЯ В КАМЕРЕ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ НА ГАЗООБРАЗНЫХ КОМПОНЕНТАХ КИСЛОРОД-МЕТАН	234
<i>Шайдуллин Р.А.</i> РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В КАМЕРЕ РДТТ ПРИ ГОРЕНИИ ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ И ПОЛИБУТАДИЕНОВОГО КАУЧУКА.....	236
<i>Шпара А.П.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НОРМАЛЬНОЙ	

СКОРОСТИ ПЛАМЕНИ В АЭРОЗВЕСИ ЧАСТИЦ БОРА.....	237
<i>Ягодников Д.А.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ РАБОЧЕГО ТЕЛА МОДЕЛЬНЫХ РАКЕТНЫХ И РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	239

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

<i>Бондаренко С.Ю.</i> О ВЛИЯНИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ИСТЕЧЕНИИ УДАРНО- СЖАТОГО ГАЗА В СВАРОЧНОМ ЗАЗОРЕ НА ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ	241
<i>Вогман Л.П.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИВОВ КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ, ОБРАЗОВАНИЯ И РАСSEИВАНИЯ ПАРОВОЗДУШНЫХ ОБЛАКОВ В АТМОСФЕРЕ	243
<i>Давыдович Д.Ю.</i> ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПИРОЛИЗА ПЛАСТИКА И СЖИГАНИЯ ПИРОЛИЗНЫХ ГАЗОВ ДЛЯ РЕ- КУПЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ	246
<i>Димухаметов Р.Р.</i> ПЛЕНОЧНЫЕ ПИРОЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ	248
<i>Иордан Ю.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ УТИЛИЗАЦИИ ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ РАКЕТ ПУТЕМ ИХ СЖИГАНИЯ.....	250
<i>Козлов А.С.</i> СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕРМОСТОЙКОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА РУХ	251
<i>Котомин А.А.</i> КРИТИЧЕСКИЕ ДИАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ СУСПЕНЗИЙ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В НИТРОМЕТАНЕ	253
<i>Мазной А.С.</i> СТОЙКОСТЬ К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОКИСЛЕНИЮ ГАЗОПРОНИЦАЕМЫХ СВС- ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ.....	255
<i>Нарыжный С.Ю.</i> ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ НА ГОРЕНИЕ СМЕСЕВЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ	257
<i>Нарыжный С.Ю.</i> ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ДЕТОНАЦИОННЫХ НАНОАЛМАЗОВ (ДНА) НА ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ СМЕСЕВЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ	258
<i>Первухина О.Л.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СМЕСЕЙ ПОРИСТОЙ АММИАЧ- НОЙ СЕЛИТРЫ С ДИЗЕЛЬНЫМ ТОПЛИВОМ.....	259

<i>Садкин И.С.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУЕ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА В УСЛОВИЯХ ТОПОЧНОГО ПРОСТРАНСТВА	261
<i>Тарасов Г.А.</i> К РАЗРАБОТКЕ МЕТОДА ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА	263
<i>Штерцер А.А.</i> ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА В ИМПУЛЬСНОМ ГАЗОДЕТОНАЦИОННОМ АППАРАТЕ.....	265

НАУКА О ГОРЕНИИ В ИНТЕРЕСАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

<i>Болодьян И.А.</i> ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПОТУХАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ	267
<i>Долматов В.Ю.</i> ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ВЕЩЕСТВ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ КИСЛОРОДНЫМ БАЛАНСОМ	269
<i>Жданова А.О.</i> ВЛИЯНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ДОБАВОК К ВОДЕ НА ПРОЦЕСС ЛОКАЛИЗАЦИИ И ЛИКВИДАЦИИ ГОРЕНИЯ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ.....	271
<i>Копылов Н.П.</i> ГОРЕНИЕ И ТУШЕНИЕ МЕТАНОЛА	273
<i>Копылов С.Н.</i> МЕХАНИЗМ ДЕСТРУКЦИИ ГЕПТАФТОРПРОПАНА В ПЛАМЕНИ СМЕСЕЙ МЕТАНА С КИСЛОРОДОМ.....	276
<i>Луценко Н.А.</i> ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ В ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ РЕСПИРАТОРАХ, ЗАЩИЩАЮЩИХ ОРГАНЫ ДЫХАНИЯ ОТ ОЖОГОВ.....	278
<i>Полетаев Н.Л.</i> ОБ ОЦЕНКЕ ВЗРЫВООПАСНОСТИ АЭРОВЗВЕСИ	280
<i>Полетаев Н.Л.</i> ОЦЕНКА ОДНОРОДНОСТИ БОГАТОЙ АЭРОВЗВЕСИ.....	282
<i>Шебеко Ю.Н.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФТОРИРОВАННЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ГОРЕНИЕ СМЕСЕЙ ВОДОРОД-ЗАКИСЬ АЗОТА И МЕТАН-ЗАКИСЬ АЗОТА	284

НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВ, ЗАНЯТЫХ РАЗРАБОТКОЙ, ПРОИЗВОДСТВОМ И ПРИМЕНЕНИЕМ ВМ

<i>Ефремовцев Н.Н.</i> ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДРОБЯЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА ВВ РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ.....	286
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАНОВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ В СВЕТЕ ИХ СВОЙСТВ И ОСОБЕННОСТЕЙ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Арутюнов В.С.^{1,2,@}

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

²*Институт проблем химической физики Российской академии наук*
@ v_arutyunov@mail.ru

Невозможность решения проблемы изменения климата переходом на возобновляемые источники энергии (ВИЭ) вынудило обратить внимание на водородную энергетику. В связи с этим в РФ принят план «Развитие водородной энергетики в РФ до 2024 г.». Однако при любой технологии производства водорода общие затраты энергии и ее стоимость для потребителя будут выше, чем при использовании первичных источников энергии. А для полной замены углеводородов потребуется ~10 млрд т H₂/г., что в 100 раз превышает его текущее производство. Этот водород необходимо получать либо на основе неуглеродных источников, либо с секвестрированием образующегося CO₂. Поскольку все существующие ВИЭ могут производить не более 50 млн т H₂/г, единственный реальный источник необходимого объема H₂ – конверсия ископаемых углеводородов. Кроме того, водород – это низкокалорийное топливо с объемной теплотой сгорания жидкого H₂ в 2,5 раза ниже, чем CH₄, в 4 раза ниже, чем бензина, газообразного H₂ в 4 раза ниже, чем CH₄.

Водородное охрупчивание материалов и высокие затраты энергии на компримирование H₂ (в 8,5 раз выше, чем для CH₄) делают существующие газопроводы малоприспособленными для транспортировки H₂. Единственный экономически оправданный способ транспортировки промышленных объемов H₂ – трубопроводная транспортировка метановодородных смесей. Однако это приведет к снижению объема передаваемой энергии при неизбежном увеличении затрат на ее транспортировку. Наиболее острые проблемы – выбор материалов трубопроводов и арматуры и существенный рост затрат на сооружение, эксплуатацию и обеспечение мер безопасности. Горение и воспламенение метановодородных смесей, особенно в наиболее важной области умеренных температур $T < 1000$ К, связано с рядом еще недостаточно исследованных явлений, которые при изменении температуры, давления или других параметров могут приводить к нештатным потенциально опасным ситуациям.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Л.С. Яновский^{1,2}, А.В. Байков^{1,2}, А.Ф. Жолудев², Г.Е. Заславский²,
М.Б. Кислов², И.В. Пучковский², К.В. Попов², М.С. Шаров^{1,2}

¹ ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» РФ. г. Москва

² ФГБУН Институт проблем химической физики. РФ. МО

г. Черноголовка

В докладе представлена математическая модель горения композиционного энергетического материала с высоким содержанием металла, предназначенного для газогенератора автономной комбинированной энергетической установки. Модель ориентирована на случай горения энергетических материалов (ЭМ) с ведущей реакцией в конденсированной фазе, когда процессы в конденсированной и газовой фазах протекают независимо друг от друга. Модель построена на численном решении уравнения теплопроводности для конденсированной фазы (К-фазы), в которой для устранения «жесткости» получаемого решения, производится переход от пространственной координаты x , к температуре среды T как аргументу уравнения. Показано, что в результате такого перехода уравнение теплопроводности приобретает форму уравнения Абеля. Рассматриваемая модель учитывает, что запаса тепла, содержащегося в окислителе, входящем в состав ЭМ, не хватает для поддержания теплового баланса в К-фазе, который необходим для поддержания процесса горения. В качестве дополнительного источника энергии в модели рассматривается окисление металла, непосредственно в условиях К-фазы. В модели используется предположение, что дополнительное тепловыделение от окисления металла локализуется в порах, которые образуются в К-фазе ЭМ по мере разложения горючего и окислителя. Для описания процессов в К-фазе используются современные представления о физико-химических процессах в пористой среде. В докладе приводятся результаты экспериментальных исследований показывающие, что окисление металла в условиях К-фазы происходит преимущественно за счет реакции металла с углеродом, который образуется при разложении горючего – связующего вещества. Окисление металла кислородом, выделяющимся при разложении окислителя, в условиях К-фазы играет второстепенную роль. Приводятся результаты численных расчетов, показывающие изменение основных параметров в К-фазе и локализацию процессов тепловыделения в ней. Приводятся результаты экспериментальных

исследований модельных образцов ЭМ и результаты соответствующих численных расчетов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Банникова И.А.^{1,®}, Уваров С.В.¹, Зубарева А.Н.², Баяндин Ю.В.¹,
Уткин А.В.², Наймарк О.Б.¹

¹ИМСС УрО РАН, Пермь, Россия
²ИПХФ РАН, Черноголовка, Россия
®malgacheva@icmm.ru

Применение ударно-волнового нагружения и систем регистрации высокого временного разрешения дают уникальную возможность для разработки методов исследования реологических свойств и разрушения конденсированных сред и их связи с многомасштабными механизмами структурной релаксации и разрушения. Целью работы является экспериментальное исследование релаксационных свойств жидкостей (в том числе полярных: дистиллированная вода, глицерин, пропантоносители, и неполярных: силиконовое, трансформаторное масло, додекан) при сжатии и растяжении в условиях ударно-волновых воздействий для установления связи автомодельных закономерностей разрушения (Рис. 1, $\dot{\epsilon}^* \sim P_0^\beta$), асимптотических закономерностей изменения вязкости (Рис. 2, $\eta^* \sim \dot{\epsilon}^{*\kappa}$). В работе приводятся результаты обработки профилей скорости свободной поверхности жидкостей, подвергнутых ударно-волновому нагружению методом электровзрыва проводника (ЭВП) и использованием техники взрывного генератора (ВГ), реализованных на базе институтов ИМСС УрО РАН (Пермь) и ИПХФ РАН (Черноголовка) [1, 2, 3].

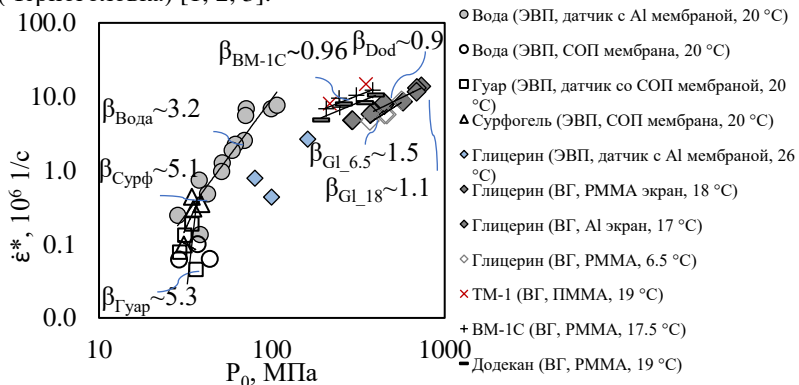


Рис. 1. Зависимость скорости деформации на фронте волны сжатия от амплитуды импульса сжатия (log-log оси).

Установленные закономерности реологического поведения, разрушения жидкостей обнаруживают признаки автомодельности, характерные для поведения твердых тел (степенная универсальность квазипластического фронта $\epsilon^* \sim P_0^\beta$, зависимости откольной прочности $P_S \sim \epsilon^\alpha$, асимптотики вязкости $\eta^* \sim \epsilon^{*\kappa}$), позволяют установить связь механизмов структурной релаксации с особенностями формирования волновых фронтов в жидкостях.

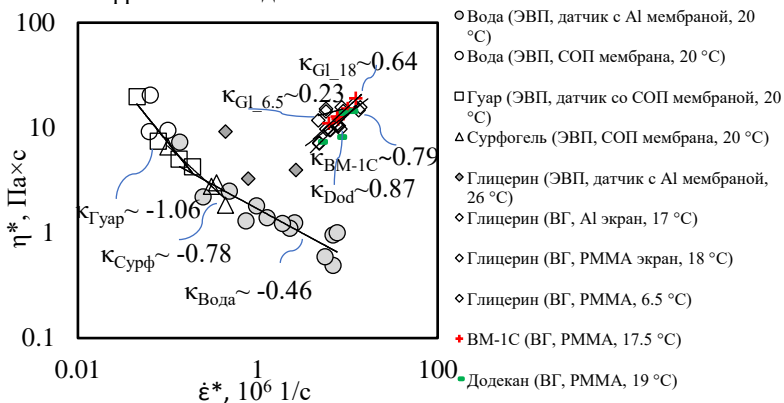


Рис. 2. Изменение сдвиговой вязкости жидкостей в зависимости от скорости деформации (log-log оси).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-48-590016.

[1] Банникова И.А., Зубарева А.Н., Уткин А.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б., 2016, Физ. Мезомех. **19**(3). 69-77.
 [2] Банникова И.А., Зубарева А.Н., Уткин А.В., 2018, ЖТФ. **88**(4). 514-520.
 [3] Bannikova I.A., Uvarov S.V., Bayandin Y.V., 2021, Procedia Structural Integrity. **33**. 1146–1151.

**ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ СМЕСЕЙ
ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА FeNiCoCrCu с Ti+C**
Вадченко С.Г. @₂ Вергунова Ю.С., Рогачев А.С., Ковалев И.Д.,
Мухина Н.И.

*Институт структурной макрокинетики и проблем
материаловедения им. А. Г. Мерджанова РАН,
г. Черноголовка, РФ
@ vadchenko@ism.ac.ru*

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) состоят обычно из пяти металлов, концентрация которых варьируется от 5 до 35 ат. %. ВЭС, как правило, формируются в виде структуры твердого раствора – ОЦК, ГЦК, ГПУ или их комбинаций, стабилизированных за счет высокой конфигурационной энтропии их смешения. Эти сплавы могут быть использованы в качестве связующего материала для получения металлокерамики.

В данной работе исследована зависимость температуры воспламенения, скорости горения и состава формирующихся продуктов от концентрации Ti+C в смесях с порошком высокоэнтропийного сплава FeNiCoCrCu или с исходной смесью образующих его металлов (MIX). ВЭС получали методом механической активации (МА) смеси порошков металлов в среде аргона. При температуре плавления высокоэнтропийный сплав FeNiCoCrCu распадается на несколько фаз, но основу сплавов MIX и ВЭС после кристаллизации составляет 5-компонентная фаза с усредненной формулой $Cu_{1.2}Fe_{1.4}Ni_{1.4}Co_{1.4}Cr$. Эксперименты по воспламенению и горению смесей MIX и ВЭС с титаном и углеродом проводили в аргоне при атмосферном давлении.

Температура воспламенения образцов из смеси Ti+C составляет около 1200 °С. При уменьшении концентрации Ti+C до 80 масс.% температура воспламенения смесей с металлами снижается до 1080 °С, что может быть обусловлено увеличением концентрации меди и улучшением контактов между частицами при ее плавлении. Кроме того, начинается реакция титана с медью, которая, несмотря на небольшую энтальпию, может инициировать реакцию взаимодействия титана с углеродом.

Т.к. при содержании Ti+C в смеси менее 60% при комнатной температуре образцы не горели или горели нестабильно, все эксперименты по горению проводили при начальной температуре

500±10°C. Нижний предел горения смесей при этой начальной температуре образцов наступает при концентрации Ti+C в смеси менее 30 масс. %. Скорость горения, температура воспламенения смесей и максимальная температура, достигаемая при тепловом взрыве смеси растут с увеличением концентрации Ti+C. Основной вклад в тепловыделение при воспламенении и горении смесей вносит реакция образования карбида титана. Механизмы реакции образования композита при использовании МІХ и ВЭС в качестве связки различаются, что связано с различием структуры смесей с (Ti+C). В первом случае поверхность контакта между частицами титана и углерода значительно меньше, т.к. элементарная ячейка смеси состоит из частиц металлов и углерода, распределенного между ними. Если предположить, что частицы металлов имеют близкие размеры, то на одну частицу титана в ячейке в зависимости от концентрации (Ti+C) приходится приблизительно от 1 (при x =90% Ti+C) до 20 (при x =10% Ti+C) частиц других металлов. В последнем случае частицу титана окружает малая часть углерода, т.е. смесь (Ti+C) оказывается разбавленной как в тепловом, так и в концентрационном (Ti/C) отношении. По мере уменьшения концентрации (Ti+C) фронтальный механизм распространения волны горения меняется на перколяционный. В случае использования порошка ВЭС, частицы которого в несколько раз больше частиц исходных металлов, имеет место только тепловое разбавление и переход от фронтального к перколяционному механизму горения происходит при меньшей концентрации (Ti+C).

По результатам сканирующей электронной микроскопии рассчитана объемная концентрация числа частиц TiC в образцах после кристаллизации расплава. В сплаве со связкой из ВЭС количество частиц TiC в единице объема в 1,5-3 раза больше, чем в сплаве со связкой из МІХ, а размер частиц соответственно меньше. С увеличением концентрации (Ti+C) от 30 до 40 масс.% в смеси с ВЭС число частиц TiC в единице объема уменьшается. В смеси с МІХ число частиц в единице объема проходит через минимум. Это связано с двумя противоположными процессами – увеличением вероятности зарождения частиц карбида титана и их коагуляцией.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-13-00277).

КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Волкова Н.Н.^{1,@}, Казаков А.И.¹, Чуканов Н.В.¹, Шилов Г.В.¹,

Яновский Л.С.^{1,2}

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

²*Московский авиационный институт, г. Москва, Россия.*

@nvolkova@icp.ac.ru

При изучении твердофазных реакций большое внимание уделяется особенностям термораспада соединений, находящихся в кристаллическом состоянии. В этом случае наиболее исследованы процессы, протекающие при нормальном или повышенном давлении, закономерности же термораспада твердых соединений и характер изменения их кристаллической структуры в условиях низкого давления изучены недостаточно. Так, термостабильность перспективного взрывчатого соединения 1,1-диамино-2,2-динитроэтилена (апрол, FOX-7) принято считать достаточно высокой. Тем не менее, следует отметить, что при вакуумировании реакционной ячейки скорость тепловыделения при разложении кристаллов FOX-7 резко возрастает, и термораспад принимает взрывной характер [1]. Это явление носит критический характер и определяется размером кристаллов, диаметром реакционной ячейки, давлением в системе. В неизотермических условиях «взрыв» с резким выбросом частиц вещества происходит при достижении определенной температуры, (отличающейся от справочных данных), а в изотермических условиях – после некоторого индукционного периода.

По-видимому, в условиях непрерывного вакуумирования происходит увеличение скорости сублимации FOX-7 как с поверхности, так и из объема кристаллов, имеющих слоистую структуру, через постепенно расширяющиеся каналы. В результате удаления некоторого числа молекул FOX-7 происходит нарушение структурного порядка в кристаллической решетке, коллапс и диспергирование кристаллов. Этому, возможно, способствует и рост давления паров сублимата в межслоевом пространстве крупных кристаллов. Такие явления приводят к механохимической активации процессов, смене механизма и росту скорости разложения на несколько порядков.

Резкое увеличение скорости термораспада при понижении давления в системе возможно и при термическом разложении твердых

материалов, не относящихся к взрывчатым соединениям. Так, спонтанное разложение оксида графена, сопровождающееся резким выделением газов и тепла, в условиях непрерывного вакуумирования может происходить уже при температурах, не превышающих 160°C (рис. 1). По-видимому, критический характер разложения вызван резким нарастанием внутренних механических напряжений в структуре ОГ в результате схлопывания графеновых слоев после удаления определенного количества молекул воды и кислородсодержащих функциональных групп.

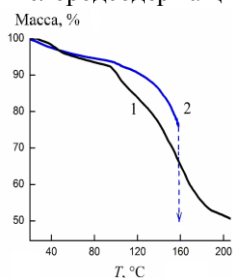


Рис. 1

Рис. 1. Кривые ТГА свежего ОГ (1) и образца ОГ после 1 года хранения (2).

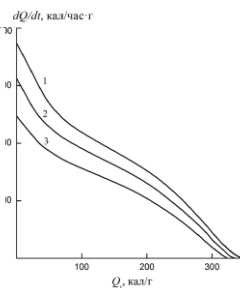
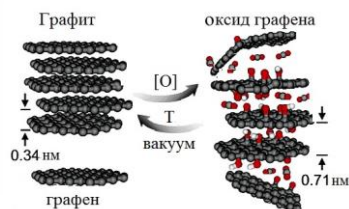


Рис. 2

Рис. 2. Скорости тепловыделения при разложении образцов ОГ, спрессованных при 100 (1) и 60 атм (2); мелкого порошка ОГ (3). Температура 140.2°C.

Влияние механической активации четко проявляется при сравнении скоростей тепловыделения в результате разложении образцов ОГ, полученных прессованием. Наибольшая скорость тепловыделения соответствует образцу ОГ, полученному в виде таблетки, спрессованной под давлением 100 атм (рис. 2, кривая 1).

В ИК-спектре твердого продукта, образовавшегося после взрывообразного разложения ОГ, выделяется серия сильных полос в диапазоне 1070 – 1200 см⁻¹, относящихся к аморфному алмазоподобному углероду с sp³-гибридизацией. Вместе с тем, присутствует полоса при 1550 см⁻¹, характерная для графитоподобного углерода с sp²-гибридизацией. Продукт «взрыва» проявляет сильное рассеяние ИК-излучения в высокочастотной области, что может быть связано с высоким показателем преломления и/или высокой электропроводностью материала.

Работа выполнена по темам Гос. задания: №№ гос. регистрации АААА-А19-119101690058-9 и АААА-А19-119120690042-9.

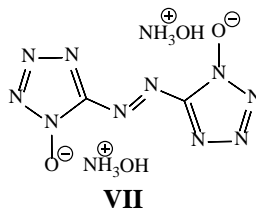
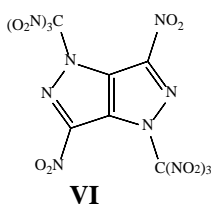
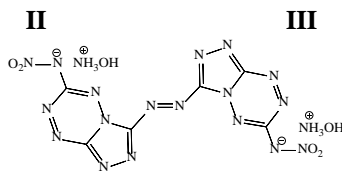
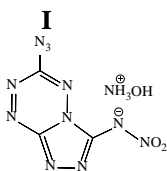
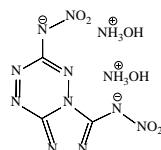
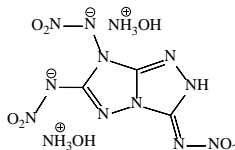
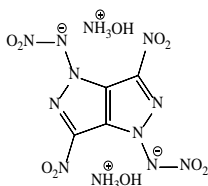
[1] N.N. Volkova, A.I. Kazakov, A.V. Danilchik, A.V. Shastin, G.V. Shilov, Proc. 21th Int. Seminar NTREM, 2018, Pardubice, Czech Rep. 1143.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГИДРОСИЛАММОНИЕВЫХ СОЛЕЙ НИТРОАМИННЫХ ПРОИЗВОДНЫХ НЕКОТОРЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ГЕТЕРОЦИКЛОВ В КАЧЕСТВЕ КОМПОНЕНТОВ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ

И. Ю. Гудкова, И.Н. Зюзин, Д. Б. Лемперт

*Институт проблем химической физики РАН, Россия, Черноголовка
@ Inessa@icp.ac.ru*

Целью настоящей работы было изучение возможности применения гидросиламмониевых солей нитроаминных производных некоторых конденсированных N-гетероциклов для создания высокоэнергетических СТ и термодинамическое обоснование данной задачи. Все рассмотренные соединения (I–V) превосходят классические энергетические компоненты в классе составов без конденсированных продуктов сгорания



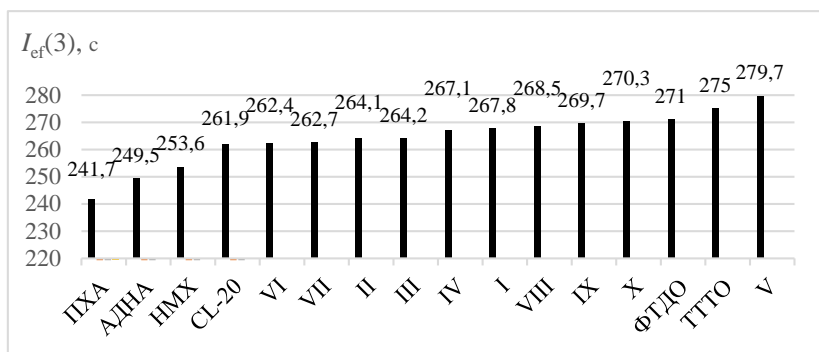
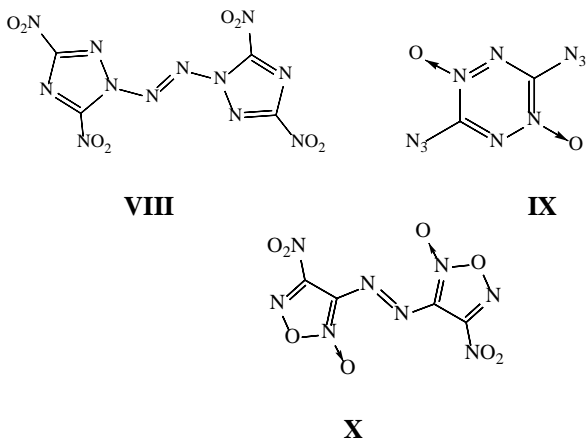


Рис. Максимальные величины эффективного импульса на третьей ступени $I_{\text{ef}}(3)$ композиций без конденсированных продуктов сгорания «энергоемкий наполнитель + связующее» при условии, что доля связующего 18 об.%, а T_c не выше 3800 К.

Наиболее эффективным компонентом оказалась дигидроксиламмониевая соль (*E*)-1,2-бис-(3-нитроамино-[1,2,4]триазоло[4,3-*b*][1,2,4,5]тетразин-6-ил)диазена (**V**), которая существенно превосходит по величине эффективного импульса на третьей ступени (279.7 с) многие из известных компонентов и ранее исследованных нами соединений (**VI-X**).

Работа выполнена по теме государственного задания, № госрегистрации АААА-А19-119101690058-9.

УСКОРЕНИЕ ФРОНТА ПЛАМЕНИ В КАНАЛЕ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПОРИСТЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Головастов С.В.[@], Бивол Г.Ю., Голуб В.В.

Объединённый институт высоких температур РАН

@golovastov@yandex.ru

Задача ускорения фронта пламени в газах является актуальной для создания устройств, использующих детонацию. Одним из способов, приводящих к интенсификации горения и к сокращению преддетонационного расстояния, может являться использование пористых покрытий и перегородок. В работе экспериментально исследовано ускорение фронта пламени в водородно-воздушной смеси в присутствии пористых металлов в канале прямоугольного сечения. Целью работы было установить связь между величиной скорости фронта пламени, размером пор, концентрацией водорода и типом покрытия.

На основе последовательностей высокоскоростных шлирен изображений получена траектория фронта пламени. Динамика зоны энерговыведения и распространение продуктов сгорания внутри пористых элементов определена с помощью ИК-камеры. В качестве пористых металлов использовались медь, никель и алюминий. Результаты сравнивались с полученными ранее для полиуретановых пористых перегородок и покрытий. Поперечные размеры канала варьировались от 16*20 мм до 20*40 мм. Эксперименты проводились при мольном избытке водорода 0,3-1,0.

Установлено, что пористый металл с размером пор 0,8-2,5 мм, турбулизируя течение несгоревшей смеси, приводит к ускорению фронта пламени. При этом превышение скорости относительно гладкого канала может быть пятикратным. Скорость пламени в гладком канале была ниже скорости пламени в пористом канале для всех тестируемых случаев.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №21-79-10363).

УСЛОВИЯ НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ КАТАЛИЗА ГОРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Денисюк А.П.^{1@}, Демидова Л.А.¹, Сизов В.А.¹,

¹*Российский химико-технологический университет*

им. Д.И. Менделеева

@ denisiuk.a.p@muctr.ru

На основании исследования влияния различных катализаторов на горение многочисленных баллистических твердых ракетных топлив, существенно отличающихся по составу отдельных его компонентов, а также различных индивидуальных нитросоединений и других ВВ, установлено, что решающим фактором в катализе горения является возможность образования на поверхности горения сажистого каркаса и его существования. На этом каркасе накапливаются частицы катализатора горения без их агломерации, в результате увеличивается эффективная площадь поверхности частиц катализатора, на которых происходит интенсивное тепловыделение, приводящее к увеличению градиента температуры над поверхностью горения. Однако, за счет этого эффекта тепловой поток ($q_{\lambda} = \lambda \cdot \phi / \rho \cdot U$) для образца с катализатором не может увеличиться, так как скорость горения повышается в той же степени, или даже больше.

На основании изучения структуры и элементного состава каркаса рассчитан коэффициент его теплопроводности, который может значительно (до 10 и более раз) превышать λ газовой зоны для образца без добавок. При использовании в расчете теплового баланса с катализатором полученных значений ϕ и λ получается однозначный вывод о том, что ведущей зоной горения изученных различных энергетических систем является каркас, из которого в к-фазу поступает 70-90% тепла, необходимого для распространения горения.

С увеличением давления возможность образования каркаса уменьшается, что приводит к снижению эффективности действия катализатора и соответствующему уменьшению v в законе горения вплоть до отрицательного значения.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ПЕРИОДА ИНДУКЦИИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ Н-ГЕПТАНА**
Ежов В.М.^{1@}, Ильина М.А.¹, Токталиев П.Д.¹, Червоная

Н.А.¹, Яновский Л.С.^{1,2}

¹ *ФГБУН «ИПХФ РАН», г. Черноголовка, Россия*

² *ФГБУ «РАРАН», г. Москва, Россия*

@vmezhov@ciam.ru

Наиболее распространенной техникой измерения периода индукции воспламенения (ПИВ) для горючих смесей являются измерения в ударной трубе.

подавляющее большинство данных по ПИВ алканов и их производных получены в отраженной волне [1,2] при высоких значениях давления и температуры. Организовать измерения ПИВ для температур $T < 1100$ К и давлений, близких к атмосферному, сложнее. Часто для измерений ПИВ в этом диапазоне используют реакторы со струйным смешением.

В данной работе проведены измерения ПИВ смеси паров н-гептана с воздухом в ударной трубе ИПХФ РАН за падающей ударной волной. Данные по ПИВ измерены в диапазоне температур $T = 884-1795$ К и давлений $P = 0,88-1,26$ атм для коэффициентов избытка воздуха $\varphi = 0,8$ и $1,0$.

Учитывая ограниченность данных по ПИВ н-гептана для низкотемпературного диапазона температур и атмосферных давлений, проведено сопоставление опубликованных экспериментальных данных других авторов и данных, полученных в настоящей работе.

Приводится анализ использованной методики измерений с оценкой диапазона ошибок полученных результатов.

В расчетной части проведена валидация известных детальных кинетических механизмов окисления н-гептана для объединенного набора экспериментальных данных и опубликованных данных с учетом оценок суммарной ошибки.

Проведено обобщение известных соотношений для ПИВ н-гептана для умеренного диапазона температур $T < 1100$ К.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ТУБИТАК в рамках научного проекта №21-51-46007.

[1] M.B. Colket, III and L.J. Spadaccini. Scramjet Fuels Autoignition Study. J. Propul. Powe, 2001, Vol. 17, No.2

[2] K. Zhang and etc. An updated experimental and kinetic modeling study of n-heptane oxidation. *Combustion and flame* 172 (2016) 116-135.

НЕПРЕРЫВНАЯ ДЕТОНАЦИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СМЕСЕЙ КЕРОСИН-НАГРЕТЫЙ ВОЗДУХ

Быковский Ф.А.¹, Ждан С.А.^{1,@}, Ведерников Е.Ф.¹

¹*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,*

Новосибирск, Россия

@ zhdan@hydro.nsc.ru

Цель данной работы – в кольцевой камере сгорания диаметром 503 мм и длиной 600 мм реализовать и исследовать непрерывную детонацию смесей авиационного керосина (ТС-1) с горячим воздухом, предварительно нагретым огневым способом в фаркамере от 600 до 1200 К. Рабочий диапазон расходов воздуха $G_a = 7.8 - 24$ кг/с и жидкого керосина $G_f = 0.6 - 1.33$ кг/с. Коэффициент избытка горючего $\phi = 0.66 - 1.28$. В системе подачи горючего керосин барботировался воздухом. Истечение продуктов сгорания происходило в окружающую атмосферу с давлением $p_a = 10^5$ Па.

Исследовано влияние степени нагрева воздуха на область реализации непрерывной детонации, давление в камере сгорания и удельный импульс. В опытах при температуре воздуха от 600 до 1200 К впервые наблюдали режимы непрерывной многофронтной детонации с одной парой (частота 1.2 ± 0.1 кГц) или двумя парами (частота 2.4 ± 0.2 кГц) сталкивающихся поперечных детонационных волн. Наибольшая частота соответствовала более нагретому воздуху. По измерениям полного и статического давления на выходе из камеры сгорания определены удельные импульсы при непрерывной многофронтной детонации. Показано, что увеличение температуры воздуха способствует детонационному сжиганию двухфазной смеси керосин-воздух, однако при этом возрастает степень диссоциации продуктов сгорания и уменьшается удельный импульс. При удельном расходе воздуха на входе в камеру сгорания около 1200 кг/(с·м²) максимальное значение удельного импульса с учётом энергии нагретого воздуха до температуры 600 К составило 2200 с, а минимальное – 1200 с при температуре 1200 К.

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2020-806.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПОТОКЕ

Зудов В.Н.^{1@}, Тупикин А.В.², Шмагунов О.А.¹.

¹*Институт теоретической и прикладной механики им.*

С.А. Христиановича СО РАН

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

@ zudov@itam.nsc.ru

Проведено экспериментальное исследование инициирования горения в сверхзвуковом потоке водородно-воздушной смеси, при одновременном воздействии сфокусированного импульсно-периодического излучения СО₂-лазера и внешнего электрического поля. На основе данных о собственном свечении пламени на длинах волн излучения возбужденных радикалов ОН* исследовано горение в сверхзвуковой струе.

В работе велась спектрозональная съемка зоны горения на длине радикалов ОН*. В эксперименте регистрировалась форма импульса падающего излучения, а также его временные характеристики при различных частотах, и фиксировалась форма импульса падающего излучения.

Было рассмотрено два случая инициирования воспламенения водородно-воздушной смеси в сверхзвуковом потоке: 1 - воспламенение и стабилизация смеси оптическим разрядом (т.е. оптическим стабилизатором), 2 - воспламенение и стабилизация горения оптическим разрядом, при наличии электрического поля. Присутствие электрического поля необходимо для того, чтобы энергоподвод, созданный совместным воздействием сфокусированного лазерного излучения и электрического разряда, смог стабилизировать горение гомогенной водородно-воздушной смеси в высокоскоростном потоке. В ходе экспериментов использовались различные электроды: плоские пластины; кольцевые электроды, расположенные как по потоку, так и поперек потока. Было проведено исследование влияния формы электрического сигнала на электродах на формирование электрических разрядов и процесс воспламенения и горения в сверхзвуковом потоке. Отметим, что инициирование горения с синусоидальными сигналами дали наиболее стабильные результаты.

Горение без электрического поля в сверхзвуковом потоке удалось получить только в виде периодических зон. На спектрозональной регистрации для числа Маха на срезе сопла $M=1.4$ радикала OH^* при горении смеси водорода с воздухом наблюдался прерывистый режим горения.

Применение комбинированного разряда дало эффект сравнимый по результатам со случаем, когда применялся механический стабилизатор в виде конуса [1,2]. Но использование в сверхзвуковом потоке механического стабилизатора и поддерживающего его пилона приводят к значительным потерям полного давления. Эти потери растут с увеличением скорости потока. При использовании комбинированного разряда таких потерь нет.

Таким образом получено стабильное горение в сверхзвуковом потоке, при использовании комбинированного способа подвода энергии в сверхзвуковой поток водородно-воздушной смеси.

Построена математическая модель диффузионного горения углеводородного топлива в плоском и осесимметричном каналах. Математическая модель энергоисточника описывает физические явления характерные для импульсного подвода энергии с использованием сфокусированного лазерного излучения. Скорость набегающего потока водородвоздушной смеси изменялась в диапазоне $u=100\text{--}500$ м/с. В начальный момент времени в этом потоке имитируется область с мгновенным подводом тепла. Получено, что с увеличением скорости набегающего потока происходит замедление скорости роста диаметра области воспламенения. При максимальной рассмотренной скорости набегающего потока (500 м/с) увеличение диаметра области воспламенения практически не наблюдалось.

Полученные данные свидетельствуют о принципиальной возможности управления горением, с использованием комбинированного разряда в сверхзвуковом потоке.

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ госрегистрации 121030500157-3 и 121031800217-8).

1. Tupikin A.V., Zudov V.N., Grachev G.N., Smirnov A.L. AIP Conference Proceedings. 2020. V. 2288, p.030051 <https://doi.org/10.1063/5.0030237>.

2. Зудов В.Н., Третьяков П.К., ФГВ, 2017. N.53, №3, С.1-9.

КИНЕТИКА ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ТЕРМОРАСПАДЕ ПРОИЗВОДНЫХ АЗЕПИНОВ

А. И. Казаков¹, Д. Б. Лемперг¹, А. В. Набатова¹, Е. Л. Игнатьева¹,
Д. В. Дашко², Л. С. Яновский^{1,3}

¹*Институт проблем химической физики Российской академии наук,
142432, Черноголовка*

²*ФГУП СКТБ "Технолог", 193076 Санкт-Петербург*

³*ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», 111250, Москва*

akazakov@icp.ac.ru

Топлива для газогенераторных двигателей, в отличие от СТРТ, эксплуатируются при существенно более высоких температурах, поэтому при близости величин баллистической эффективности используемых в них диспергаторов выбор одного из них для целевого применения определяется его термической стабильностью. В работе изучена кинетика теплотыделения в реакции термического разложения перспективных диспергаторов из класса азепинов 7-Аллил-7Н-дифурано[3,4-*b*:3',4'-*f*]фуроксано[3'',4''-*d*]азепина (**Az(O)All**), 7-Аллил-7Н-трифурано[3,4-*b*:3',4'-*d*:3'',4''-*f*]азепина (**AzAll**), 7-Цианометил-7Н-дифурано[3,4-*b*:3',4'-*f*]фуроксано[3'',4''-*d*]азепина (**Az(O)CyMe**), 7-Цианометил-7Н-трифурано[3,4-*b*:3',4'-*d*:3'',4''-*f*]азепина (**AzCyMe**), проведено сопоставление с кинетикой разложения ранее исследованного 7-Амино-7Н-дифурано[3,4-*b*:3',4'-*f*]фуроксано[3'',4''-*d*]азепина **Az(O)NH₂** [1] и проанализирована связь термической стабильности исследуемых соединений с строением их молекул.

Исследованные аллильные и цианометильные производные азепинов и **Az(O)NH₂** по величинам констант скоростей начальной реакции их термического превращения при 210°C располагаются в ряд **Az(O)All** : **Az(O)CyMe** : **Az(O)NH₂** : **AzAll** : **AzCyMe** = 4·10⁵ : 2·10³ : 1·10³ : 1·10² : 1. За единицу принята константа скорости реакции разложения **AzCyMe**. Фурановые циклы, входящие в состав молекул **AzCyMe** и **AzAll**, более термостабильны по сравнению с стабильностью фуроксановых циклов в составе молекул **Az(O)NH₂**, **Az(O)CyMe** и **Az(O)All**. Наблюдается только небольшое различие в константах разложения **Az(O)NH₂** и **Az(O)CyMe**, хотя первое соединение разлагается в твердой фазе, где должен наблюдаться тормозящий эффект кристаллической решетки, а второе - в расплаве. Наблюдаемое соотношение может быть объяснено, исходя из наличия

слабой связи N-N, имеющейся в молекуле **Az(O)NH₂**. Вследствие отталкивания р-орбиталей соседних атомов азота длина одинарной связи между атомами азота (1.40 нм) больше суммы ковалентных радиусов атомов азота (2·0.53=1.06 нм). В итоге связь N-N характеризуется очень низкой энергией диссоциации (151.8 кДж/моль) по сравнению с другими видами связей в органических соединениях, в том числе, и с энергией связи C-N (272.0 кДж/моль) азепинового цикла с нитрильным фрагментом в **Az(O)CyMe** и **AzCyMe**. Наблюдаемая энергия активации некаталитической реакции разложения **Az(O)NH₂** (141.8 кДж/моль) близка к величине энергии связи N-N. В данном случае начальная реакция разложения протекает с образованием азепенильного радикала и радикала NH₂. Наименьшую стабильность среди сравниваемых производных азепинов имеет **Az(O)AII**, содержащий кратные связи C=C. При относительно низких температурах он подвергается реакции термически инициированной полимеризации вследствие образования инициирующих полимеризацию бирадикальных фрагментов при раскрытии фуроксанового цикла. Более высокая термостабильность второго аллильного производного азепина **AzAII** объясняется тем, что в этом соединении возможная концентрация бирадикальных фрагментов, необходимых для инициирования процесса полимеризации, низка вследствие более высокой термостабильности фуразановых циклов, и, вероятно, процессы полимеризации и разложения протекают одновременно в области высоких температур.

Работа выполнена по темам государственного задания, №№ госрегистрации АААА-А19-119101690058-9 и АААА-А19-119120690042-9.

1. Казаков А.И., Лемперт Д.Б., Набатова А.В., Дашко Д.В., Разносчиков В.В., Яновский Л.С., Алдошин С.М. ЖПХ. 2019. Т. 92. № 13. С. 1657-1665..

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ И ЭНТАЛЬПИИ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОИЗВОДНЫХ АЗЕПИНОВ

А. И. Казаков¹, А. В. Набатова¹, Д. Б. Лемперг¹, Е. Л. Игнатьева¹,
Д. В. Дашко², Л. С. Яновский^{1,3}

¹Институт проблем химической физики Российской академии наук,
142432, Черноголовка

²ФГУП СКТБ "Технолог", 193076 Санкт-Петербург

³ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», 111250, Москва

akazakov@icp.ac.ru

Для обеспечения высокой степени газификации и диспергирования в газогенераторных двигателях применяются составы, содержащие энергоемкие компоненты с недостатком кислорода, но способные к самостоятельному и высокоскоростному экзотермическому превращению. В ИПХФ РАН было предложено в качестве таких компонентов, удовлетворяющим указанным требованиям, использовать различные производные азепинов. Для расчета их баллистической эффективности были измерены энергии сгорания и рассчитаны энтальпии образования ΔH_f° 7-Аллил-7H-дифуразано[3,4-b:3',4'-f]фуроксано[3'',4''-d]азепина (**Az(O)All**) 722.4±4.7, 7-Аллил-7H-трифуразано[3,4-b:3',4'-d:3'',4''-f]азепина (**AzAll**) 724.1±6.8, 7-Пропаргил-7H-дифуразано[3,4-b:3',4'-f]фуроксано[3'',4''-d]азепина (**Az(O)Prg**) 972.0±5.7, 7-Цианометил-7H-дифуразано[3,4-b:3',4'-f]фуроксано[3'',4''-d]азепина (**Az(O)CH₂CN**) 786.6±5.3, 7-Цианометил-7H-трифуразано[3,4-b:3',4'-d:3'',4''-f]азепина (**AzCH₂CN**) 788.1±5.1, 7-Метил-7H-дифуразано[3,4-b:3',4'-f]фуроксано[3'',4''-d]азепина (**Az(O)Me**) 620.5±2.5, 7-Метил-7H-трифуразано[3,4-b:3',4'-d:3'',4''-f]азепина (**AzMe**) 637.0±4.9, 7-Тетразолометил-7H-трифуразано[3,4-b:3',4'-d:3'',4''-f]азепина (**AzCH₂T**) 995.5±4.5 и 7-Гидроксиэтил-7H-трифуразано[3,4-b:3',4'-d:3'',4''-f]азепина (**AzCH₂CH₂OH**) 432.6±4.5 кДж/моль.

При сопоставлении полученной ΔH_f° **Az(O)All**, **Az(O)Prg**, **Az(O)CH₂CN**, **Az(O)Me** и ранее определенной ΔH_f° 7-амино-7H-дифуразано[3,4-b:3',4'-f]фуроксано[3'',4''-d]азепина (**Az(O)NH₂**) (701.7 кДж/моль) [1] найдено, что энергетический инкремент замещения аминогруппы на аллильную, пропаргильную, цианометильную и метильную группу в дифуразано-фуроксано-азепиновом кольце составляет 20.7, 270.3, 84.9 и -81.2 кДж/моль соответственно.

При сопоставлении ΔH_f° **AzMe** и **Az(O)Me**, **AzAll** и **Az(O)All** и **AzCH₂CN** и **Az(O)CH₂CN** попарно установлено, что включение в состав молекулы фуроксанового кольца взамен фуразанового в рассматриваемых соединениях приводит к снижению ΔH_f° . Для пары **AzMe** и **Az(O)Me** уменьшение в ΔH_f° составляет 16.5 кДж/моль. В случае **AzAll** и **Az(O)All** уменьшение в ΔH_f° составляет 1.7 кДж/моль, а для пары **AzCH₂CN** и **Az(O)CH₂CN** оно равно 1.5 кДж/моль, т.е. в пределах ошибки измерения ΔH_f° данных пар рассматриваемых соединений практически равны. При анализе ΔH_f° ранее изученных фуразановых и фуроксановых производных азепинов установлено, что разница в ΔH_f° существенно варьируется в зависимости от строения соединений. Так для **Az** и **Az(O)** она составляет 14.7 кДж/моль [1], а для димеров азепинов разница ΔH_f° в расчете на одну N-оксидную группу составляет уже 31.8 кДж/моль [2]. Такая величина разницы значений ΔH_f° фуразановых и фуроксановых производных, зависящая от строения сравниваемых соединений, может объясняться различающимися значениями дополнительных энергетических вкладов в ΔH_f° этих соединений, которые определяются видом и числом укороченных диполь-дипольных контактов между функциональными группами при упаковке молекул в кристалле.

Работа выполнена по темам государственного задания, №№ государственной регистрации АААА-А19-119101690058-9 и АААА-А19-119120690042-9.

1. Алдошин С.М., Лемперт Д.Б., Гончаров Т.К., Казаков А.И., Согласнова С.И., Дорофеев Е.М., Плишкин Н.А. // Изв РАН. сер. хим. — 2016. — №8. — С. 2018–2024.

2. Лемперт Д.Б., Казаков А.И., Набатова А.В., Дашко Д.В., Степанов А.И., Шилов Г.В., Алдошин С.М. // ФГВ. — 2020. — вып.6. — С. 3–11.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ АКТИВНЫХ СВЯЗУЮЩИХ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ МИНУС 50 °С

Калмыков П.И.¹, Певченко Б.В.¹, Попенко Е.М.^{1,2},
Ленкина Л.Д.¹, Сидоров К.А.^{1,3}, Бубнов Г.А.¹, Бычин Н.В.¹,
Кискин А.Б.⁴, Машковцев В.Н.¹, Егорова Л.Г.¹

¹АО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск, Россия
post@frpc.secna.ru, alpineclub@mail.ru

²Бийский технологический институт (филиал)
ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», г. Бийск,
Россия

³ФГБУН ИХТТМ СО РАН, 630128, г. Новосибирск, ул.
Кутателадзе, 18.

⁴ФГБУН ИХКГ им. В.В. Воеводского СО РАН, 630090, г.
Новосибирск, ул. Институтская, 3.

Приведены результаты экспериментальных исследований кристаллизруемости и закономерностей горения активных горючих связующих (АГСВ) в температурном диапазоне ± 50 °С. Энергонасыщенные ГСВ скомпонованы на основе эластомеров бутадиен-нитрильного (БНКС), полиуретанового (Сурэл) и высокоэнтальпийного азолового полимера поли-*N*-метилвинилтетразола (МПВТ) и смесевых нитропластификаторов ЛД-70 (ДНДЭГ/ДНГЭГ=70/30%), ДН (ДНДЭГ/НГЦ=50/50%) и НЛД-1 (НГЦ-35,3/ДНДЭГ-20,9/ДНГЭГ-43,8%) [1].

В качестве критерия стабильности фазового состава вулканизатов АГСВ БНКС-ЛД-70; МПВТ-НЛД; НГУ-ДН с соотношением «каучук/пластификатор»= 17/83% использовали величину температуры плавления кристаллической фазы пластификатора в предварительно охлажденных образцах связующих.

Фазовые переходы изучали методом дифференциально-сканирующей калориметрии на приборе *DSC 204 F1 Netzsch*. Методика предварительной подготовки образцов различалась в зависимости от вида изучаемого фазового превращения. Для определения наличия кристаллической фазы (по температурам плавления) образцы выдерживали в течение месяца при заданной отрицательной температуре. По окончании термостатирования образцы нагревались

до температуры 20 °С со скоростью 2 град/мин с регистрацией тепловых эффектов фазовых превращений.

При определении температуры структурного стеклования ($T_{сск}$) образцы предварительно охлаждались до температуры минус 100 °С, затем, без длительного термостатирования, нагревались со скоростью 10 град/мин. При этом на диаграмме ДСК фиксировались переходы из стеклообразного в высокоэластичное состояние.

По термограммам ДСК смесевых пластификаторов установлены фазовые переходы ЛД-70 при – 12,2 °С (кристаллизация ДНДЭГ) и – 22 °С (кристаллизация эвтектики ЛД-30: ДНДЭГ/ДНТЭГ = 28/72%) [2]. Для НЛД-1 получены пик кристаллизации эвтектики при – 42 °С. Температурный диапазон процесса стеклования смесевых пластификаторов составляет: ЛД-70 от – 79,5 до – 84,1 °С, НЛД-1 от – 75 до – 84 °С. ДН от – 64,5 до – 77 °С.

На термограммах ДСК вулканизатов МПВТ-НЛД и НГУ-ДН пики кристаллизации (плавления) пластификаторов отсутствуют. На диаграмме образцов вулканизата БНКС-ЛД-70 наблюдаются пики плавления кристаллической фазы ДНДЭГ (– 8°С) и эвтектики ЛД-30 (– 21,3°С). $T_{сск}$ вулканизатов составляет – 70 ± 10°С.

С целью оценки устойчивости горения композиционных ГСВ БНКС-ЛД-70, МПВТ-НЛД и НГУ-ДН в широком диапазоне давлений $P=40-120$ кгс/см² и температур $T= -50...+50$ °С проведены исследования по определению производной давления (градиента давления) от времени dP/dt вулканизатов при испытании образцов размером Ø14 -10 мм в камере установки возрастающего давления (УВД) (см. рисунок).

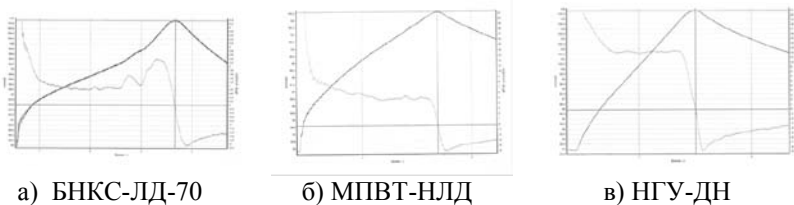


Рисунок – Горение вулканизатов ГСВ при $P=100$ кгс/см² и $T = -50$ °С

Горение образцов ГСВ НГУ-ДН и МПВТ-НЛД при $P=100$ кгс/см² сопровождается пологим участком кривой зависимости dP/dt , что характеризует стабильное послойное горение в течение всего

процесса и постоянную скорость газообразования. Производная dP/dt характеризует интенсивность газоприхода продуктов сгорания при горении АГСВ в заданном диапазоне давлений. На диаграммах горения образцов ГСВ БНКС-ЛД-70 наблюдается начальный пологий участок кривой dP/dt и два экстремума.

Таким образом, установлена взаимосвязь между фазовой стабильностью полимерных композиционных горючих связующих и стабильностью газоприхода в процессе их горения. Наличие кристаллической фазы у вулканизатов ГСВ БНКС-ЛД-70, охлажденных до $T = -50$ °С, и ее плавление в процессе горения вызывает скачкообразное изменение градиента давления dP/dt , что приводит к нестационарному режиму горения.

[1] Калмыков П.И., Певченко Б.В., Громов А.М., Сидоров К.А., Рудаков Э.В. Высокоэнергетические азоловые связующие на основе эвтектических смесей нитросоединений. Физико-химические свойства и закономерности горения. Сборник кратких статей «Перспективные технологии, материалы и приборы для космических исследований и земных приложений». ИПХФ РАН. – 2017.– С.88-90.

[2] Лотменцев Ю.М., Плешаков Д.В., Третьякова В.Д., Кондакова Н.Н., Хвостова Ю.В. Использование эвтектических смесей нитрозфиров в качестве пластификаторов для связующих энергетических материалов с широким температурным диапазоном эксплуатации. Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы.– 2009. – № 2.– С.7-10.

**ПОГЛОЩЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ СЕРЫ
КАЛЬЦИЙСОДЕРЖАЩИМИ СОРБЕНТАМИ ПРИ
ФИЛЬТРАЦИОННОМ ГОРЕНИИ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ
МОДЕЛЬНЫХ СОСТАВОВ**

Кислов В.М., Шамин И.Г., Пилипенко Е.Н, Цветкова Ю.Ю., Цветков
М.В., Салганская М.В.

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

Сжигание твердых топлив приводит к образованию H_2S и SO_2 , которые, поступая в атмосферу с газообразными продуктами сгорания, наносят вред окружающей среде. Ранее [1] было показано, что добавка кальцийсодержащих сорбентов позволяет связывать соединения серы, вследствие чего они остаются в твердых продуктах сгорания.

Целью данной работы являлось исследование возможности поглощения соединений серы путем добавки к топливу кальцийсодержащих сорбентов при фильтрационном горении модельных серосодержащих составов.

Исследовано фильтрационное горение составов, состоящих из смеси частиц древесного угля, серосодержащей добавки (сульфида железа или сульфата меди) и негорючего материала. Размер частиц используемых материалов составлял 2-5 мм. В качестве негорючего материала использовали частицы мрамора ($CaCO_3$), способного связывать серу, и сапфира (Al_2O_3). Состав смесей соответствовал формированию двух характерных тепловых режимов фильтрационного горения: нормальной и инверсной структурам волн горения.

Эксперименты показали, что по сравнению с добавкой сапфира добавка мрамора приводит к снижению температуры горения на 150-200 °С, повышению содержания CO_2 в газообразных продуктах и увеличению доли серы, перешедшей в твердые продукты сгорания. Наиболее эффективно карбонат кальция связывает серу, находящуюся в топливе в сульфидной форме: добавка 50% мрамора позволяет поглотить 72% серы, а добавка 90% мрамора – 85% серы. Аналогичные добавки 50 и 85% мрамора к модельному топливу, содержащему сульфат меди, позволяют поглотить только 15 и 31% серы, соответственно.

Измерения элементного состава используемых материалов и образующихся продуктов горения выполнены в АЦКП ИПХФ РАН.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Госзадания № 0089-2019-0018, номер госрегистрации АААА-А19-119-022690098-3.

[1] Кислов В.М. и др., 2021, Химическая физика, **40**, 8, с. 19-25.

ПОЛУЧЕНИЕ ПРОДУКТОВ НЕКАТАЛИТИЧЕСКОЙ И КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ С НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ СМОЛЫ МЕТОДОМ ПАРЦИАЛЬНОГО ОКИСЛЕНИЯ ВОЗДУХОМ

Кислов В.М., Цветкова Ю.Ю., Пилипенко Е.Н., Салганская М.В.

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

Биомасса является перспективным источником для получения энергии и химических продуктов, однако в исходном виде она мало пригодна для промышленного использования. Более перспективным является превращение ее в газообразные продукты, например, путем газификации с последующей очисткой от содержащихся в них примесей пыли, влаги и смолы.

Целью данной работы является исследование окислительной конверсии воздухом продуктов газификации сосновой древесины, (в том числе пропитанной катализатором – K_2CO_3) для получения бессмольного горючего газа.

В лабораторном кварцевом реакторе диаметром 45 мм проведены эксперименты по конверсии в спутном потоке предварительно перемешанных продуктов газификации сосновой древесины (как в исходном виде, так и пропитанной катализатором – K_2CO_3) с воздухом. В ходе экспериментов определяли состав газов при газификации и конверсии, а также температуру конверсии при различных расходах воздуха, подаваемого для осуществления конверсии.

Эксперименты показали, что при газификации древесины без добавки катализатора, образуется аэрозоль, содержащий газообразные продукты с теплотой сгорания примерно 2.5 МДж/м^3 и смолу, содержание которой в газообразных продуктах составляет $0.30 - 0.32 \text{ кг/м}^3$. Конверсия данного аэрозоля воздухом позволяет за счет энергии парциального окисления смол преобразовать в горючий газ примерно 85% смол, увеличив выход и теплоту сгорания газообразных продуктов конверсии (до 4.2 МДж/м^3).

Добавка к древесине до 27% K_2CO_3 в качестве катализатора существенно снижает температуру и меняет состав продуктов газификации: выход смолы снижается на 90%, выход газообразных продуктов увеличивается на 20-30%, а в твердых продуктах сгорания появляется 13-15% недогоревшего углерода. Меняется также и состав газообразных продуктов: содержание CO снижается на 1-2%, а

содержание H_2 – линейно увеличивается примерно в два раза. Теплота сгорания газообразных продуктов при этом меняется мало. В отличие от некаталитической газификации, процесс оказался чувствительным к относительно малым изменениям давления: при увеличении давления на 0.5 атм (50 кПа) происходит увеличение выхода газообразных продуктов и снижение содержания в них горючих компонентов.

При воздушной конверсии продуктов каталитической газификации древесины с содержанием смолы 0.125 кг/м^3 и менее энергии парциального окисления смол оказывается недостаточно для достижения температуры, обеспечивающей высокие скорости реакции конверсии. Для осуществления конверсии следует подавать избыточное количество воздуха, и (помимо смол) частично сжигать горючие компоненты, содержащиеся в газообразных продуктах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Госзадания № 0089-2019-0018, номер госрегистрации АААА-А19-119-022690098-3.

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТЕРМОСТОЙКОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА РУХ

Козлов А.С.®, Путис С.М., Мершин А.Ю., Бармашова Д.В.,
Буковский П.Г., Базанов О.В., Семашкин Г.В., Котомин А.А.,
Душенок С.А.

ФГУП «СКТБ «Технолог», г Санкт-Петербург
@TOOL999@narod.ru

В настоящее время развитие глубокого разведочного бурения нефтяных и газовых скважин требует проникновения на глубину до 7 км, где температура может достигать 250-280 °С. Для данного вида бурения проводятся взрывные работы с использованием специальной аппаратуры, содержащей взрывчатые вещества (ВВ) и средства инициирования [1], обладающие повышенной термической стабильностью. Одним из перспективных термостойких ВВ, предлагаемых для решения задач такого типа, является 2,6-бис(пикриламино)-3,5-динитропиридин (РУХ), который способен сохранять свои взрывчатые характеристики при температурах до 360 °С [2].

В СКТБ «Технолог» разработан более простой способ получения РУХ [3] и изучены некоторые его свойства. Чувствительность к механическим воздействиям: к удару по ГОСТ 4545-88 при падении груза 10 (2) кг – 100 (0) %, нижний предел чувствительности к трению по ГОСТ Р 50835-95 – 2200 кг/см²; методом дериватографии определена температура начала интенсивного разложения ($T_{инт} = 368$ °С); химическая стойкость по ОСТ В 84-744-73 на ИВК «Вулкан-2000» при $T = 110$ °С за 14 ч составила 10 мм рт.ст (без учета первого часа). Выполнена предварительная оценка критического диаметра детонации ($d_{кр}$) от $\approx 3,6$ мм (при дисперсности 1650 см²/г) до $\approx 1,8$ мм (при дисперсности 12500 см²/г). Предварительно оценены коэффициенты уравнения, отражающего зависимость $d_{кр}$ от удельной поверхности ВВ для расчета критического диаметра детонации по методу [4, формула 2.76]: $a = 1,85$; $b = 0,37$;

На основе 2,6-бис(пикриламино)-3,5-динитропиридина был разработан состав, содержащий 95% РУХ и 5% инертного полимера. Для данного состава экспериментально определена скорость детонации ($D_{1,64} = 7,10$ км/с), которая соответствует расчету, выполненному по [4].

Данные, полученные в настоящей работе, позволяют рассматривать РУХ как перспективное термостойкое ВВ при использовании в глубоких нефтяных и газовых скважинах.

1. Промышленные взрывчатые вещества: учебное пособие для вузов / М.А. Илюшин, Г.Г. Савенков, А.С. Мазур.–3е изд., стер.–СПб: Лань, 2021. – 200 с.
2. Agrawal J.P. Recent trends in high-energy materials. Prog. Energy Combust. Sci. 1998. 24. P. 1-30.
3. Способ получения термостойкого взрывчатого вещества РУХ / Путис С.М., Мершин А.Ю., Бармашова Д.В., Козлов А.С., Семашкин Г.В., Котомин А.А., Душенков С.А., настоящий сборник.
4. Котомин А. А. Эмпирические методы расчета взрывчатых веществ и композиций: монография / А. А. Котомин, С. А. Душенков, А. С. Козлов. – Санкт-Петербург : Лань, 3е изд., 2022. — 384 с.

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ САЖИ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ В ПРЕДВАРИТЕЛЬНО- ПЕРЕМЕШАННОМ ПЛАМЕНИ

Гуренцов Е.В.¹, Еремин А.В.¹, Колотушкин Р.Н.^{1,®}, Ходыко Е.С.^{1,2}

¹*Объединенный институт высоких температур РАН*

²*МГТУ им. Баумана*

@ kolotushkin.roman@gmail.com

Важнейшим параметром, определяющим оптические свойства материала, является ширина оптической запрещенной зоны. В работе ширина оптической запрещенной зоны наночастиц сажи, образующихся при горении различных углеводородов, была исследована при помощи метода лазерной экстинкции в широком диапазоне длин волн. Наночастицы сажи были синтезированы в стандартном плоском ламинарном пламени в горелке предварительного перемешанных газов типа МакКенна. Для исследований использовались пламена: этилен/воздух, этилен с добавками диметилэфира/воздух, ацетилен/воздух и пропилен/воздух. Выбор данных смесей обусловлен их различной склонностью к сажеобразованию.

Измерения сигналов лазерной экстинкции проводились на 6 длинах волн в диапазоне от 405 до 850 нм. Ширина оптической запрещенной зоны наночастиц сажи оценивалась методом Таука [1] в зависимости от высоты пламени над срезом горелки. Для всех типов углеводородов наблюдалась тенденция уменьшения ширины оптической запрещенной зоны от 1,5-1,7 эВ до 0,05-0,1 эВ с увеличением высоты пламени. Причиной такого резкого уменьшения ширины оптической запрещенной зоны является рост сажевых частиц от «молодых» до «взрослых», сопровождающийся изменением их структуры, а именно, увеличением степени графитизации. Внутренняя структура частиц в процессе их роста приближается к структуре графита, который является проводником, т.е. материалом без оптической запрещенной зоны.

Средний размер сажевых частиц был измерен с использованием микрофотографий образцов сажи, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии.

Было показано, что для частиц сажи, формирующихся при горении различных углеводородов, ширина оптической запрещенной зоны может существенно различаться при одних и тех же размерах сажевых частиц. Обсуждается причина обнаруженных различий

величины ширины оптической запрещенной зоны сажи в зависимости от вида углеводорода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, Грант № 20-58-12003.

[1] Tauc J, Grigorovici R, Vancu A. 1966, Phys. Status Solidi B. 10. 627-37

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ БОРСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИЙ

Коротких А.Г.^{1,2,@}, Сорокин И.В.³

¹*Национальный исследовательский Томский
политехнический университет*

²*Национальный исследовательский Томский
государственный университет*

³*Институт химической кинетики и горения
им. В.В. Воеводского СО РАН
@ korotkikh@tpu.ru*

Повышение характеристик двигательных установок и газогенераторов возможно благодаря применению дисперсных металлических горючих (МГ) в смесевых твердых топливах и высокоэнергетических материалах (ВЭМ) [1–3]. Для увеличения полноты сгорания дисперсных МГ в камере необходимо обеспечить определенные условия. Изучение механизма воспламенения и процесса горения энергоемких (борсодержащих) МГ в составе ВЭМ позволяет спрогнозировать необходимые условия и эффективность работы установки.

В работе представлены результаты исследования воспламенения и горения порошков алюминия, аморфного бора и боридов алюминия, полученных методом СВС (ТГУ), на воздухе, а также в составе ВЭМ, содержащего окислители и горючие-связующие вещества. Изучение характеристик воспламенения МГ осуществлялось на экспериментальном стенде, включающем CO₂-лазер непрерывного действия с длиной волны излучения 10.6 мкм, системы визуализации (скоростные видео- и тепловизионную камеры) и регистрации параметров. В ходе исследования нестационарного процесса установлены времена задержки воспламенения t_{ign} дисперсных МГ при варьировании плотности теплового потока излучения в диапазоне $q=65-190$ Вт/см². Горение МГ в составе ВЭМ исследовалось в бомбе постоянного давления при варьировании давления азота в диапазоне $p=0.5-5.0$ МПа. На основе измеренных данных времени горения топливных композиций определены закон скорости горения от давления и значения степенного показателя ВЭМ, содержащих борсодержащие композиции.

Анализ измеренных данных показал, что времена t_{ign} порошков борида алюминия в 1.9–2.3 раза (AlB₂) и 3.2–3.5 раза (AlB₁₂) меньше, в сравнении с μ Al, при одинаковых условиях нагрева на воздухе, при

этом показатель n в зависимости $t_{ign}(q)=A \cdot q^{-n}$ не существенно меняется и составляет $\sim 1.9-2.1$. Применение бора или AlB_n в ВЭМ приводит к увеличению скорости горения топливных композиций до 2.2–2.5 раза в зависимости от давления в камере.

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

[1] DeLuca L. T., 2018, Defence Technology. **14**. 357–365.

[2] Berner M.K., Talawar M.B., Zarko V.E., 2013, Combustion, Explosion, and Shock Waves. **49**. 625–647.

[3] Korotkikh A.G., Glotov O.G., Arkhipov V.A., Zarko V.E., Kiskin A.B., 2017, Combustion and Flame. **178**. 195–204.

Образование ПАУ и сажи при пиролизе этилена с добавками биотоплив

Коршунова М.Р.@ Еремин А.В., Михеева Е.Ю.
Объединенный институт высоких температур РАН
@ korshunova@labnp-jih.ru

Полиароматические углеводороды (ПАУ) представляют собой органические соединения, состоящее из 2 или более ароматических колец и образующиеся в результате процессов неполного сгорания топлив. Такие соединения общепринято рассматриваются как прекурсоры сажи [1, 2], поэтому изучение процессов их образования является актуальной темой исследований в вопросах развития моделей сажеобразования. Кроме того, доказано отрицательное влияние ПАУ на окружающую среду и здоровье человека [3, 4], что делает их изучение актуальным и с экологической точки зрения.

В данной работе были исследованы процессы образования и роста ПАУ и сажи при пиролизе смесей этилена с добавками биотоплив (диметиловый эфир C_2H_6O , диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$, диметоксиметан $C_3H_8O_2$, тетрагидрофуран C_4H_8O) за отраженными ударными волнами. Для диагностики процессов образования и роста ПАУ применялся метод лазерно-индуцированной флюоресценции (ЛИФ). Из литературы известно, что с увеличением массы ПАУ, их спектр ЛИФ сдвигается в сторону больших длин волн из-за уменьшения расстояния между основным и возбужденным электронными уровнями [5]. Преимуществом измерений в условиях ударно-трубного эксперимента является возможность варьирования температуры в широком диапазоне, что актуально, поскольку данных по спектральным характеристикам ПАУ и кинетике их роста при высоких температурах недостаточно [6]. Для инициирования сигнала флюоресценции использовался импульсный Nd:YAG лазер на длине волны 266 нм с длительностью импульса 12 нс и плотностью энергии 25 мДж/см², а для регистрации ЛИФ в диапазоне 260-650 нм – монохроматор АСТОН Spectra Pro 150 и электронно-оптическая камера K008UV. При помощи синхронизации лазерного импульса с проходящим фронтом ударной волны измерения проводились на разных временных стадиях роста ПАУ.

Помимо регистрации ЛИФ ПАУ, в работе было проведено измерение объемной доли образующихся углеродных наночастиц и их размеров. Температурная зависимость выхода сажи была получена при помощи метода лазерной экстинкции на длинах волн 405 и 633 нм. Для

определения размеров углеродных наночастиц применялся метод лазерно-индуцированной инкандесценции (ЛИИ). Для нагрева частиц использовался Nd:YAG лазер на длине волны 1064 нм с плотностью энергии ~ 100 мДж/см², а для регистрации сигнала их теплового излучения – ФЭУ с интерференционными светофильтрами на длинах волн 450 и 670 нм. Для извлечения диаметра частиц из полученных сигналов их теплового излучения применялась модель ЛИИ, основывающаяся на решении законов сохранения энергии и массы сферической углеродной наночастицы.

Для химического анализа влияния добавок биотоплив на процессы образования и роста ПАУ и сажи было проведено кинетическое моделирование при помощи программы OpenSMOKE++ [7].

В данной работе было установлено, что выбранные биотоплива не приводят к снижению сажеобразования, а также изменяют температурные диапазоны начала формирования углеродных наночастиц. Сопоставление экспериментально зарегистрированных спектров ЛИФ ПАУ и результатов численного моделирования позволило установить классы ПАУ, образующиеся при разных температурах и временах протекания химических реакций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, Грант №20-58-12003.

- [1] Frenklach M. Int. Symp. Combust. 1985. 887-901.
- [2] Wang. H. Proc. Combust. Inst. 2011. 41-67.
- [3] Abdel-Shafy H. Egypt. J. Pet. 2016. 107-123.
- [4] Patel A. Front. Microbiol. 2020. 562813.
- [5] Delhay J. Appl. Phys. B. 2005. 181-186.
- [6] Desgroux P. Proc. Combust. Inst. 2013. 1713-1738.
- [7] Cuoci A. Comp Phys Commun. 2015. 237-264.

НИЗКОУГЛЕРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Зайченко В.М.¹, Корценштейн Н.М.¹, Лавренов В.А.^{1,@}

¹*Объединенный институт высоких температур РАН*

@ v.a.lavrenov@gmail.com

Водородная энергетика в настоящее время рассматривается в качестве главного направления сокращения антропогенного воздействия на природное равновесие. В качестве основных технологий получения водорода в настоящее время рассматривается электролиз, в частности с использованием энергии АЭС и возобновляемых источников энергии, а также переработка ископаемых топлив, в том числе газификация угля и каталитическая конверсия природного газа.

Важной проблемой существующих методов получения водорода, основанных на переработке ископаемых топлив, являются существенные сопутствующие выбросы CO₂. Известная альтернатива в виде подземного захоронения может оказывать отрицательное воздействие на происходящие в толще земли процессы [1]. При топливном использовании биомассы природный баланс двуокиси углерода не нарушается. Биомасса является CO₂-нейтральным топливом: в процессах естественной утилизации биомассы при гниении либо при ее сжигании выделяется столько же углекислого газа, сколько было поглощено растением из атмосферы в период роста.

Одним из перспективных методов энергетической утилизации биомассы является технология двухстадийной пиролизической конверсии биомассы с получением высококалорийного газового топлива, разработанная в ОИВТ РАН. Данная технология позволяет получать синтез-газ, объёмная доля горючих компонентов (CO, H₂, CH₄) в котором составляет не менее 90 %. Получаемый по данной технологии энергетический газ имеет сравнительно высокую удельную теплоту сгорания – на уровне 11 МДж/м³, что делает возможным его эффективное применение в современном энергетическом оборудовании, рассчитанном на высокие тепловые нагрузки. Одним из важнейших показателей, характеризующих возможность использования синтез-газа в энергетическом оборудовании, является содержание в получаемом газе высокомолекулярных соединений, т.н. смол. В известных технологиях воздушной газификации содержание смол составляет порядка 500–5000 мг/м³. Содержание смол в газообразном топливе, предназначенном для использования в двигателях внутреннего сгорания, например, в газопоршневых

электростанциях и мини-ТЭЦ, должно быть ограничено значениями в диапазоне 10 до 100 мг/м³ [2]. Именно высокая стоимость газоочистки является основным препятствием на пути широкого распространения технологий газификации [3]. В синтез-газе, получаемом по технологии ОИВТ РАН, содержание смол не превышает 50 мг/м³ [4]. Поскольку данный газ получен из биомассы и является СО₂-нейтральным топливом, то по воздействию на экологию аналогичен топливному использованию водорода. При этом себестоимость синтез-газа, получаемого из биомассы, значительно ниже по отношению к известным технологиям термического преобразования биомассы и получения водорода. Разрабатываемый процесс прошел апробацию на экспериментальных установках института.

[1] С.А. Переверзева, П.К. Коносовский, А.В. Тудвачев, И.Л. Хархордин. Захоронение промышленных выбросов углекислого газа в геологические структуры // Вестник Санкт-Петербургского университета. – Серия 7. Геология. География. – №1. – 2014. – С. 5–21.

[2] S. Thapa, P.R. Bhoi, A. Kumar, R.L. Huhnke. Gas refrigerating and biomass filter using influence on tar removal // Energies. – 2017. – 10. – 349.

[3] R.N. Singh, S.P. Singh, J.B. Balwanshi. Tar removal from manufactured gas: A review // Res. J. Eng. Sci. – 2014. – 3. – P. 16 – 22.

[4] V.V. Khaskhachikh, K.O. Krysanova, V.A. Lavrenov, V.M. Zaichenko. Comparison of Charcoal, Ceramics and Dolomite as a Bed Material in Two-Stage Pyrolytic Processing of Wood Waste into the Synthesis Gas // Chemical Engineering Transactions. – 2019. – Volume 76. – P. 1465–1470.

ПОЛУЧЕНИЕ БЕСПОРИСТОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ Ti-Al-Si МЕТОДОМ СВС-КОМПАКТИРОВАНИЯ

Лазарев П.А., Бусурина М.Л., Грядунов А.Н., Сычев А.Е., Боярченко
Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мерджанова, Российская академия наук, ул. Академика
Осипьяна, 8, Черноголовка, Россия
@ Lazarev@ism.ac.ru

В настоящее время большое влияние уделяется высокотемпературным конструкционным материалам с низкой плотностью и улучшенными механическими свойствами, поскольку они представляют большой интерес в автомобильной и авиакосмической промышленности. В связи с этим актуальны разработка и применение новых способов синтеза интерметаллидных сплавов на основе тройной системы Ti–Al–Si, которые позволят получить легкий материал с новыми свойствами. [1].

В данной работе методом СВС-прессования был синтезирован сплав на основе системы Ti-Al-Si с исходным химическим составом (масс. %): 74.1Ti-6.3Al-19.6Si находящийся на титановой подложке толщиной 200 мкм. По результатам РФА в сплаве, синтезированном методом СВС-прессования, основной фазой является $Ti_{20}Al_3Si_9$, а также присутствует небольшое количество Ti_3Al (Рис.1, а).

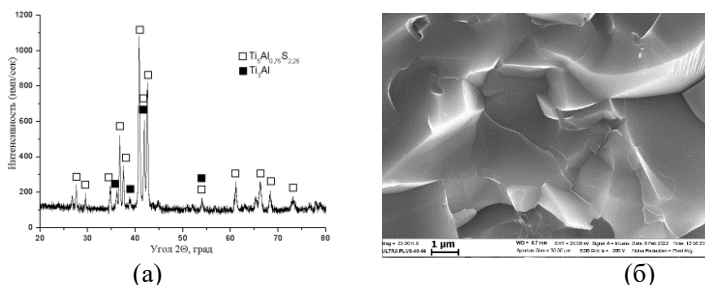


Рис 1. Данные (а) рентгенофазового анализа и (б) микрофотография поверхности излома сплава на основе Ti-Al-Si.

Температура инициирования СВС-реакции составляет 399 °С при скорости нагрева образца 2,7 °С/сек, а максимальная температура СВС-реакции – 1259 °С.

Синтезированному сплаву свойственна плотноупакованная зёрненная структура из зёрен с хорошей спайностью, имеющих форму

многогранников, размер которых изменяется в пределах – 8-10 мкм. На стыках зерен, образующих структуру сплава видны прослойки Ti_3Al , толщина которых менее 0,5 мкм. Поверхность излома зерен $Ti_{20}Al_3Si_9$ в основном соответствует хрупкому типу внутризеренного разрушения без заметных признаков пластической деформации с образованием фасеток внутризеренного и, частично, межзеренного скола, и ступенек скола (Рис.1, б).

Анализ микроструктуры в области соединения (переходной зоны) показал, что область соединения, образовавшаяся в результате взаимодействия Ti -подложки и слоя $Ti-Al-Si$ имеет ярко выраженное сварное соединение толщиной 1-2 мкм. Тепло, выделившееся в результате экзотермической химической реакции в реакционные таблетки в результате СВС-синтеза, способствует протеканию процессов реакционной диффузии в Ti – подложке и слоя $Ti-Al-Si$.

1. Kothari K., Radhakrishnan R., Wereley N.M. Advances in Gamma Titanium Aluminides and Their Manufacturing Techniques // Prog. Aerospace Sci. 2012. Vol. 55. pp. 1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.04.001>

АЛЛИЛЗАМЕЩЕННЫЕ ФУРАЗАНОАЗЕПИНОВ. СТРУКТУРА, ЭНТАЛЬПИЯ ОБРАЗОВАНИЯ, БАЛЛИСТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ

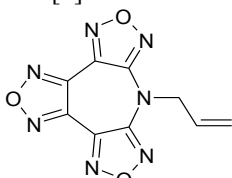
Д. Б. Лемперт^{1*}, А. И. Казаков¹, Г. В. Шилов¹, Е. Л. Игнатьева¹,
А. И. Степанов², Д. В. Дашко², А. В. Набатова¹, С. М. Алдошин¹

¹ИИХФ РАН, Черноголовка

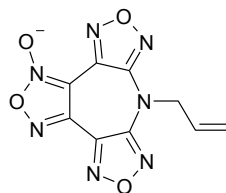
²ФГУП СКТБ "Технолог", С.Пб.

В последние 20 лет много работ было посвящено изучению высокоэнтальпийных энергетических соединений, среди которых есть группа производных азепина с фуразановыми кольцами. Они характеризуются высокими значениями энтальпии образования, применяются как компоненты взрывчатых составов и рассматриваются как компоненты смесевых твердых топлив. В последние три года некоторые подобные структуры начали изучать как потенциальные диспергаторы для твердых газогенераторных топлив [1-3].

В настоящей работе рассмотрены два новых компонента, AzAll (7-аллил-7H-трифуразано[3,4-b:3',4'-f:3'',4''-d]азепин) и Az(O)All (7-аллил-7H-дифуразано[3,4-b:3',4'-f]фуроксано[3'',4''-d]азепин), синтез которых впервые описан в [4].



AzAll C₉H₅N₇O₃



Az(O)All C₉H₅N₇O₄

В докладе представлено исследование кристаллической структуры **AzAll** и **Az(O)All**, чувствительности к механическим воздействиям, определение термохимических характеристик и кинетических закономерностей термораспада.

Рентгеноструктурным анализом установлено, что оба синтезированных соединения кристаллизуются в тригональной сингонии. Кристаллическая структура уточнена в нецентросимметричной пространственной группе R3c. Определены параметры кристаллической решетки, плотности веществ. При комнатной температуре плотность **AzAll** равна 1.525 г/см³, **Az(O)All** - 1.543 г/см³. Экспериментально определены энтальпии их образования (для **AzAll** равна 725±7, а для **Az(O)All** 722±5 кДж/моль). Оценены возможности применения в энергетических композициях.

Термодинамическим анализом установлено, что применение $AzAlI$ и $Az(O)AlI$ как компонентов СТРТ неэффективно из-за низкого содержания кислорода, но как диспергаторы газогенерирующих твердых топлив они могут оказаться вредны наиболее эффективных в классе высокоэнтальпийных полиазотистых N-гетероциклов.

Было показано, что эффективность указанных соединений как диспергаторов твердых топлив для ПВРД очень близка к эффективности широко изучаемого сегодня L-43 ($Az(O)NH_2$ – аналог $Az(O)AlI$, в котором вместо аллильной группы стоит аминная) и отличается на уровне $\pm 1\%$. $AzAlI$ более эффективен, чем $Az(O)NH_2$, а $Az(O)AlI$ – менее.

Поэтому при близости величин баллистической эффективности диспергаторов выбор для целевого применения определяется термической стабильностью. Топлива для ПВРД, в отличие от СТРТ, эксплуатируются при существенно более высоких температурах и именно термостабильность компонентов могут выйти на первый план. Стабильность $Az(O)NH_2$ и $Az(O)AlI$ была изучена экспериментально, применяя как неизотермические, так изотермические методы исследования. Установлено, что величины константы скорости начальной реакции термического разложения в ряду исследуемых производных азепинов $AzAlI$, $Az(O)NH_2$ и $Az(O)AlI$ относятся как 1:10:3900 соответственно. Наиболее термостабильным является $AzAlI$, затем $Az(O)NH_2$ и наименее стабилен $Az(O)AlI$.

Работа выполнена на средства ИПХФ РАН в рамках выполнения госзаданий (№№ госрегистрации АААА-А19-119101690058-9, АААА-А19-119100800130-0 и АААА-А19-119092390076-7)

Литература.

1. Яновский Л.С., Лемперт Д.Б., Разносчиков В.В., Аверьков И.С. // Журн. прикл. химии 2019. Т. 92, № 3. С. 322
2. А.Ф. Жолудев, М.Б. Кислов, И.С. Аверьков, Д.В. Дашко, В.В. Разносчиков, Д.Б. Лемперт, Л.С. Яновский. Изв АН сер.хим. 2021. вып.4. С.685-691
3. А. И. Казаков, Д. Б. Лемперт, А. В. Набатова, Д. В. Дашко, В. В. Разносчиков, Л. С. Яновский, С. М. Алдошин. ЖПХ, т. 92, №12, с. 1652-1660, 2019.
4. Лемперт Д.Б., Казаков А.И., Игнатьева Е.Л., Дашко Д.В., Набатова А.В., Шилов Г.В., Алдошин С.М. Аллилзамещенные азепинов, синтез, структура.. В сб. тезисов Международной научной конференции «Современная химическая физика на стыке физики, химии и биологии». 2021. С.61-62. Черноголовка

ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНЫЕ 1,2,3,4-ТЕТРАЗИНЫ С N-ОКСИДНОЙ ГРУППОЙ КАК КОМПОНЕНТЫ СМЕСЕВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

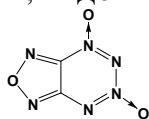
Согласнова С.И.¹, Дорофеев Е.М.¹, Лемперт Д.Б.^{1,@}, Кленов М.С.²

¹Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

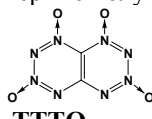
²Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН, Москва, Россия

@lempert@icp.ac.ru

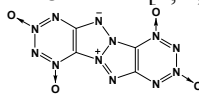
Теоретически самыми мощными компонентами смесевых энергетических систем (СЭС) на сегодняшний день являются два высокоэнтальпийных 1,2,3,4-тетразина, содержащие N-оксидные группы, ФТДО и ТТТО, впервые полученные в ИОХ РАН [1, 2, 3].



ФТДО [1],
ЭО=4320 кДж/кг



ТТТО [2],
ЭО=4316 кДж/кг



Тетразапентален
ТАП [3],
ЭО=5285 кДж/кг

Применение этих соединений в качестве основного наполнителя СЭС позволяет достигнуть величин удельного импульса I_{sp} до 270 с и выше, не вводя в рецептуры ни металлов, ни гидридов металлов. Несмотря на то, что синтез таких соединений как ФТДО и ТТТО сопряжен с большими трудностями, и по комплексу эксплуатационных свойств они не удовлетворяют всему комплексу требований, предъявляемому к компонентам СЭС, продолжают работы по поиску других энергоемких 1,2,3,4-тетразинов [3]. В работе [4] описаны результаты теоретических исследований еще не синтезированных производных 1,2,3,4-тетразина, проведены квантово-химические расчеты их структуры, плотности, энтальпии образования и оценены значения чувствительности к механическим воздействиям. Среди этих новых компонентов особое внимание привлекает ТАП (расчетная энтальпия образования (ЭО) = 5285 кДж/кг, плотность 2.047 г/см³, "невысокая" расчетная чувствительность к удару [4]). Последнее утверждение кажется чрезвычайно оптимистическим, но прежде следует оценить энергетический потенциал ТАП как компонента СЭС в сравнении с ФТДО и ТТТО. Проводили сравнение ФТДО, ТТТО и ТАП на примере бинарных композиций - основной наполнитель со связующим, активным (АС) или углеводородным (УС)

при условии объемного содержания связующего не ниже 19% и при температуре в камере сгорания не выше 3800 К. Из рис.1 видно, что при доле связующего не ниже 19 об.% можно достигнуть величин удельного импульса I_{sp} выше 282 с (для ТАП), 276 с для ФТДО, но с учетом дополнительного требования $T_c < 3800$ К - только смесь ТТТО+УС может обеспечить I_{sp} равный 275 с.

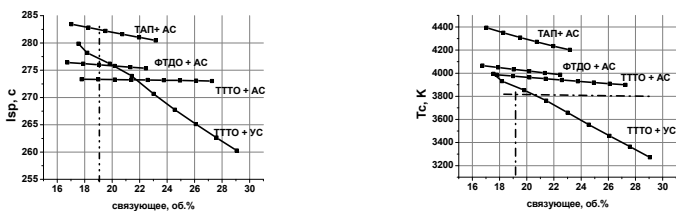


Рис.1. Зависимость I_{sp} и T_c бинарных смесей наполнителя со связующим от объемной доли последнего

Снижать T_c в подобных рецептурах можно, вводя перхлорат аммония (ПХА) [5].

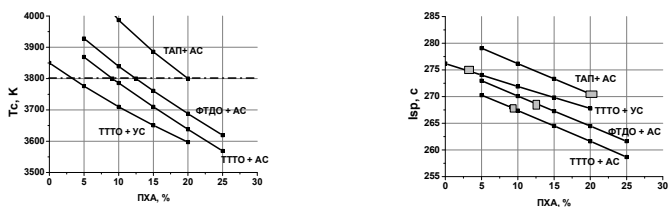


Рис.2. Зависимость I_{sp} и T_c смесей наполнитель + ПХА от содержания ПХА. Связующее 19–20 об.%

На рис. 2 маленькими прямоугольниками отмечено, до какой величины нужно поднять содержание ПХА, чтобы снизить T_c до 3800 К. Видно, что такой прием позволяет создать рецептуры на базе ТТТО, ТАП и ФТДО с приемлемым содержанием связующего и T_c не выше 3800 К, имеющие значения I_{sp} 275; 270 и 268 с, соответственно.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А19-119101690058-9).

[1] Churakov A.M., Ioffe S.L., Tartakovsky V.A., **1995**, Mendeleev Communications. **5**. 6. 227.

[2] Klenov M.S., Guskov A.A., Anikin O.V., Churakov A.M., Strelenko Yu.A., Fedyanin I.V., Lyssenko K.A., Tartakovsky V.A., **2016**, Angew. Chem. Int. Ed. **55**. 38. 11472.

[3] Churakov A., Voronin A., Klenov M., Tartakovsky V., **2022**, Comprehensive Heterocyclic Chemistry. IV. **9**. 640–661.

[4] Tan B. et al., **2013**, Propellants, Explosives, Pyrotech. **38**. 372.

[5] Зюзин И.Н., Гудкова И.Ю., Лемперт Д.Б., **2021**, Химическая физика. **40**. 7. 24.

ОПТИМАЛЬНЫЙ СОСТАВ СМЕСЕВОГО ТОПЛИВА БЕЗ МЕТАЛЛА С МАКСИМАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНОЙ УДЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА КАК ФУНКЦИЯ ЭНТАЛЬПИИ ОБРАЗОВАНИЯ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ОКИСЛИТЕЛЯ

Лемперт Д.Б.[®], Дорофеев Е.М.

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия
@lempert@icp.ac.ru

Поначалу развитие химии смесевых твердых топлив было направлено на создание окислителей с высоким содержанием кислорода, чтобы обеспечить максимальное тепловыделение при окислении углеводородного связующего до CO_2 и воды, а также металла до оксида. Однако к концу XX века стало очевидно, что следует развивать иной принцип создания топлив – переход к высокоэнтальпийным окислителям (с энтальпией образования (ΔH°_f) вплоть до 4000 кДж/кг и даже выше). Такие окислители практически не нуждаются в металле, т.к. при горении индивидуального соединения выделяется достаточно тепловой энергии именно за счет высокой ΔH°_f .

В настоящей работе рассмотрены зависимости оптимального содержания связующего (в качестве компонентов связующего принимали смесь углеводородного и активного связующих [1]) от величины ΔH°_f основного компонента (состоящего из атомов С, Н, N, O), от содержания в нем водорода, и от величины коэффициента насыщенности кислородом α ($\alpha = (2O)/(4C+H)$).

В качестве окислителей твердых топлив рассмотрено 12 модельных структур, где в каждом из нижеперечисленных рядов увеличивается массовая доля водорода, но величина коэффициента насыщенности окислителем α фиксирована:

а) $\text{C}_2\text{N}_8\text{O}_{3.2}$; $\text{C}_2\text{HN}_8\text{O}_{3.6}$; $\text{C}_2\text{H}_2\text{N}_8\text{O}_4$; $\text{C}_2\text{H}_{2.5}\text{N}_8\text{O}_{4.2}$ ($\alpha = 0.8$);

б) $\text{C}_2\text{N}_8\text{O}_4$; $\text{C}_2\text{HN}_8\text{O}_{4.5}$; $\text{C}_2\text{H}_2\text{N}_8\text{O}_5$; $\text{C}_2\text{H}_{2.5}\text{N}_8\text{O}_{5.25}$ ($\alpha = 1.0$);

в) $\text{C}_2\text{N}_8\text{O}_{4.8}$; $\text{C}_2\text{HN}_8\text{O}_{5.4}$; $\text{C}_2\text{H}_2\text{N}_8\text{O}_6$; $\text{C}_2\text{H}_{2.5}\text{N}_8\text{O}_{6.3}$ ($\alpha = 1.2$).

Каждой из 12 модельных структур задавали по пять величин ΔH°_f (0; 1; 2; 3 и 4 МДж/кг), т.е. в сумме рассматривали 60 модельных соединений в качестве основного наполнителя твердых топлив. Величины удельного импульса рассчитывали с помощью стандартной программы расчета химических равновесий ТЕРРА [2].

Было показано, что при заданном значении объемного содержания связующего в топливной композиции (19% об.) можно

увеличить удельный импульс композиций на базе окислителей с коэффициентом α от 0.6 до 1.3 путем нахождения оптимального массового соотношения углеводородной и активной составляющих в связующем. Чем выше величина α основного наполнителя, тем большую энергетику обеспечит связующее, характеризующееся меньшей величиной α .

Изучены также:

а) влияние количества водорода в окислителе (при постоянных ΔH°_f и α) на энергетику твердых топлив;

б) зависимость оптимального содержания углеводородного связующего в смеси активного и углеводородного связующих от ΔH°_f окислителя при одинаковом элементном составе последнего.

Показано, что при повышении величин ΔH°_f и α окислителя и содержания в нем водорода, более оптимальны связующие с меньшей величиной α .

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А19-119101690058-9).

[1] Lempert D.B., Nechiporenko G.N., Manelis G.B., **2006**, Cent. Eur. J. Energ. Mater. **3**, 4. 73-87.

[2] Trusov B.G., **2002**, Program System TERRA for Simulation Phase and Thermal Chemical Equilibrium, XIV Intern. Symp. on Chemical Thermodynamics, St-Petersburg. 483-484.

РАСЧЁТ ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В СМЕСИ « O_2+He » С УЧЁТОМ ДИССОЦИАЦИИ КИСЛОРОДА В ПРЕДПЛАМЕННОЙ ОБЛАСТИ

Крюков А.Ю., Малинин В.И.

*Пермский национальный исследовательский политехнический
университет
malininvi@mail.ru*

Основная особенность горения частиц алюминия в смесях кислорода с гелием заключается в том, что капли алюминия горят в парофазном режиме, не образуя оксида на поверхности металла [1]. Причём эта особенность сохраняется в широком диапазоне изменения размеров частиц и давления окружающей среды. Второй особенностью является узкая зона пламени вокруг частицы (отношение радиуса пламени R_f к радиусу частицы R_0 лежит в пределах 2 .. 2,4) [2].

В настоящее время нет моделей, объясняющих эти особенности. Поэтому предлагается модель, описывающая процессы горения частицы алюминия в среде «21% $O_2+79\% He$ » с учётом диссоциации кислорода. К физической модели [3] добавлена область, где процессы горения ещё не идут, но существенна диссоциация (предпламенная область). Используются подход и математическое моделирование структуры пламени, аналогичные представленным в работе [3], где учтена конечная ширина фронта, описано распределение температуры газовой фазы и продуктов сгорания алюминия в пространстве вокруг частицы. Дополнительно, при расчёте диффузионных потоков учтён стефановский поток. В предпламенной области и в зоне пламени приняты условия квазистационарности и термодинамической равновесности процессов за исключением зоны, прилегающей к частице, где процессы являются неравновесными и оксид алюминия не образуется.

Выполнены расчёты термодинамических параметров и размеров зон пламени вокруг крупной частицы алюминия диаметром 220 мкм при давлении среды 0,1 МПа. Построены зависимости концентраций окислительных компонентов и температуры среды от относительного расстояния от центра частицы R/R_0 . Для горения в смеси гелия и кислорода внешняя граница пламени $R/R_0=2,4$, что соответствует экспериментальным данным, опубликованным в [2], где определено, что $R/R_0=2,2\pm 0,2$. Скорость горения частицы (расход металла на единицу площади поверхности), которая по данным разных источников [1, 4], лежит в пределах 0,00230 ... 0,0043 г/(см²·с).

Авторами она определена равной $0,00395 \text{ г}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$, т.е. согласуется с экспериментальными данными [4].

Значение концентрации окислителя падает в направлении поверхности частицы, но с ростом температуры всё большая часть кислорода диссоциирует, до внешней границы пламени R_f концентрация атомарного кислорода увеличивается, его поток направлен в окружающую среду и замедляет процесс диффузии окислителя к зоне пламени. Полученное значение относительного давления (концентрации) окислителя p_{ox}/p равно $0,037$, что более чем в 2 раза ниже, чем дают вычисления без учёта диссоциации. В зоне пламени концентрация окислителя падает ещё значительно, и на поверхности она составляет менее $0,003$. Конденсированный оксид на поверхности частицы при таком низком давлении не образуется из-за термодинамических ограничений, что соответствует экспериментальным данным [1].

Разработанная модель позволяет объяснить существенные закономерности горения частиц алюминия в смесях кислорода и гелия и соответствующие экспериментальные данные. Представленные результаты исследований предназначены для анализа и моделирования динамики процессов горения частиц алюминия, причём впервые учтена диссоциация кислорода в предпламенной области и существенное влияние коэффициентов переноса на температуру и концентрацию окислителя вокруг горящей частицы. Разработанная методика расчёта термодинамических параметров может быть адаптирована к изучению горения частиц Al других исходных размеров в различных средах, а также использоваться для промышленных порошков алюминия – порошкообразного металлического горючего.

1. Г.П. Кузнецов, А.Г. Истратов, В.И. Колесников-Свинарёв, И.Г. Ассовский. Особенности горения капли алюминия в смесях кислорода с аргонем и гелием //Горение и взрыв, 2018, Т. 11 № 2. – С. 83-87.

2. A. Braconniera et al. Experimental investigation of the aluminum combustion in different O_2 oxidizing mixtures: Effect of the diluent gases //Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 170 (2020), pp. 110110.

3. A.Yu. Kriukov, V.I. Malinin. Analysis of combustion peculiarities in flame zone of aluminium particle //Acta Astronautica, 180 (2021), pp. 266–272.

4. М.В. Бекстед. Анализ данных по времени горения частиц алюминия //Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 5. С. 55–69.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА САЖЕОБРАЗОВАНИЕ ПРИ ГОРЕНИИ УГЛЕВОДОРОДОВ

З.А. Мансуров^{1,2}

¹*Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан*

²*КазНУ имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби 71, Алматы, Казахстан*
zmansurov@kaznu.edu.kz

Дан исторический экскурс исследований горения углеводородов в электрическом поле. Изучены процессы сажеобразования при горении метанкислородной смеси в электрическом поле при изменении прилагаемого потенциала от 0 до 2,2 кВ при разной полярности электродов. Установлено, что при наложении электрического поля происходит уменьшение размеров сажевых частиц и выхода сажи; кроме того, при применении поля, ускоряющего положительно заряженные частицы, уменьшается межплоскостное расстояние.

Влияние электрического поля на процессы горения углеводородов представляет большой интерес для направленного химического синтеза и управление сажеобразованием в экологических целях.

Влияние электрического поля на пламя впервые наблюдал в 1814 году Бранде [1], который обнаружил, что поведение пламени существенно меняется, когда пламя помещается между двумя электродами.

Многочисленные экспериментальные исследования, связанные с воздействием электрических полей на пламена, дали обширный материал для теоретического истолкования наблюдающихся эффектов и содействовали их использованию в практических целях [2].

Эти работы, начатые в начале века Томсоном в Англии, Хабером в Германии, Гено и Уиллером во Франции, Малиновским и его сотрудниками в Советском Союзе и продолжающиеся до настоящего времени многочисленными группами в разных направлениях и под разными углами зрения, показали, что взаимодействия постоянных и переменных электрических полей и газовых пламен приводит к различным эффектам, которые в конечном счете могут быть полезно использованы.

В институте проблем горения изучено горение сажеобразующего метана в электрическом поле в проточном кварцевом реакторе [3]. Цель работы – оптимизация условий горения путем выбора формы электродов и расстояния между ними, а также изучение влияния

величины приложенного потенциала и его полярности на выход и размеры сажевых частиц.

Проведен краткий анализ работ по влиянию внешнего электрического поля на сажеобразование, на выход и структурные характеристики продуктов сгорания. Проведено сравнение свободно-радикального и ионного механизмов сажеобразования и образования супергидрофобных углеродных поверхностей при горении углеводородов без наложения и с наложением электрического поля и его влияние на размеры сажевых частиц [4].

- [1] Brande W.T., 1814, Philas. Trans. R. Soc. 104.51–61. DOI: 10.1098/rstl.1814.0005
- [2] Кидин Н.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М., 1975, Институт проблем механики АН СССР, Москва Предпринт №51. 55.
- [3] Мансуров З.А., Меркулов А.А., Попов В.Т., Тулеутаев Б.К., Алмазов Н.С., 1994, Химия твердого топлива. 3.83-86.
- [4] Мансуров З.А., 2022, Горение и Плазмохимия. 1.39-48. <https://doi.org/10.18321/cpc480>

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЦЕПТУР И ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ПАСТООБРАЗНЫХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Мелешко В.Ю.^{1,2@}, Павловец Г.Я.^{1,2}, Булавский А.С.², Михайловская Л.А.

1 – ФИЦ ХФ имени Н.Н. Семенова РАН

2 - Военная академия РВСН имени Петра Великого

vladmela@rambler.ru

Анализ существующих и перспективных образцов энергосиловых установок, функционирующих в экстремальных условиях повышенных перегрузок, свидетельствует о возросшем интересе к комбинированным двигательным установкам на пастообразных топливных композициях (ПТК) [1]. ПТК представляют собой седиментационно устойчивые высококонцентрированные эмульсии, обладающие тиксотропными свойствами и сохраняющие физико-химическую стабильность и вязкотекучее состояние в заданном температурном диапазоне эксплуатации. Использование ПТК в энергосиловых установках и газогенераторах позволяет управлять тяговыми характеристиками и осуществлять многократное изменение энергетических параметров при регулировании. ПТК допускают достаточно широкий диапазон изменения соотношения компонентов состава, что позволяет эффективно решать задачи создания рецептур, обеспечивающих высокий удельный импульс тяги с очень высокой или очень малой скоростью горения [2].

В основу научно-технического обоснования направлений формирования рецептур ПТК предложены концептуальные положения, включающие необходимость использования при формировании их рецептур относительно дешевых и доступных компонентов, имеющих отечественную производственную и сырьевую базу, обеспечивающих повышение энергомассовых и эффективное регулирование баллистических характеристик ПТК. При формировании пастообразных рецептур значимым является содержание жидковязкого связующего (ЖВС) в пределах от 15 до 25%, позволяющее совместно с ультра- и нанодисперсными горючими, в качестве которых применяют порошки бора, смесь порошков боридов алюминия (средний размер частиц порошков составляет 60-350 нм), полученные методом плазменной переконденсации, и сажи с размером частиц 3-5 нм, обеспечить седиментационную устойчивость ПТК и тиксотропные свойства. При использовании окислителя следует ограничиться его содержанием 20-35% в ПТК, поскольку при более высоком его содержании значительно снижаются энергомассовые характеристики, а при более низком не обеспечиваются воспламенение и устойчивое горение.

Максимальный эффект в регулировании показателя ν в законе горения ПТК и полноты диспергирования обеспечивается путем использования комбинации управляющих факторов, состоящей, как минимум, из двух «регуляторов». Один из них должен активировать процесс термолiza окислителя в сторону снижения температуры начала его интенсивного разложения. Другим «регулятором» выступает уровень реакционной активности горючих, способных вступать во взаимодействие с продуктами термолiza окислителя в конденсированной фазе волны горения со значительным тепловыделением и газообразованием [3].

Предложена феноменологическая модель горения ПТК, объясняющая влияние продуктов термолiza окислителя на процессы тепловыделения в конденсированной фазе и диспергирования первичных продуктов горения. Суть модели заключается в том, что стационарное горение поддерживается суммарно экзотермическими реакциями в конденсированной фазе при отсутствии тепловых потоков из зоны первичных продуктов горения ПТК, при этом взаимодействие продуктов разложения окислителя с компонентами топлива определяется реакционной активностью твердофазного горючего и продуктов пиролиза компонентов ЖВС с образованием газообразных и конденсированных первичных продуктов взаимодействия окислителя и горючего и выходом первичных продуктов горения во вторичную камеру с доокислением кислородом воздуха.

Сформулированные направления формирования рецептур ПТК позволяют создавать рецептуры ПТК с высокими энергомассовыми и требуемыми баллистическими характеристиками.

[1] Сорокин В.А. Ракетно-прямоточные двигатели на твердых и пастообразных топливах / В.А. Сорокин, Л.С. Яновский, Е.В. Суриков и др. – М.: Физматлит, 2010. – 320 с.

[2] Павловец Г.Я., Мелешко В.Ю., Бурдикова Т.В., Константинова М.А., Булавский А.С. Перспективы разработки пастообразных энергоемких композитов для средств поражения // Сб. трудов XXII научно-практ. конф. «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Том 1. Вооружение и военная техника. НПО СМ - РАРАН. - Санкт Петербург. 2019. –С.117-121.

[3] Павловец Г.Я., Мелешко В.Ю., Булавский А.С., Бурдикова Т.В. Возможности регулирования баллистических характеристик пастообразных энергоёмких композитов // Сб. трудов Десятой всерос. конф. «Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах» (ИСОС'2020). Ижевск: УдмФИЦ УрО РАН, 2020. - С. 235-239.

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЕЩЕСТВ С ВЫСОКОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

Мелешко В.Ю.^{1@}, Павловец Г.Я.¹, Грек А.А.², Златкина В.Л.²

1 – ФИЦ ХФ имени Н.Н.Семенова РАН

2 - Военная академия РВСН имени Петра Великого

vladmelve@rambler.ru

Дальнейшее совершенствование твердотопливных энергосиловых установок для ракетно-космической техники базируется преимущественно на совершенствовании характеристик энергетических конденсированных систем (ЭКС), являющихся на сегодняшний день безальтернативными источниками энергии и генераторами рабочего тела. Возможности повышения энергетики ЭКС при использовании известных компонентов практически полностью исчерпаны.

Синтез существенно более энергоемких веществ, пригодных для использования в качестве новых компонентов ЭКС считается все менее вероятным. Богатый опыт химии энергоемких соединений показывает, что вещества с высокой энергоемкостью, как правило, обладают большей чувствительностью к механическим воздействиям, меньшей стойкостью, худшей совместимостью с другими компонентами.

Предполагается, что поиск новых компонентов с высокими значениями энтальпии образования и плотности целесообразно сосредоточить в области синтеза органических соединений состава *CHON*, в частности, полимеров и пластификаторов. Подтверждением этого положения является большой объем исследований по возможности получения новых соединений различного строения и методов прогнозирования свойств таких соединений, исходя из предполагаемой химической структуры. Такие соединения получили наименование - вещества с высокой энергетической плотностью (ВВЭП) или High Energy Density materials (HEDM) [1-3].

Состояние современных исследований ВВЭП на основе энергоемких гетероциклических соединений состава *CHNO* свидетельствует о том, что наибольший интерес представляют гетероциклические соединения азота, в частности, на основе тетразола и триазола [4-6].

Совместно с ИОХ имени Н.Д. Зелинского осуществлен синтез ряда полимерных триазолов и определены их основные характеристики. Получены закономерности их влияния на энергетические

характеристики порохов и баллистических твердых топлив при замене нитратов целлюлозы на синтезированные полимерные соединения [7].

Полученные результаты позволяют предположить, что использование синтетических полимеров на основе триазола является целесообразным и позволяет увеличить энергетические характеристики ЭКС, что невозможно сделать с использованием существующих компонентов.

Процесс отработки методик синтеза и модификации свойств энергонасыщенных компонентов, а также экспериментальная отработка рецептур ЭКС на их основе являются длительными и ресурсозатратными. Исследования в направлении синтеза новых компонентов ЭКС с высокой энергетической плотностью являются очень рискованными в техническом отношении, однако потенциальный положительный результат может быть положительным и заслуживающим пристального внимания.

[1] Chen Yongjin, Ba Shuhong. *Johnson Matthey Technol. Rev.*, 2019, 63, (1), 51. <https://www.technology.matthey.com/article/63/1/51-72/>.

[2] Klapotke T.M. *Chemistry of high-energy materials*. 2011. Walter de Gruyter GmbH and Co. KG, Berlin, New York. - 233p.

[3] Шереметьев А.Б. *Химия гетероциклических соединений*. Т.53, №6/7. 2017. - С.629.

[4] Гудкова И.Ю., Лемперт Д.Б. Некоторые гипотетические производные тетразола как компоненты смесевых ракетных топлив. Сб. трудов Всероссийской конф. «Химия нитросоединений и родственных азот-кислородных систем». -М.: ИОХ РАН. 2019. – С.241-244.

[5] Гудкова И.Ю., Косилко В.П., Лемперт Д.Б. *Физика горения и взрыва*. №1. 2019. – С.37-48.

[6] Княжев В.Н., Голобокова Т.В., Покатилов Ф.А., Верещагин Л.И., Эстрин Я.И. *Химия гетероциклических соединений*, №6/7. 2017. - С.682-692.

[7] Павловец Г. Я., Мелешко В.Ю., Горбачев В.А., Гладышев А.И. *Известия РАН*, №4, 2020. –С.111-116.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ К УДАРУ И СКОРОСТЬ РЕАКЦИИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

Назин Г.М.^{1@}, Лемперт Д.Б.¹, Корсунский Б.Л.^{1,2}, Казаков А.И.¹,
Набатова А.В.¹, Самойленко Н.Г.¹

¹*Институт проблем химической физики РАН*
²*ФИЦ химической физики им. Н.Н. Семенова РАН*
@gmnazin@yandex.ru

Для четырнадцати химических соединений, охватывающих все основные классы взрывчатых веществ состава HCNO, по формулам, описывающим очаговое самовоспламенение, произведен расчет критических температур $T_{кр}$, кинетических параметров (энергий активации E и предэкспоненциальных факторов z), а также теплового эффекта ($Q_{разл}$) реакции термического разложения в твердой фазе. Показано, что $T_{кр}$ является наиболее точной характеристикой реакции разложения. Значения $T_{кр}$ лежат в интервале 700 – 1150 К. Установлена корреляционная связь между критическим давлением возбуждения взрыва $P_{кр}$ и $T_{кр}$: $P_{кр} \text{ (кбар)} = P_{кр} \text{ (кбар)} = -6.0 + 0.002T_{кр}$, ($r = 0.91$). Если величины $Q_{разл}$ и энергии активации реакции в твердой фазе $E_{тв}$ заменить на максимальные теплоты разложения $Q_{макс}$ и энергии активации реакции в жидкой фазе $E_{ж}$ (определить эти величины значительно проще, причем определяются они с существенно большей точностью, чем $E_{тв}$ и $Q_{разл}$), то корреляционная зависимость между $P_{кр}$ и $T_{кр}$ сохраняется: $P_{кр} \text{ (кбар)} = -4,4 + 0.015T_{кр}$ ($r = 0.89$). Эту зависимость удобно использовать для приближенной оценки относительной чувствительности новых ВВ.

Существование устойчивой корреляционной зависимости между $P_{кр}$ и $T_{кр}$ свидетельствует о том, что чувствительность взрывчатых веществ к удару в наибольшей степени определяется скоростью реакции термического разложения (точнее, скоростью тепловыделения при термическом разложении), тогда как другие факторы влияют на чувствительность значительно слабее.

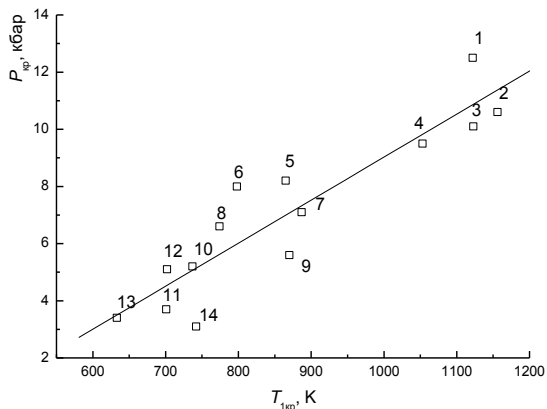
Известно, что критическое давление возбуждения взрыва часто коррелирует с различными энергетическими параметрами ВВ, такими, например, как максимальная объемная теплота разложения $\rho Q_{макс}$ (ρ – плотность) или кислородный баланс ($КБ$). Однако все эти корреляции выполняются лишь в тех случаях, когда вышеупомянутые параметры коррелируют с $T_{кр}$.

Приведенные выше корреляционные зависимости между $P_{кр}$ и $T_{кр}$ хорошо выполняются лишь в том случае, когда исследуемые

вещества имеют близкие значения предела прочности $\sigma_{пр}$. Во многих ВВ состава HCNO это условие действительно выполняется. Однако так бывает не всегда. Так, предел прочности октогена (125 МПа) заметно выше, чем у гексогена (52 МПа), что и обуславливает его более высокую чувствительность, несмотря на то, что величины $T_{кр}$ для этих веществ весьма близки. Подобным же образом высокая пластичность 1,3,5-диамино-2,4,6-тринитробензола, обуславливающая его низкую прочность, обеспечивает исключительно низкую чувствительность к удару.

Четырнадцать веществ, данные для которых использованы в настоящей работе, включали 1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензол (1), тротил (2), 5-амино-4,6-динитробензофуросан (3), пикриновую кислоту (4), гексоген (5), тетрил (6), октоген (7), ТЭН (8), бензотрифуроксан (9), бис-(тринитроэтил)нитрамин (10), 1,1,1,3,6,8,8,8-октанитро-3,6-диазаоктан (11), гексанитрогексаазаизовюрцитан (12), фуразанотетразиндиоксид (13), бис(дифтораминодинитроэтил)нитрамин (14).

Рисунок иллюстрирует корреляционную зависимость между $P_{кр}$ и $T_{кр}$ для изученных веществ.



Работа выполнена по темам государственного задания, №№ госрегистрации АААА-А19-119101690058-9 и АААА-А19-119120690042-9.

ИНГИБИРОВАНИЕ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ ДЕТОНАЦИИ ГАЗОВОЙ ДОБАВКОЙ

В. Ф. Никитин¹, Е.В. Михальченко^{1,@}, В. В. Азатян¹

¹*Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва*

@MikhalchenkoLena@yandex.ru

Детонация представляет собой сложное явление, обусловленное трехмерной волновой структурой с неоднородным динамическим волновым фронтом [1-4]. Если рассматривать движение тройной точки через покрытую сажей детонационную трубу, то силы сдвига от этих тройных точек оставляют на внутренних стенках рисунок, похожий на рыбу чешую. Эта модель известна как детонационная ячейка. По мере распространения ведущего ударного фронта вниз по течению тройные точки чередуются. Одновременно поперечная волна совершает колебания перпендикулярно направлению распространения [5]. Было обнаружено, что эти детонационные ячейки являются одним из наиболее важных параметров в исследованиях детонации. В статье рассматривается влияние углеводородного ингибитора на развитую детонацию в водородно-воздушной смеси, разрушение детонационной ячейки.

Химическая реакция водорода с воздухом — классический пример разветвленной цепной реакции. В цепных реакциях важную 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 уменьшить с помощью химической добавки, то реакция замедлится. Замедление реакции вовсе не означает уменьшение ее энергии. Снижение активности H может быть достигнуто многими способами, одним из которых является присоединение к ненасыщенному углеводороду с устраниением двойной связи между атомами углерода. Образовавшийся алкановый радикал гораздо менее активен, чем атомарный водород. В работе пропилен C_3H_6 действует как ингибитор; добавление к нему

атомарного водорода дает два варианта пропильного радикала C_3H_7 . Самоподдерживающиеся свойства детонации во многом определяются временем задержки тепловыделения, которое определяется временем развития цепного процесса. Удаление атомарного водорода H из цепного процесса замедляет реакцию и приводит к переходу первоначально развившейся пересжатой детонации в режим горения.

В работе проведено моделирование формирования ячеистой детонационной структуры с целью изучения влияния добавления в смесь небольшого количества пропилена. Исследовано влияние начальной температуры на расчетную ячеистую структуру детонации стехиометрической водородно-воздушной смеси. Также исследовано влияние ширины канала на характер детонации.

Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН на выполнение государственного задания № 1021061509701-5-1.2.1 «Разработка алгоритмической компоновки и программ для расчета многомасштабных процессов и горения» (FNEF-2022-0021).

[1] Gamezo V.N., Vasil'ev A.A., Khokhlov A.M., Oran E.S., 2000. Proceedings of the Combustion Institute, 28(1), 611-617.

[2] Lee J., Knystautas R., Freiman A., 1984. Combustion and Flame, 56.

[3] Kuo K., 2005, Principles of Combustion, McGraw-Hill, Boston.

[4] Levin V. A., Manuylovich I. S., Markov V. V., 2015. Papers of the Academy of Sciences, 460 (1): 35–38.

[5] Gavrikov, A., Efimenko, A., Dorofeev, S., 2000. Combustion and Flame, 120, 19-33.

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ГАЗОФАЗНОЙ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ *МОНО*-ЗАМЕЩЕННЫХ НИТРОАРЕНОВ С ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИМИ ЗАМЕСТИТЕЛЯМИ

Николаева Е.В.^{1,@}, Чачков Д.В.², Шамов А.Г.¹, Храпковский Г.М.¹








¹Казанский национальный исследовательский технологический университет

²Казанское отделение Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН – филиал Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований РАН»

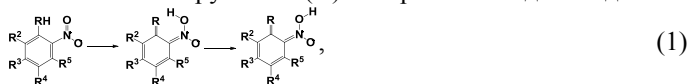
@ nikol_ek@mail.ru

До недавнего времени считался бесспорным тот факт, что реакция нитро \rightleftharpoons *аци*-нитро таутомерии является первичным актом газофазного мономолекулярного термического разложения нитроаренов с водородсодержащими заместителями в *орто*-положении к нитрогруппе [1,2]. Однако подробные квантово-химические расчеты альтернативных первичных реакций газофазной мономолекулярной термодеструкции нитротолуолов, нитроанилинов и нитрофенолов, а также вторичных процессов наиболее энергетически выгодных из этих стадий [3,4], показали неоднозначность подобного утверждения. Покажем это на примере простейших представителей рядов ароматических нитросоединений – 2-нитротолуоле (**1**), 2-нитроанилине (**2**), 2-нитрофеноле (**3**). Для всех этих соединений реакция сигматропного сдвига атома водорода от заместителя RH к кислороду группы NO₂ с образованием *аци*-формы, действительно, имеет наименьший среди альтернативных процессов энергетический барьер (табл. 1) [3,4].

Таблица 1. Энтальпии активации (кДж/моль) и предэкспоненциальные множители (с⁻¹) альтернативных механизмов первичных стадий газофазной мономолекулярной термодеструкции 2-нитротолуола (**1**), 2-нитроанилина (**2**) и 2-нитрофенола (**3**) (B3LYP/6-31+G(2df,p)).

Соединение	Продукты реакции							
		+ NO ₂	+ RH [•]					
1	ΔH^\ddagger	271.9	403.2	271.6	238.7	247.2	240.4	169.3
	lgA	-	-	18.1	13.4	12.4	12.7	12.1
2	ΔH^\ddagger	299.7	438.0	297.5	260.2	258.2	250.9	172.8
	lgA	-	-	17.2	12.4	12.4	12.4	12.9
3	ΔH^\ddagger	304.9	475.5	302.0	275.6	267.9	271.5	132.6
	lgA	-	-	17.5	13.9	12.9	13.0	13.6

При этом механизм нитро \rightleftharpoons *аци*-нитро таутомерии для молекул **1**, **2** и **3** отличается друг от друга. Для 2-нитрогулола процесс переноса атома водорода от группы RH и разворот его вокруг вновь образующейся связи OH в группе =N(O)OH протекает в две стадии:



тогда, как для 2-нитроанилина и 2-нитрофенола этот путь является одностадийным:



Однако наиболее важным является тот факт, что лишь для 2-нитротолуола [3] реализация канала, связанного с образованием его *аци*-формы является бесспорным, а для 2-нитроанилина и 2-нитрофенола [4] самый энергетически выгодный канал первичного акта, скорее всего, является «тупиковым», т.к. расчетные значения активационных параметров вторичных реакций значительно превышают экспериментальные значения.

Таким образом, напрашивается вывод о необходимости поиска новых механизмов термического распада нитроаренов с водородсодержащими заместителями в *орто*-положении к нитрогруппе. Здесь возможны различные варианты. Отметим, что на примере 2-нитрофенола мы оценили возможность реализации бимолекулярных стадий. Предварительная оценка на качественном уровне параметризованным полуэмпирическим методом QM_N3 [5] показала перспективность дальнейшего исследования в этом направлении на более высоком уровне теории. Другими словами, бимолекулярные реакции термического разложения соединения **3** могут играть значительную роль при его термораспаде.

[1] Матвеев В.Г., Дубихин В.В., Назин Г.М., 1978, *Изв. АН СССР. Сер. хим.*, **27**, 4, 783-786.

[2] Храпковский Г.М., Шапов А.Г., Николаева Е.В., Чачков Д.В., 2009, *Успехи химии*, **78**, 10, 980-1021.

[3] Николаева Е.В., Чачков Д.В., Шапов А.Г., Храпковский Г.М., 2018, *Изв. АН. Сер. хим.*, **67**, 2, 274-281.

[4] Николаева Е.В., Чачков Д.В., Шапов А.Г., Храпковский Г.М. 2019, В сб.тр. *Всерос. конф. «Химия нитросоединений и родственных азот-кислородных систем» (АКС-2019)*, Москва, 156-163.

[5] Laikov D., 2011, *J. Chem. Phys.*, **135**, 134120.

ТЕРМОЛИЗ ОКТОГЕНА В ПРИСУТСТВИИ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ

Круглякова Л.А., Пехотин К.В.[@], Голубцова О.А., Тагильцева В.Ю.
Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева
г. Красноярск, Российская Федерация
[@] kvp555@yandex.ru

Поиск эффективных катализаторов термического разложения и горения октогена является актуальной задачей при его использовании в составах топлив [1-2]. В продолжение работ [3-5] изучен термолиз октогена с добавками оксидов ванадия (V), кобальта (II, III), марганца (II, III, IV), вольфрама (VI) в неизотермических условиях на дериватографе Q-1500D при скоростях нагрева 1,25; 2,5; 5 и 10 град/мин от комнатной температуры до 500°C. Соотношение добавки и октогена составляло 5:95 (масс. ч.). Методика нанесения добавок описана в работе [3].

Температуры начала, T_b , и интенсивного разложения, T_{max} (соответствующая максимуму на кривой теплового эффекта), изученных образцов при скорости нагрева 10 град/мин, а также рассчитанные активационные параметры приведены в таблице. Совмещенный график кривых тепловых эффектов при нагреве всех образцов со скоростью 10 град/мин представлен на рис. 1.

Таблица – Кинетические параметры термического разложения НМХ с добавками оксидов металлов

Образец	T_b , °C	T_{max} , °C	E_a , кДж/моль		lg A методом Киссинд- жера
			методом Киссинд- жера	методом Озава	
НМХ без добавок	262	276	213,9	211,9	$1,95 \cdot 10^{19}$
НМХ + V ₂ O ₅	261	273	150	146	$1,1 \cdot 10^{17}$
НМХ + Co ₃ O ₄	261	274	175	171	$3,91 \cdot 10^{19}$
НМХ + MnO	262,5	275	159	155	$8,35 \cdot 10^{17}$
НМХ + Mn ₂ O ₃	260	273,5	176	172	$4,58 \cdot 10^{19}$
НМХ + MnO ₂	259	271,5	133	129	$2,99 \cdot 10^{15}$
НМХ + WO ₃	264,5	273	261	256,8	$6,53 \cdot 10^{12}$

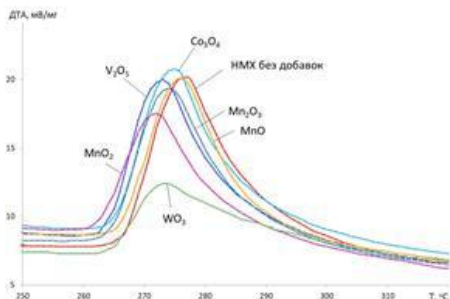
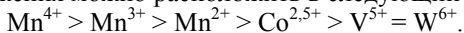


Рис. 1. Термограммы разложения октогена в присутствии оксидов металлов (скорость нагревания 10 град/мин)

Из таблицы и рис. 1 видно, что изученные добавки несколько снижают температуру начала и интенсивного разложения.

Наибольшее влияние на температуру интенсивного разложения проявил диоксид марганца, наименьшее показали оксиды ванадия и вольфрама. Все добавки по снижению температуры интенсивного разложения можно расположить в следующий ряд:



Для выяснения влияния природы металла на снижение термической стойкости октогена были построены зависимости T_b и T_{\max} от окислительно-восстановительных потенциалов, а также от потенциалов ионизации металлов. Оказалось, что между стандартными электродными потенциалами металла и температурами начала и интенсивного разложения октогена с добавками оксидов металлов отсутствует какая-либо зависимость. В то же время имеется тенденция снижения T_b и T_{\max} с увеличением степени окисления (потенциала ионизации атома, I, эВ) металла.

Установленная зависимость требует более глубокого изучения с использованием большего числа модельных соединений, однако, в целом, она свидетельствует в пользу участия катиона металла в ускорении термического разложения октогена за счет возникновения окислительно-восстановительных реакций с исходным октогеном или продуктами его распада.

[1] Fifer R.A., McBratney W.F., 1983. ARBRL-MR-0330.

[2] Муравьев, Н.В., 2013. Горение и взрыв. 2013. **6**. 195-200.

[3] Stepanov R.S., 2004. Comb., Expl. and Shock Waves. **40**(5). 576-579.

[4] Степанов Р.С., 2000. ФГВ. **36**(5). 74-77.

[5] Круглякова Л.А., 2021. Решетневские чтения. XXV Междунар. науч.-практ. конф. Ч. **1**. 649-651.

АКУСТИКА ГОРЕНИЯ И ЕЁ ПРОЯВЛЕНИЯ

В.А. Пинчук¹, А.В. Пинчук²

¹ БГТУ «ВОЕНМЕХ им. Д.Ф. Устинова», Санкт-Петербург,
vap@vp7550.spb.edu

² Научно-технический центр «ПРОТЕЙ», Санкт-Петербург,
avp@protei.ru

Исследуется и устанавливается акустический характер механизмов формирования фиксируемых при горении макроскопических образований с нескомпенсированным электрическим зарядом (аквазинейтральных) в составе реагирующей среды. Среди прочего, в рамках концептуального подхода и с учётом подтверждаемой в работе зависимости условий внутреннего энергетического равновесия материальных сред (между различными по природе физической природе энергетическими состояниями) от наличия или отсутствия в их составе избыточного заряда обосновываются источники и механизмы энергообеспечения (энергоподпитки) свойственной горению внутрикамерной неустойчивости, уточняется вклад акустики в обеспечение устойчивости (воспроизводимости во времени) процесса, отмечаются возможности превышения уровней удельного энерговыделения энергии над совокупным энергосодержанием участвующих в процессе горения компонент.

Работа базируется на работах авторов ([1-7], например) и, в этой связи, представляет собой их продолжение и дальнейшее логическое развитие. .

[1] Пинчук В.А. Низкотемпературная плазма в условиях развитых акустических воздействий // ЖТФ. 1994. Т. 67. № 1-2. С. 112-118.

[2] Пинчук А.В., Пинчук В.А. Зарядовый канал возбуждения реакций при горении // Журнал «Горение и плазмохимия». 2007. Т. 5, №4. С. 307-319.

[3] Pinchuk A. V., Pinchuk V. A. The Formations with Surplus Charge: Nature and Influence upon Burning Process Stability // In: Book of abstracts of 6th International Seminar on Flame Structure - Brussels, Belgium. 14-17 September 2008. P. 60.

[4] Пинчук А.В. Условия внутреннего энергетического равновесия как объект экспериментальных исследований // Мат. Межд. Науч.-техн. конф. «4-е Уткинские чтения», Санкт-Петербург. Изд. БГТУ. 2009. С. 6-9.

[5] Пинчук В.А., Пинчук А.В. Физика реальных процессов с аномальными проявлениям // Санкт-Петербург. Россия. Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ». 2016. 165 с.

[6] Pinchuk VA. Pinchuk AV. Acoustics of process as a factor of forming in the combustion zone of formations with excess charge // AKUSTIKA. 2019. Vol. 32. P. 88-91.

[7] Pinchuk VA. Pinchuk AV. Charge formations in the combustion zone and characteristics of the process // AKUSTIKA. 2019. Vol. 33. P. 106-113.

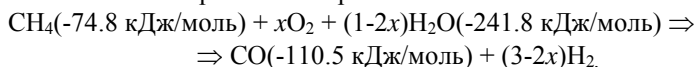
ВОЗМОЖНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ПАРОВОЙ КОНВЕРСИИ УГЛЕВОДОРОДОВ В СИНТЕЗ-ГАЗ

Дорофеенко С.О., Полианчик Е.В., Цветков М.В.

Институт проблем химической физики РАН

polian@icp.ac.ru

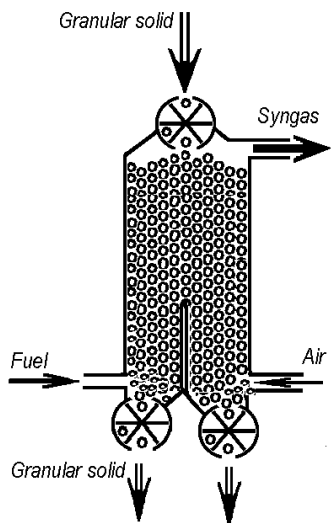
Конверсия углеводородных топлив (прежде всего метана) в синтез-газ – основа многотоннажных химических производств. При этом процессы окислительно-паровой конверсии обещают высокую энергетическую эффективность, поскольку позволяют совместить в одном процессе экзотермическую реакцию парциального окисления метана с эндотермической реакцией паровой конверсии. «Идеальным» можно считать такой процесс, в котором минимально потребление кислорода и суммарное изменение энтальпии будет нулевым. Т.е., для окислительно-паровой конверсии метана:



минимальное достижимое потребление кислорода на моль метана $x^* = 0.426$.

Однако конверсия метана в синтез-газ требует высокой температуры процесса, чтобы обеспечить высокую скорость реакции (т.е. производительность) и высокий выход целевых продуктов – окиси углерода и водорода (при низких температурах химические равновесия будут смещены в сторону образования двуокиси углерода и сажи). Ранее нами было показано, что проведение процесса в реакторе с противотоком твёрдого пористого теплоносителя позволяет в значительной мере совместить малую теплоту реакции с высокой температурой процесса благодаря рекуперации тепла газообразных продуктов [1-2]. При этом, помимо расхода и состава реагентов, расход инертного теплоносителя становится одним из основных управляющих параметров. Процесс в реакторе с отдельной подачей реагентов при их последовательном нагревании за счёт теплообмена с твёрдым теплоносителем с наибольшей эффективностью протекает при расходе теплоносителя таком, что теплоёмкость потока теплоносителя близка к (но меньше) теплоёмкости синтез-газа. Поскольку теплоёмкость каждого из потоков горючего газа и газа-окислителя меньше, чем потока теплоносителя, часть тепла, выделяющегося в реакции, теряется с потоком нагретого теплоносителя.

Возможно дальнейшее повышение эффективности



рекуперации тепла в процессе конверсии в противотоке твёрдого теплоносителя. Рассмотрим конверсию при схеме потоков, представленной на рисунке (не конструкция реактора). Отметим, что при конверсии метана теплоёмкость продуктов реакции выше, чем теплоёмкость исходных реагентов. Т.е., можно выбрать расход теплоносителя так, что теплоёмкость потока окислителя и топливного газа меньше, чем соответствующих потоков теплоносителя, но при этом теплоёмкость суммарного потока теплоносителя меньше, чем теплоёмкость потока синтез-газа

При выполнении этого условия реализуется т.н. промежуточный режим горения – с протяжённой горячей зоной как в верхней, так и нижней половине реактора – и достигается наиболее полная возможная рекуперация тепла: брутто тепловой эффект в зоне реакции (при соответствующей температуре!) равен нулю. Условие достижения термодинамического равновесия в продуктах реакции (синтез-газе) позволяет вычислить в зависимости от соотношения расходов топлива и окислителя состав продуктов и самосогласованное с ним значение температуры горения, а также диапазон расходов теплоносителя, обеспечивающих протекание реакции в промежуточном режиме. Проведённый расчёт показывает, что рассматриваемая схема позволяет провести окислительно-паровую конверсию метана при температуре выше 1400 К уже при значении $x = 0.44$.

Работа выполнена по государственному заданию №АААА-А19-119-022690098-3

[1] Polianczyk E.V., Dorofeenko S.O., 2019, Int. J. Hydrogen Energy, **44**, 4079-89.

[2] Dorofeenko S.O., Polianczyk E.V., 2019, Int. J. Hydrogen Energy, **44**, 30039-52.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПЛОТНОГО ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ ПОСТОЯННОГО ОБЪЕМА

Рogaев К.С.¹, Ищенко А.Н.¹, Буркин В.В.¹, Дьячковский А.С.¹,
Саморокова Н.М.¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный
университет*

@ rogaev@ftf.tsu.ru

В области ствольных систем для повышения дульной скорости метаемого элемента перспективным является применение схемы заряжания с присоединенным зарядом, состоящим из высокоэнергетических высокоплотных быстрогорящих топлив (МВТ) [1, 2]. Нетрадиционная схема выстрела с присоединенным зарядом при одинаковом максимальном давлении может обеспечить природ скорости метаемого элемента, по сравнению с классической схемой выстрела. Для полной реализации возможностей данной нетрадиционной схемы метания, необходима разработка как новых видов ствольных установок, так и новых топлив удовлетворяющим требованиям по энергетике и скорости горения.

Для проверки разработанных топлив необходимо проведение предварительных испытаний в условиях постоянного объема (манометрическая бомба). Горение топлив в условиях манометрической бомбы позволяет определить энергетику топлива (по аналогии с силой пороха), ударную адиабату и послонную скорость горения, а также оценить особенности зажигания. Условия при которых происходит воспламенение заряда могут оказывать влияние на протекающие газодинамические процессы.

В работе исследовалось воспламенение и горение МВТ в условиях манометрической бомбы с различными массами порохового заряда.

Исследуемое МВТ массой 16.5 г помещенное в текстолитовом контейнере диаметром 2.5 см вместе с дополнительным воспламенителем помещалось в камеру манометрической бомбы. При этом масса воспламенителя из пироксилинового пороха варьировалась в пределах от 1 до 10 г.

На рис. 1, а представлено сравнение экспериментальных зависимостей давления от времени при горении МВТ. В начале каждой кривой также видно, что после сгорания пороховой части заряда происходит падение давления, а затем снова рост.

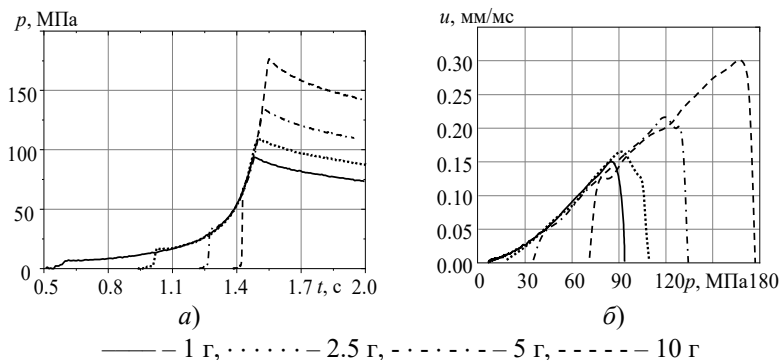


Рис. 1 Зависимость давления (а) и скорости горения (б) от времени

Используя математическую модель [3], была определена скорость горения высокоплотного топлива. Зависимости скорости горения МВТ от давления полученные в этих опытах практически совпадают (рис. 1, б), что говорит о том, что время воспламенения не влияет на дальнейшее горение топлива. Спад послышной скорости горения при дальнейшем увеличении давления связан с дигрессивным догоранием топлива в контейнере. В опытах с одним типом воспламенителя разной массы в цилиндрических контейнерах одного диаметра можно определить характерный импульс воспламенения МВТ. Для этой серии опытов импульс воспламенения составляет примерно 0.65 МПа·с.

В результате проведенных экспериментально теоретических исследований определено влияние различных масса порохового заряда на воспламенение и горение МВТ в условиях манометрической бомбы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10054, <https://rscf.ru/project/21-79-10054/>

[1] Xin L., Yanhuang Z., Yong Y., 2011, J. Appl. Mech. 78(5). 051002

[2] Ермолаев Б.С., Романьков А.В., Сулимов А.А., 2019, Горение и взрыв. **12(4)**, стр.138-144.

[3] Барышев М.С., Бураков В.А., Ищенко А.Н., Саморокова Н.М., Хоменко Ю.П., 2010, Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ. 1007-1013.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ УРОТРОПИНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ФИЛЬТРУЮЩЕГОСЯ ГАЗА С ПОЛУЧЕНИЕМ ГОРЮЧИХ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ

Салганский Е.А. @, Зайченко А.Ю., Подлесный Д.Н., Салганская М.В.,
Цветков М.В., Цветкова Ю.Ю.

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

Низкотемпературный газогенератор для производства калорийных газообразных продуктов может применяться в двигателе высокоскоростных летательных аппаратов с внутритриатмосферным применением [1]. Целью работы является экспериментальное исследование режимов газификации уротропина в низкотемпературном газогенераторе при различных значениях температуры фильтрующегося газа. В качестве фильтрующегося газа теплоносителя использовался азот.

В работе экспериментально исследовалась газификация засыпки твердого сублимирующегося уротропина при фильтрации через него высокотемпературного потока азота. В ходе эксперимента регистрировали температуру выходящих газовых продуктов из засыпки горючего, а также производили отбор проб газообразных продуктов в ампулу-ловушку. Также фиксировали общее время газификации горючего материала для оценки средней массовой скорости газификации.

Показано, что с увеличением начальной температуры фильтрующегося газа время газификации уротропина снижается, увеличивается интенсивность процесса газификации горючего, что приводит к увеличению потока продуктов газификации уротропина. Увеличение температуры входящего азота с 670 до 740 К приводило к увеличению массовой скорости газификации уротропина с 0.29 до 0.38 г/с, а также к увеличению потока продуктов газификации уротропина с 0.39 до 0.51 кг на 1 кг азота. Содержание водорода в газообразных продуктах достигало 7% об. Изменение температуры входящего азота приводит к регулированию расхода продуктов газификации горючего, что позволяет контролировать процесс газификации.

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ №21-79-20008.

[1] Salgansky E.A., Lutsenko N.A., 2021, *Aerosp. Sci. Technol.* **109**. 106420. DOI: 10.1016/j.ast.2020.106420

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТУГОПЛАВКИХ КАРБИДОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ (ДО 5000К)

Савватимский А.И.[@], Онуфриев С.В.,

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия
[@] savvatimskiy.alexander@gmail.com

Исследования энтальпии (H), теплоемкости(Cp), электросопротивления (R), твердой и жидкой фазы карбидов в интервале температур от 2000 до 5000 К, измерение температуры и теплот плавления (ΔH) были выполнены методом нагрева импульсом электрического тока длительностью 5-10 мкс, что соответствует скорости нагрева $\sim 10^8$ - 10^9 К/с. Отметим, что эти скорости нагрева соответствуют скоростям процессов при ударно-волновом нагружении. Это позволяет считать достоверными свойства веществ (полученные при импульсном нагреве током), также и для ударных нагружений, в тех случаях, когда достигаются соответствующие температуры.

Возможное увеличение температуры плавления чистого вещества не подтвердилось в нашем прямом измерении температуры плавления Ta [1], нагреваемом со скоростью 10^8 К/с. Успешный эксперимент был выполнен в [2] при плавлении алмазной пластинки (толщиной 500 мкм) при ее нагреве импульсом лазера длительностью 1 нс, в условиях мегабарных давлений. Температура плавления алмаза (9000 К) соответствовала измеренному давлению. В последней работе скорость нагрева составляла $\sim 10^{11}$ К/с, что (с учетом [1]), предполагает отсутствие перегрева чистых веществ при быстром нагреве.

Новый эффект быстрого нагрева состоит в том, что плавление при этом сопровождается избыточным ростом теплоемкости твердого тела за ≈ 300 К до плавления (наблюдается при импульсном нагреве всех карбидов), - за счет образования дефектов Френкеля, чтобы обеспечить плавление за счет появления неравновесных вакансий. Наряду с ростом избыточной теплоемкости, влияющей на состояние электронной подсистемы, одновременно возникает аномальный рост электронной эмиссии (работы С.В.Лебедева). Предполагаемой причиной может являться снижение энергии Ферми.

В данном обзоре представлены результаты быстрого нагрева карбидов: ZrC+C [3]; ZrC [4]; TaC+HfC [5]; HfC [6] и TaC[7].

Температура измерялась регистрацией излучения поверхности (на длине волны 856 нм) при известном значении нормальной излучательной способности ϵ . В случае ее отсутствия в литературе, использовалась модель черного тела, состоящая из двух тонких пластин карбида, расположенных под углом ($\sim 15^\circ$),- уголковая модель. Эффективность ее $\sim 95\%$. Неопределенность измерения величин: H; Cr; R составила 6; 15; 4 (в %) соответственно. Рассчитывалась температура по формуле Планка, с учетом известных величин ϵ .

Отметим, что расчетные методы не позволяют получить теплофизические свойства указанных соединений в жидком состоянии, тем более их зависимость от температуры.

Нами исследован высокоэнтропийный карбид (HfTaTiNbZr)C, содержащий несколько карбидов, вводимых в равных долях - твердый раствор. При изготовлении этого карбида применялся самораспространяющийся высокотемпературный синтез. Такие карбиды обладают повышенными свойствами по твердости, прочности, и стойкостью при высоких температурах. Нами получены теплофизические свойства высокоэнтропийного карбида (HfTaTiNbZr)C: температуры солидуса и ликвидуса (3900 и 4300 К), теплота плавления и теплоемкость при температурах 2500-5500 К. Мы ожидаем, что импульсный нагрев током может дать новые знания при исследовании высокоэнтропийных соединений.

Работа по карбидам поддержана грантами: РФФИ

№ 19-08-00093 и РФФИ № 19-79-30086

- [1] Onufriev SV, Savvatimskiy AI, Kondratyev AM, *High Temp – High Press*, 43: 217–26 (2014).
- [2] Eggert JH et al., *Nature Physics*, V.6, P. 40-43 (2010).
- [3] Kondratyev A, Muboyajan S, Onufriev S, Savvatimskiy A *J Alloys and Comp* **63**:52 (215).
- [4] Savvatimskiy AI, Onufriev SV and Muboyadzhyan SA *J Mater Res* **32**:1287 (2017).
- [5] Savvatimskiy AI, Onufriev SV, Muboyadzhyan SA *J Europ. Cer. Soc.* **39**:907 (2019).
- [6] Savvatimskiy AI, Onufriev SV, Valyano GE, and Muboyadzhyan SA *J Mater Sci* **55**:13559 (2020).
- [7] Savvatimskiy, Onufriev, Valyano (ОИВТ), Nepapushev, Moskovskikh (МИСИС), *Ceramics International*, Article in Press (2022.)

ОСОБЕННОСТИ И ЗАГАДКИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАСПАДА И ГОРЕНИЯ 1,1-ДИАМИНО-2,2-ДИНИТРОЭТИЛЕНА

Синдицкий В.П.^{1@}, Куштаев А.А.¹, Юдин Н.В.,¹ Левшенков А.И.¹

¹*РХТУ им.Д.И. Менделеева*

@ vps@muctr.ru

Взрывчатое вещество 1,1-диамино-2,2-динитроэтилен (DADNE, FOX-7) обладает энергетическими характеристиками сопоставимыми с RDX, но превосходящее последний по чувствительности.

Особенностью термического распада FOX-7 является его разложение в две стадии, обе из которых протекают до плавления вещества. Загадка термического распада FOX-7 заключается в том, что после прохождения первой стадии продукт разложения по-прежнему является исходным веществом. Причина остановки распада обсуждается исследователями уже более 20 лет.

Зависимость температуры первого пика от размера частиц, изменения его теплового эффекта от скорости нагрева позволяет предполагать, что низкотемпературная стадия разложения FOX-7 имеет топохимическую природу. Однако, это объяснение не получило широкого распространения. Tismanis et al. предположили, что образец FOX-7 состоит из двух фаз - кристаллической и аморфной, и именно менее стойкая аморфная фаза разлагается во время первого пика ДСК. Перед разложением FOX-7 претерпевает несколько модификационных переходов: $\alpha \rightarrow \beta$, $\beta \rightarrow \gamma$ и $\gamma \rightarrow \delta$. Этот факт послужил основой для другого объяснения. Гармашева Н.В. и др. предположили, что δ -форма FOX-7 является наиболее стабильной и разлагается при температуре второго пика, а не успевшая перестроиться γ -форма разлагается при температуре первого пика. Однако Назин Г.М. и др. считают полиморфный переход γ -FOX-7 в более стабильную модификацию неправдоподобным, и предлагают свое объяснение. Они предположили, что первая стадия включает сублимацию и быстрый распад вещества в газовой фазе, а вторая стадия - это распад FOX-7 в твердой фазе. Остановку распада после 1 стадии они связывают с образованием на поверхности кристаллов пленки из продуктов разложения, которая препятствует сублимации, но пропускает газообразные продукты.

Другая загадка была обнаружена в нашей лаборатории при изучении термического разложения FOX-7 в изотермических условиях в закрытых компенсационных манометрах: кривая газовыделения носила насыщающий характер даже при очень малой степени

разложения. Конечный объем газов сильно зависел как от температуры, так и от отношения массы образца к объему сосуда. Такое поведение характерно для обратимой равновесной реакции, что было объяснено крайне необычным равновесным отщеплением азотной кислоты от аци-формы FOX-7.

Кроме этого механизма исследователями было предложено еще ряд различных путей разложения FOX-7. В некоторых из предложенных механизмов присутствует стадия переноса водорода. Одним из классических подходов для изучения механизмов химических реакций с переносом водорода является определения наличия или отсутствия изотопного эффекта. В работе было проведено исследование закономерностей термического распада и горения различных модификаций FOX-7, в том числе дейтерированных.

Исследования в неизотермических условиях (ДСК) показали, что наиболее высокий изотопный эффект наблюдается на первой стадии разложения FOX-7, в тоже время вторая стадия разложения нечувствительна к дейтерозамещению. Подобные результаты были получены в изотермических условиях как в условиях оттока газов (ТГА), так и в закрытых условиях (манометрия). Полученные результаты однозначно указывают, что распад FOX-7 на 1 и 2 стадиях протекает по различным механизмам. Об этом также свидетельствуют различный набор газообразных продуктов разложения на разных стадиях.

Скорость горения α -формы FOX-7 при 10 МПа около 16 мм/с, что сопоставимо со скоростью горения RDX. Прошедший термическую обработку образец FOX-7, по существу γ -форма, у которой отсутствует низкотемпературная стадия разложения, закономерно горит с более медленными скоростями. Чтобы установить механизм горения FOX-7, было исследовано распределение температуры в его волне горения с помощью тонких вольфрам-рениевых термопар. Термопарные данные позволили найти зависимость давления пара от температуры над жидким FOX-7 и согласовать ее с данными по сублимации. Было установлено, что ведущая стадия горения находится в конденсированной фазе, что позволило найти кинетику разложения FOX-7 в расплаве. Скорость разложения FOX-7 в жидкой фазе более чем на порядок выше скорости высокотемпературной стадии разложения в твердой фазе. В работе обсуждается механизм разложения FOX-7 на разных стадиях.

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В СОСТАВАХ ВЭМ

Соколов С.Д.^{1,@}, Дубкова Я.А.¹, Жуков И.А.¹, Ворожцов А.Б.¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет*

@sokolovsd95@gmail.com

Современные составы высокоэнергетические материалов (ВЭМ) в основном базируются на металлических порошках как средство увеличения плотности энергии. Алюминий является самым распространенным и широко исследуемым металлом из-за его доступности, низкой стоимости, относительно низкой токсичности, высокой плотности энергии и энтальпии сгорания. Несмотря на широкое применение алюминия в качестве металлического горючего, существуют недостатки. Одним из недостатков является образование оксидной пленки на поверхности частиц, которая препятствует быстрому протеканию химических реакций и образует агломерированные частицы до воспламенения [1]. Чтобы уменьшить агломерацию, частицы алюминия должны быть оптимизированы для быстрого воспламенения. Существуют различные варианты решения существующей проблемы: применение нанопорошка алюминия; применение металлических и полимерных покрытий; применение других включений; замена чистого порошка алюминия на интерметаллидный сплав. Известно, что замена чистых металлических порошков, таких как (Al, Mg, Zr и др.) на их сплавы (Al-Mg, Al-Zr и др.) существенно влияет на энергетические характеристики в составах ВЭМ. В работе описано получение и характеристики интерметаллических порошков системы Al-Mg, полученных прямым сплавлением, разливкой в кристаллизатор и последующей механической активацией в планетарной мельнице. Определена дисперсность, морфология, химический и фазовый состав полученных порошковых материалов. Получены результаты исследования влияния продолжительности механической активации на энергетические характеристики в составах ВЭМ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № FSWM-2020-0028.

[1] Gany A., Caveny L., 1979, Symp. on Comb. **17**. 1453-1461

МЕХАНИЗМ, КИНЕТИКА, ТЕРМОДИНАМИКА РАЗЛОЖЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ СМЕСЕЙ ФТОРИДА КОБАЛЬТА (III) С КРЕМНИЕМ И БОРОМ

Станкевич А.В.[@], Рудина А.Х., Чемагина И.В., Лобойко Б.Г.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»

[@] AlexVStankevich@mail.ru

Задачи регулирования механизмов протекания химических взаимодействий окислителя и горючего компонента смеси представляют определённый интерес в различных областях материаловедения и технической физике, как в случаях образования конденсированных продуктов реакций – горение металлов, образование интерметаллидов и других более сложных по составу химических соединений в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [1], так и в случае формирования газообразных продуктов, позволяющих создавать, например, импульсные химические лазеры.

В настоящей работе приведены исследования механизмов, кинетики и термодинамики химических реакций взаимодействия компонентов четырёх энергетических материалов, представляющих собой смеси фторида кобальта (III) с бором и кремнием, а также смеси гидрата фторида кобальта (III) с бором и кремнием. Установлены точки смены механизма реакций при термических воздействиях с различной интенсивностью от 0,1 до 2000 с⁻¹. Получены значения энергий активации лимитирующей стадии взаимодействия компонентов. На основе рекомендованных методов обработки данных термического анализа определены параметры термостойкости и термической безопасности смесей, а также рассчитаны энергетические и термодинамические свойства [2, 3].

Кроме того, были проведены прямые измерения состава продуктов реакций взаимодействия компонентов смесей. Изучены механизмы образования фторидов и оксифторидов бора, а также фторидов кремния в газообразных продуктах реакций взаимодействия фторида кобальта (III) с бором и кремнием, чистого кобальта, нитрида бора и оксида бора в конденсированных продуктах. Исследования проводились оригинальными методиками, основанными на измерениях совмещёнными методами термоанализа, масс-спектрометрии и рентгеновской дифрактометрии. Установлены концентрационные пределы взаимодействия компонентов для максимального образования целевых продуктов. Механизмы реакций записаны в виде схем физико-

химических процессов и составлены концентрационно-энергетические диаграммы продуктов реакций.

[1] Мержанов А.Г., Твердопламенное горение. – Черноголовка: ИСМАН, 2000. – 224 с.

[2] Vyazovkin S., Burnham A., Criado J., Pérez-Maqueda L., Popescu C., Sbirrazzuoli N., 2011, *Thermochim. Acta.* 520, 1-19.

[3] Франк-Каменецкий Д.А., Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 407 с.

**МЕХАНИЗМ, КИНЕТИКА И ТЕРМОДИНАМИКА
РАЗЛОЖЕНИЯ ЭНЕРГОЁМККИХ ПРОИЗВОДНЫХ
[1,2,4]ТРИАЗОЛО[4,3-В][1,2,4,5]ТЕТРАЗИНА**

Станкевич А.В.^{1,2,@}, Толщина С.Г.¹, Коротина А.С.¹, Русинов Г.Л.¹,
Чемагина И.В.², Чарушин В.Н.¹

¹ Институт органического синтеза им. И.Я. Пастера УрО РАН

² ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»

В настоящей работе приведены расчётно-экспериментальные исследования механизмов, кинетики и термодинамики разложения трёх энергоёмких соединений: [1,2,4]триазоло[4,3-*b*][1,2,4,5]тетразина (ТТДА) [1], амино-6-гидразино[1,2,4]триазоло[4,3-*b*][1,2,4,5]тетразина (ТТГА) [2] и 3,6-динитрамино[1,2,4]триазоло[4,3-*b*][1,2,4,5]тетразина (ДНТТ) [3]. Установлены точки смены механизма реакций при термических воздействиях с различной интенсивностью от 0,1 до 2000 с⁻¹. Получены значения энергий активации лимитирующих стадий разложения. Показано образование наноструктурированного нитрида углерода (α -C₃N₄) в конденсированных продуктах разложения, а также дициана (C₂N₂) и циановодорода (HCN) в газообразных продуктах. Составлены концентрационно-энергетические диаграммы продуктов реакций. Определены параметры термостойкости и термической безопасности: 349,5 °C и 358,2 °C для ТТДА; 190,3 °C и 198,0 °C для ТТГА; 113,4 °C и 114,1 °C для ДНТТ. Рассчитаны энергетические и термодинамические свойства.

Средняя энергия активации каталитического процесса (E_{cat}) для образца ТТГА составила 21 кДж/моль, для ДНТТ 1500-1700 кДж/моль. Энергия активации процесса ингибирования (E_{ing}) ТТДА составила 800-1400 кДж/моль.

[1] Chavez D.E., Hiskey M.A., 1998, J. Heterocycl. Chem., **35**, 1329–1332.

[2] Liu Y., Zhao G., Tang Y., Zhang J., Hu L., Imler G.H., Parrish D.A., Shreeve J.M., 2019, Journal of Materials Chemistry A, **7(13)**, 7875-84.

[3] Hu L., Yin P., Zhao G., He C., Imler G.H., Parrish D.A., Gao H., and Shreeve J.M., 2018, J. Am. Chem. Soc., **140**, 15001–7.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЫЛЕВОГО ОБЛАКА ИЗ ВОЛЬФРАМА. СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК

Тен К.А.^{1,3,@}, Прууэл Э.Р.¹, Кашкаров А.О.¹, Рубцов И.А.²,
Студенников А.А.², Шехтман Л.И.³, Толочко Б.П.^{3,4}, Гармашев А.Ю.⁵,
Петров Д.В.⁵, Новоселов К.В.⁶

¹*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН*

²*ЦКП "СКИФ", Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН*

³*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН*

⁴*Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН*

⁵*ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт технической физики имени
академика Е.И. Забабахина»*

⁶*Новосибирский государственный университет*

@kten276@gmail.com

Выход сильной ударной волны на свободную поверхность (СП) металлического образца приводит к выбросу облака частиц из передней части СП (так называемое «пыление»). Разрушение СП на микрочастицы происходит из-за наличия мелких неоднородностей, в которых происходит концентрация напряжений, приводящая к отрыву микрочастиц частиц. Интерес к этому явлению связан с влиянием выброса «пыли» на результаты измерений динамики движения СП с использованием теневых, электроконтактных и лазерных методов регистрации движения. Экспериментальное исследование этих процессов сильно затруднены из-за малых размеров микрочастиц (1 – 100 мкм) и больших скоростей их полета (1-5 км/с). Наиболее часто используются лазерные системы PDV и пьезодатчики. Их достоинства – многоканальность и возможность транспортировки. А недостатки – низкая точность и сложность калибровки показаний. Синхротронное излучение дает возможность получения многих радиографических снимков (кино) процесса зарождения и динамики облака микрочастиц.

В докладе приводятся результаты одновременного измерения динамики пылевого облака тремя методиками – лазерной PDV, пьезодатчиками и синхротронного кино. Показано, что интегрально все методики равноценны, но «быстрые» измерения плотности облака видны только при радиографии с помощью СИ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПЛАМЕНИ В БЕДНЫХ СМЕСЯХ ВОДОРОДА С ВОЗДУХОМ

Тереза А.М.¹@, Агафонов Г.Л.¹, Андержанов Э.К.¹, Бетев А.С.¹,
Медведев С.П.¹, Хомик С.В.¹, Черепанова Т.Т.¹

¹*Федеральный исследовательский центр химической физики РАН*
@ tereza@chph.ras.ru

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в последнее время в понимании механизма гомогенного турбулентного горения, ряд фундаментальных аспектов требуют дальнейшего изучения [1, 2]. Особый интерес представляет влияние высокой реакционной способности и быстрой диффузии молекулы водорода на характеристики горения в турбулентных газовых смесях [3]. Моделирование влияния турбулентности на воспламенение и распространение пламени в бедных смесях H_2 -воздух является актуальным с точки зрения предотвращения аварийных ситуаций на АЭС.

Исследование плоского ламинарного пламени является важным предварительным шагом для получения базовых знаний, необходимых для анализа динамики горения в условиях турбулентности. В представленной работе посредством численного моделирования рассмотрено распространение плоского пламени в бедных водородно-воздушных смесях, включая скорость его распространения и внутреннюю структуру с учетом химических превращений. Все расчеты проведены на основе программного модуля CHEMKIN-Pro [4]. Поскольку в аварийных ситуациях на АЭС распространение пламени протекает преимущественно при нормальных условиях, расчеты выполнены при $T_0 = 298$ К и $P_0 = 1$ атм. Химические превращения описываются детальным кинетическим механизмом [5]. Реакции с азотом не учитываются. Модуль CHEMKIN-Pro использует метод конечных элементов для интегрирования дифференциальных уравнений газовой динамики без учета кривизны фронта, характерной для распространения пламени в ультрабедных горючих смесях. Так как по этой причине он не может применяться при концентрациях водорода ниже 12% в воздухе, исследовались пламена в бедных смесях с 12% и 15% H_2 в воздухе.

Численное моделирование показало, что структура пламени имеет три характерные зоны. Первая – низкотемпературная ($T < 550$ К) характеризуется радикал-радикальными и рекомбинационными

реакциями. В этой зоне зарождающиеся атомы Н, О и радикал ОН быстро расходуются через экзотермические реакции на образование H_2O_2 и HO_2 с выделением начального тепла. Вторая зона определяется цепными разветвленными реакциями с быстрым выделением тепла и образованием Н, О и ОН. Третья зона представляет собой выход на квазистационарные значения концентрации воды и температуры. Показано наличие двух групп симбатного образования и убыли концентраций продуктов. Первая – H_2O_2 и HO_2 , вторая – Н, О и ОН. Установлено, что характер профилей продуктов и температуры в зоне пламени не меняется с ростом давления, а максимальный уровень выхода промежуточных продуктов понижается. Уменьшается также размер всех трех зон пламени. Расчеты с добавками промежуточных продуктов в виде примесей показали, что они практически не влияют на скорость распространения пламени.

Рассмотрены возможности применения полученных результатов для анализа экспериментальных данных о взаимодействии пламени с турбулентностью, включая работу [6], где теневым методом SIV визуализировано влияние сферического пламени на скорость турбулентных пульсаций и среднее течение в направлении распространения фронта, приводящее к его ускорению. С другой стороны, на основании анализа чувствительности ведущих каналов низкотемпературной зоны пламени показано, что ускорение диффузии Н, О и HO_2 мелкомасштабными пульсациями может приводить к снижению скорости распространения и гашению пламени.

- [1] Advanced turbulent combustion physics and applications, 2021, Ed. Swaminathan N., et al. Cambridge Univ. Press. UK
- [2] Steinberg A. M., Hamlington P.E., Zhao X., 2021, Prog. Energy Comb. Sci. **85**. 100900
- [3] Sanchez A.L., Williams F.A., 2014, Prog. Energy Comb. Sci. **41**. 1–55
- [4] CHEMKIN-Pro, 2011. #15112, Reaction Design: San Diego
- [5] Власов П.А., Смирнов В.Н., Тереза А.М., 2016, Химич. физика. **35** (6). 35–48
- [6] Medvedev S.P., Khomik S.V., Maximova O.G., et al. 2019. ICDERS. Paper 158

Влияние N искровых инициаторов на кинетику сжигания пропан-кислородной смеси в замкнутом объеме

Тесленко В.С., Дрожжин А.П.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

vteslenko@mail.ru

На основании принципов экологической безопасности в мире происходит активный переход автомобильного транспорта и малых энергетических систем на использование более дешевого природного газа [1]. Однако, к настоящему времени эксплуатация адаптированных к работе на газе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) показала снижение ресурса работы ДВС, по сравнению с работой ДВС на жидком топливе. Это связано с недостаточной изученностью процессов сжигания газов в камерах ДВС.

В данной работе исследованы процессы сжигания пропан-кислородной смеси для одномерного и двухмерного вариантов развития процессов горения в замкнутом объеме, с варьированием числа искровых очагов инициирования. Постановка экспериментов была выполнена по схеме, представленной в работе [2].

На Рис. 1 представлена одна из фото-регистраграмм инициирования и горения стехиометрической пропан-кислородной

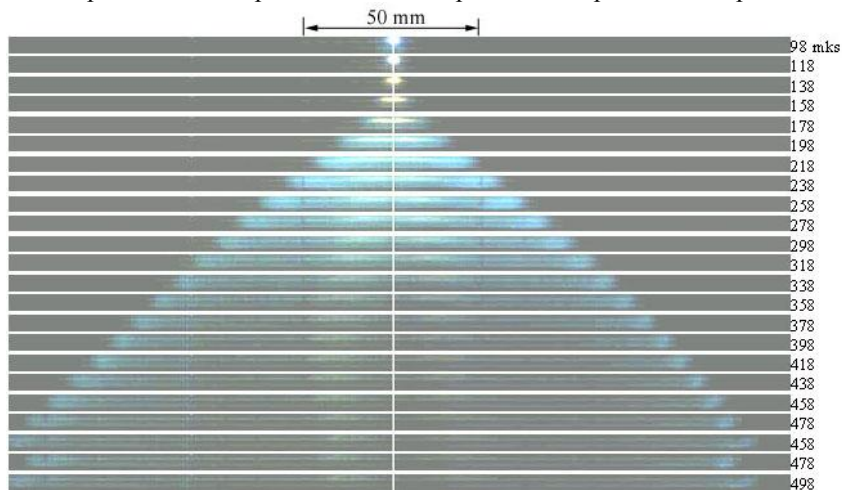


Рис. 1

смеси одним искровым разрядом в полиуритановой трубке длиной $L = 54$ см, с внутренним диаметром 5 мм. Инициирование осуществлялось в средней части трубки ($L/2$). Энергия инициирования 1,2 Дж.

На Рис. 2 представлена фото-регистраграмма инициирования и горения такой же пропан-кислородной смеси, но с двумя искровыми разрядами. Расстояние между искрами 7 мм., $L = 54$ см. Суммарная энергия инициирования двух искр 0,3 Дж.

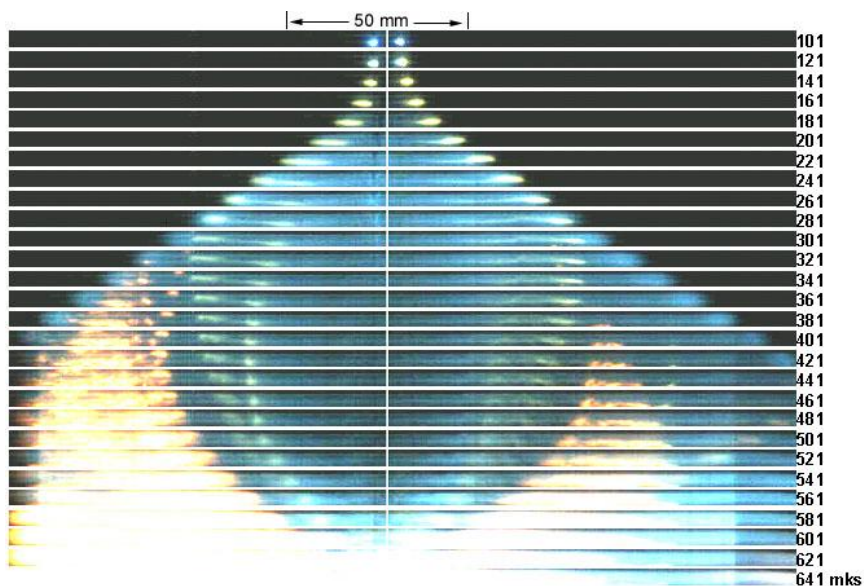


Рис. 2

Из данных экспериментов следует, что в варианте одного искрового разряда горение идет с затуханием скорости, а в варианте двух искровых разрядов горение развивается с ускорением, как в первой стадии, так и во второй стадии (в обратном направлении).

Отметим наиболее важные стадии развития процессов инициирования и горения газа **двумя** искрами в трубке:

1) симметричный газодинамический разлет двух искровых «факелов» обеспечивает инициирование первой стадии горения;

2) разлетающиеся плазменные факелы ведут процесс горения смеси со скоростями 200-240 м/с, с последующим развитием обратного газодинамического потока;

3) при уменьшении длины трубки до $L/2 \sim 10$ см, отраженный газодинамический поток от торцов трубки генерирует горячие «факелы» («горячие точки»), которые ускоренно движутся к исходной области инициирования, а скорость фронтов горения (вторая стадия) увеличивается в несколько раз (до 1800 м/с).

Аналогичные процессы развиваются и в двухмерном варианте, но с более сложной динамикой, поэтому представленный одномерный вариант более нагляден для понимания процессов ускорения сжигания топлива в замкнутом объеме. Например, в варианте постановки экспериментов [2] показано, что время полного сжигания газа в макете цилиндра ДВС с диаметром 72 мм можно уменьшить на 300-350 мкс.

Основной результат. Экспериментально показано, что синхронно-симметричное инициирование горения топлива N искровыми разрядами обеспечивает ускорение сжигания топлива в замкнутом объеме. Полученные результаты являются основой для новых технологических разработок увеличения предельно допустимого числа оборотов ДВС и КПД.

[1] Карпенко А.А. Перспективы перевода судов морского и речного транспорта на альтернативные виды топлива // Transport Business in Russia, №3, 2017, «Транспортное дело России».

[2] Тесленко В.С., Дрожжин А.П.. Многоочаговое инициирование и горение пропана в макете цилиндра ДВС // Теплофизика и аэромеханика, 2021, том 28, № 5, С. 745-751

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТАВОВ ДЛЯ АДДИТИВНОЙ ПЕЧАТИ

Ткачев Д.А.^{1@}, Жуков И.А.¹, Дубкова Я.А.¹, Соколов С.Д.¹, Сачков
В.И.¹

¹НИ Томский государственный университет

d.tkachev11@gmail.com

Метод проекционной стереолитографии является перспективной аддитивной технологией и позволяет в короткие сроки изготавливать изделия сложной геометрии с высокой точностью из широкого спектра материалов. Согласно исследованиям, представленным в работах [1,2], данная технология может быть применена для изготовления изделий на основе высокоэнергетических составов, путем замены стандартных связующих на акрилатные УФ-отверждаемые композиции.

В настоящей работе представлены результаты исследований по получению составов для аддитивной печати на основе алюминиевых мелкодисперсных порошков, перхлората аммония и связующего на основе гександиолдиакрилата, добавки, инициирующей УФ-отверждение и диспергирующей добавки, обеспечивающей высокое содержание порошка в получаемой суспензии, до 84 масс. %. Путем отверждения жидкой суспензии на основе горючего порошкового состава УФ-излучением с длиной волны 395 нм были получены плотные цилиндрические образцы. Изучена скорость, характер горения и время задержки зажигания полученных образцов. Проведены исследования дисперсности и фазового состава конденсированных продуктов горения. С целью сравнения проведены исследования составов на основе аналогичной порошковой композиции со стандартным связующим на основе бутадиенового каучука.

Результаты проведенных исследований подтверждают принципиальную возможность применения УФ-отверждаемых жидких акрилатных составов с целью получения суспензий для аддитивного изготовления изделий на основе высокоэнергетических порошковых материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № FSWM-2020-0028.

[1] McClain M. S., Gunduz I. E., Proceedings of the Combustion Institute. – 2019. – Т. 37. – №. 3. – С. 3135-3142.

[2] Straathof M. H. et al., Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2020. – Т. 45. – №. 1. – С. 36-52.

ВЛИЯНИЕ МЕЖКОМПОНЕНТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА

Зайченко В.М.¹, Лавренов В.А.¹, Фалеева Ю.М.^{1,@}

¹*Объединенный институт высоких температур РАН*

@ faleeva.julia@mail.ru

Запасы традиционного углеводородного топлива ограничены. Лигниноцеллюлозная биомасса, которая включает в себя различные отходы растительного происхождения, рассматривается как перспективный возобновляемый ресурс. По сравнению с ископаемым топливом, биомасса в изобилии производится ежегодно и имеет широкое географическое распространение, а также является СО₂–нейтральным сырьём. С другой стороны, использование лигноцеллюлозных материалов в качестве энергетического ресурса позволяет также утилизировать отходы, которые образуются в целлюлозно-бумажной, лесной и сельскохозяйственной промышленности.

Пиролиз – это нагрев биомассы в отсутствие кислорода, сопровождающийся разрушением высокомолекулярных соединений с целью получения твердых (биоуголь), жидких (биомасло) и газообразных продуктов. Распределение продуктов зависит от видов сырья, температуры и скорости нагрева, времени выдержки др. [1].

Органическая часть биомассы состоит из трёх основных компонентов: лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы [2]. Эти компоненты проявляют различную реакционную способность при воздействии температуры, и их структурные свойства оказывают большое влияние на характеристики пиролиза. Целлюлоза представляет собой линейный полисахарид, обычно состоящий из тысяч мономеров d-глюкозы. Гемицеллюлоза также является полисахаридом, состоящим из различных углеводных мономеров в зависимости от типа биомассы [3]. Лигнин представляет собой сильно разветвлённый полифенольный ароматический полимер, не имеющий упорядоченных повторяющихся звеньев, и наиболее устойчив к разложению [4].

Целью данного исследования являлось изучение влияния межкомпонентного взаимодействия в биомассе на выход и состав продуктов пиролиза, а также на их теплотехнические характеристики. Для этого были проведены эксперименты с исходным материалом, с

каждым компонентом по-отдельности и с модельной смесью компонентов, имитирующей исходный материал.

В качестве исходного материала были выбраны древесные опилки и лузга подсолнечника. Компонентный состав биомассы был определён на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра "Карельский научный центр Российской академии наук". Модельная смесь биомассы готовилась в соответствии с измеренными массовыми долями из коммерчески доступных компонентов (микрористаллическая целлюлоза МКЦ-102, гидролизный лигнин и гемицеллюлоза, полученная из грибов *Trichoderma*).

Были проведены аналитические исследования исходного сырья, компонентов и модельной смеси (определение элементного состава, содержания зольности, летучих веществ, связанного углерода). Термогравиметрический анализ (ТГА) являлся основным методом, используемым для исследования теплового поведения образцов биомассы и компонентов. Медленный пиролиз в неподвижном слое образцов биомассы, компонентов и модельных смесей также проводили на лабораторной установке, вмещающей 5 грамм исследуемого материала. Были определены выход и состав биоугля, биомасла и пиролизного газа. Наблюдалось различное поведение трёх компонентов при пиролизе. Был сделан вывод о возможности прогнозирования распределения продуктов пиролиза в зависимости от состава компонентов с точностью до 7,7 мас. %.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-08-00835А.

[1] Goyal H., Seal D., Saxena R., 2008, *Renewable Sustainable Energy Rev.* **12**. 504-17

[2] Yang H., Yan R., Chen H., Lee D.H., Zheng C., 2007, *Fuel*. **86**. 1781-8

[3] Yu J., Paterson N., Blamey J., Millan M., 2017, *Fuel*. **191**. 140-9

[4] Zhou H., Long Y., Meng A., Li Q., Zhang Y., 2013, *Thermochim Acta*. **566**. 36-43

О ВЛИЯНИИ СРЕДСТВ ОГНЕЗАЩИТЫ НА КЛЮЧЕВЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ОГНЕСТОЙКОСТЬ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Федотов И.О., Сивенков А.Б.

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России
(г. Москва)

e-mail: ilafedotov367@gmail.com, sivenkov01@mail.ru

Для формирования представления влияния различных видов огнезащиты на ключевые характеристики температурного прогрева и обугливания древесины авторами были проведены экспериментальные исследования, которые позволяют сформировать представление о разработке эффективных средств огнезащиты для древесины и конструкций на её основе, а также методах оценки их эффективности [1]. Особое внимание при оценке эффективности огнезащиты уделено ключевым параметрам, определяющим огнестойкость деревянных конструкций. С этой целью разработана экспериментальная установка с радиационными тепловыми нагревателями, позволяющая проводить прогнозную оценку реакции огнезащищенной древесины на воздействие высоких температур в условиях изотермического или динамического режима нагревания. Разработка методов экспресс-анализа оценки эффективности средств огнезащиты важна в аспекте получения массива данных необходимых для прогнозирования особенностей поведения материалов и конструкций при пожаре [2, 3].

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что существует возможность разработки эффективных огнезащитных систем, которые способны не только обеспечивать определенную группу огнезащитной эффективности, но и оказывать влияние на параметры процесса обугливания и интенсивность температурного прогрева древесины. В ходе проведения эксперимента выявлены наиболее эффективные огнезащитные композиции, обладающие такими механизмами огнезащитного действия как интумесценция и коксообразование. Механизм интумесценции предполагает использование огнезащитных вспучивающихся покрытий толщиной до 1 мм, образующих при огневом воздействии на защищаемой поверхности объемный вспученный теплоизолирующий слой (кратность вспучивания от 30 до 100). Механизм коксообразования обусловлен применением пропиточных составов на водной основе, способных к образованию в поверхностной зоне древесины вспененного коксового слоя толщиной до 15 мм. Данные составы

образуют на поверхности древесины тонкую функциональную пленку, а также проникают в структуру древесины на 1-3 мм, что определяет их коксообразующее действие как непосредственно на поверхности, так и взаимодействие с углеводным комплексом древесного композита. Составы, работающие по механизму каталитической дегидратации, проникают в структуру древесины на глубину до 3-5 мм и их действие направлено на участие в процессе углеобразования непосредственно самой древесины. В этом случае, дополнительным огнезащитным эффектом является разбавление газовой фазы инертными газами, образующимися в результате термических превращений антипиренов.

При использовании разработанных огнезащитных систем на отдельных стадиях температурный прогрев может снижаться в 2 и более раза, а также происходит заметное снижение скорости обугливания древесины. Также было обнаружено, что отдельные виды огнезащиты способствуют повышению интенсивности обугливания древесины с незначительным снижением интенсивности прогрева древесного материала. Отмечается сложная взаимосвязь группы эффективности огнезащитных средств с параметрами обугливания и величиной температурного прогрева образцов древесины.

Показана перспективность разработки специальных огнезащитных составов, способных регулировать процесс формирования обугленного слоя древесины с соответствующей структурой и свойствами. Установлена возможность разработки и применения огнезащитных систем, способствующих не только снижению пожарной опасности древесины и материалов на ее основе, но и повышению огнестойкости деревянных конструкций.

[1] ГОСТ Р 53292-2009. Национальный стандарт Российской Федерации. Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе Общие требования. Методы испытаний.

[2] 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.

[3] Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства // М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. – 262 с.

РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ В ГИБРИДНОМ КОМПРЕССИОННОМ ДВИГАТЕЛЕ С ИНИЦИАЦИЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ КОРОННЫМ РАЗРЯДОМ

Филимонова Е.А.[@], Добровольская А.С.

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

[@] helfil@mail.ru

В работе приведены результаты моделирования возникновения и распространения волны горения при активации небольшой порции (зоны) пропано-воздушной смеси высокочастотным коронным разрядом в цилиндре гибридного компрессионного двигателя с гомогенной смесью. Рассматривается случай, когда смесь без разряда в результате сжатия не воспламеняется. Эффективность активации разрядом связана с ускорением начала выделения тепла на стадии холодного пламени и на стадии голубого пламени, и их более быстрому протеканию [1]. В моделировании принимались во внимание многоимпульсный режим подачи энергии и неоднородное распределение образования реагентов из-за стримерной (многоканальной) природы разряда. Разряд приводит к незначительному нагреву активированной зоны ($\Delta T \sim 25-180^\circ$) и образованию химически активных компонентов, в основном атомов О. Атомы О, которые образуют промежуточные долгоживущие компоненты – органические гидропероксиды, способствующие воспламенению, - играют решающую роль в инициировании горения по сравнению с нагревом газа.

Рассмотрены причины возникновения различных сценариев горения: 1) дефлаграционное распространение пламени, 2) переход дефлаграционного горения в последовательное распространение волн самовоспламенения в несгоревшем газе перед фронтом, 3) режим распространения волн самовоспламенения в несгоревшем газе, идущих от стенки в направлении основной волны горения [2]. Наличие у топливной смеси выделения тепла на стадиях голубого и горячего пламени ускоряет развитие самовоспламенения при локальном повышении давления. Важным моментом для организации горения в гибридном двигателе является то, что при инициации разрядом часть смеси поджигается волной горения, а часть – за счет самовоспламенения, контролируемого стадией голубого пламени. При этом основная часть выделения тепла должна приходиться на времена, соответствующие 10 градусам ПК (поворота коленвала) за верхней мертвой точкой (ВМТ). Это позволит снизить скорость роста давления

в компрессионном двигателе по сравнению с тем, как если бы вся смесь в цилиндре самовоспламенилась.

Получены зависимости времени задержки воспламенения активированной разрядом зоны и времени самовоспламенения всего объема камеры сгорания от удельного энерговклада в стримерный канал для фиксированных значений радиуса и доли объема активированной зоны, обработанной высокочастотным коронным разрядом. Показано, что воспламенение активированной разрядом зоны и самовоспламенение происходят в оптимальном диапазоне углов поворота коленвала, если разряд инициируется задолго до ВМТ ($\alpha_{dis}=310,325,338$ градусов ПК) для всех удельных энерговкладов в стримерный канал Q_d , которые рассматриваются в данной задаче, т.е. $Q_d=0.01-0.05$ эВ/молекула. И чем ближе к ВМТ возникает самовоспламенение, тем больше амплитуда колебания давления.

Решая уравнения Навье-Стокса с внешним давлением (имитация движения поршня) в одномерном приближении, можно более точно определить оптимальный диапазон углов ПК для воспламенения активированной зоны и возникновения самовоспламенения. Это объясняется тем, что более быстрое расширение горючей смеси при более позднем времени сгорания вызывает более высокие темпы снижения давления, противодействуя значительному повышению давления из-за самовоспламенения. При постоянном объеме в задаче о горении в компрессионном двигателе нельзя получить адекватные характеристики, такие, как пределы (по углам ПК) оптимального сгорания.

Эта работа была поддержана Министерством науки и образования Российской Федерации (номер Госзадания № 075-01056-22-00)

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

[2] Filimonova E.A., Dobrovolskaya A.S., Bocharov A.N., Bityurin V.A., Naidis G.V. 2020. *Combust. Flame*. **215**. 401-16

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИПОТЕЗЫ ЗЕЛЬДОВИЧА-БАРЕНБЛАТТА

Чернов А.А.^{1,2,@}

¹ *ФГБУН Институт химической кинетики и горения им. В.В.
Воеводского СО РАН*

² *ФГБОУУ Сибирский государственный университет
геосистем и технологий*

@ chernov@kinetics.nsc.ru

Взаимодействие предварительно перемешанного пламени с турбулентным полем скоростей, через которое оно распространяется, является фундаментальным процессом турбулентного горения. Знания о закономерностях этих процессов имеют значительный научный и практический интерес для улучшения качества предсказаний и моделирования турбулентного пламени в камерах сгорания и при распространении крупных пожаров. Скорость предварительно перемешанного турбулентного пламени в каждой точке при малом числе Рейнольдса, по крайней мере, до $Re < 60000$ фактически равна локальной скорости распространения ламинарного пламени в деформированном поле скоростей [1]. Деформация поля скорости приводит к изменению градиентов в пламени, усиливая или уменьшая локальную скорость горения вплоть до погасания. Коэффициент усиления или уменьшения называется длиной Маркштейна и определяется гипотезой Зельдовича-Баренблатта (ЗВН) о термодиффузионной устойчивости квазистационарного пламени на основе аналитического решения уравнений Эйлера и неразрывности с соответствующими граничными условиями [2, 3]. Длина Маркштейна деленная на скорость нормального распространения пламени является характерным масштабом времени в современных моделях турбулентного горения [4, 5].

В докладе представлены результаты сравнения константы Маркштейна, рассчитанной на основе гипотезы Зельдовича-Баренблатта, с результатами экспериментов по зависимости локальной скорости распространения пламени в предварительно перемешанной метано-воздушной смеси от кривизны фронта бунзеновского пламени.

Для измерения локальной скорости горения в каждой точке бунзеновского пламени разработаны и используются оригинальное программное обеспечение и методика анализа векторного поля скоростей, полученного с помощью PIV диагностики (Particle Image Velocimetry) процессов горения [6].

Обнаружено качественной согласие гипотезы Зельдовича-Баренблатта и эксперимента. Основной причиной количественного разногласия являются упрощения и допущения при выводе теории термо-диффузионной устойчивости ламинарного пламени, в частности отсутствует вязкость.

- [1] Parsa Tamadonfar, Omer L. Gulder, *Combustion and Flame* 162 (2015), p.115–128.
- [2] Y.B.Zeldovich, G.I.Barenblatt *Theory of flame propagation Combustion and Flame* Volume 3, 1959, Pages 61-74
- [3] Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. *Математическая теория горения и взрыва.* – М.: Наука, 1980. – 265 с.
- [4] Zimont, V. L. *Exp. Therm. Fluid Sci.* Vol. 21 Issues 1-3 (2000)
- [5] N. Fogla, F. Creta, M. Matalon, *Combust. Flame* 162 (7) (2015)
- [6] Т. А. Большова, О. П. Коробейничев, К. В. Торопецкий, А. Г. Шмаков, А. А. Чернов, 2016, *ФГВ*, т. **52**, №2, с.35-48

ХИМИЯ И МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ

Шмаков А.Г.^{1,2@}, Осипова К.Н.^{1,2}, Князьков Д.А.^{1,2}, Герасимов И.Е.¹,
Дмитриев А.М.^{1,2}, Большова Т.А.¹, Коробейничев О.П.¹

¹*Институт химической кинетики и горения им. В.В.Воеводского СО
РАН, Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

Поиск альтернативных видов топлива из возобновляемого сырья является актуальной задачей в связи с истощением ископаемых ресурсов, а также с необходимостью снижения вредных выбросов в атмосферу. Биодизельные топлива на основе метиловых и этиловых эфиров является одними из наиболее перспективных видов топлива. Для улучшения процессов горения и уменьшения вредных продуктов сгорания в атмосферу в состав нефтяных топлив вводят добавки кислородсодержащих соединений углерода (оксигенаты – спирты, простые эфиры, кетоны и т.д.) При разработке процессов и двигателей на этом виде топлив необходимо знание их кинетических механизмов горения. Одним из наиболее информативных методов изучения химии горения является зондовая молекулярно-лучевая масс-спектрометрия (МПМС), которая в сочетании с численным моделированием позволяет разрабатывать и проверять механизмы горения биодизельных топлив. Цель работы заключается в получении новых экспериментальных и расчетных данных о структуре пламени модельных биодизельных топлив и оксигенатов, среди которых этилацетат (ЭА), этилбуаноат (ЭБ), этилпентаноат (ЭП), метилпропаноат (МП), метилгексаноат (МГ), оксид пропилена (ОП) а также смеси МГ/н-гептан/толуол, ЭП/н-гептан/толуол или ОП/н-гептан/толуол.

Пламена смесей вышеуказанных видов топлива с кислородом и аргоном стабилизировались на плоской горелке при атмосферном и субатмосферном давлениях. Микротермопары и МПМС с мягкой ионизацией электронным ударом и VUV фотоионизацией были использованы для измерения профилей температуры и концентрации реагентов, основных продуктов сгорания и промежуточных частиц, включая ненасыщенные углеводороды, которые известны как потенциальные предшественники сажи. В исследуемых пламенах были идентифицированы более 30 промежуточных соединений, а их профили мольной доли, включая атомы и радикалы, измерены количественно. Экспериментально измеренные профили мольной доли

соединений сопоставлялись с результатами моделирования, полученными с использованием ранее разработанных механизмов. Установлено, что используемые механизмы количественно описывают профили мольной доли основных исходных реагентов и конечных продуктов горения, но для большинства промежуточных соединений согласие между результатами моделирования и измерений в основном носит качественный характер. Анализ первичных реакционных путей для сложных изомерных эфиров (ЭА - МП, ЭБ - МПе, ЭП - МГ) показал, что реакции мономолекулярного разложения этиловых эфиров приводят к образованию этилена и соответствующей жирной кислоты, тогда как для метиловых эфиров ключевые реакции превращения происходят путем их взаимодействия с Н, ОН и О. Установлено, что вклад мономолекулярных реакций разложения этиловых эфиров заметно увеличивается с увеличением коэффициента избытка топлива. Установлены основные пути превращения ОП в пламенах модельных дизельных топлив, что необходимо для понимания детального химического механизма воздействия добавок ОП на процессы образования сажи и полициклических ароматических углеводородов в выхлопных газах двигателей.

**РЕДУЦИРОВАННАЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ СХЕМА
ГАЗОФАЗНОГО ГОРЕНИЯ МЕТИЛМЕТАКРИЛАТА**
Якуш С.Е.^{1,2,@}, Коробейничев О.П.^{1,2}, Шмаков А.Г.², Большова Т.А.²,
Трубачев С.А.²

¹*Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН*
²*Институт химической кинетики и горения им. В.В.Воеводского СО
РАН*

³*Новосибирский государственный университет*
@yakush@ipmnet.ru

Метилметакрилат (ММА) является мономером, входящим в состав широко распространенного полимера ПММА (плексиглас, оргстекло). Исследование горения ПММА представляет интерес как с точки зрения пожарной безопасности, так и в связи с использованием этого полимера в качестве твердого топлива в прямоточных воздушно-реактивных двигателях [1]. Нагрев ПММА вызывает его газификацию с образованием ММА, горение которого протекает в газовой фазе.

В настоящее время предложен детальный механизм горения ММА в воздухе, включающий 88 компонент и 1084 реакции [2], а также несколько сокращенных механизмов [3, 4]. Для целей численного моделирования, однако, требуется разработка укороченных (скелетных) механизмов, позволяющих проводить расчеты с приемлемыми вычислительными затратами.

В данной работе представлен редуцированный (скелетный) механизм горения монометилметакрилата в воздухе, полученный из детального механизма [3], содержащего 263 элементарных реакции для 66 компонент. Предложенный скелетный механизм содержит 29 компонент (включая нейтральный азот), между которыми протекает 44 необратимые реакции.

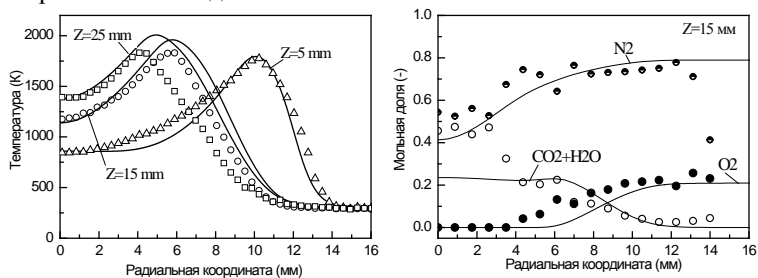
Адекватность созданного скелетного механизма продемонстрирована путем решения нескольких тестовых задач: 1) адиабатическое самовоспламенение смесей ММА-воздух, 2) распространение плоского пламени по предварительно перемешанной смеси, 3) диффузионное горение ММА при вертикальной подаче из круглого источника, имитирующего чашечную горелку.

Расчеты адиабатического самовоспламенения смесей ММА-воздух показали, что предложенный скелетный механизм качественно воспроизводит двухстадийный процесс горения (разложение горючего до углеводородов группы С1-С4, горение легких углеводородов и водорода), переход между которыми отмечен пиком концентрации радикала ОН. При этом время задержки оказалось более

значительным, чем в расчетах по детальному механизму, что связано с исключением многих реакций с участием радикалов на первой стадии процесса.

Сравнение скоростей распространения пламени по предварительно перемешанной смеси в широком диапазоне коэффициентов избытка топлива φ показало, что скелетный механизм дает приемлемую точность расчетов для бедных, стехиометрических, и умеренно богатых смесей (вплоть до $\varphi \approx 1.1$). Горение богатых смесей описывается хуже, максимум скорости сдвинут в сторону больших φ .

Наиболее успешные результаты получены при расчете диффузионных пламен MMA, воспроизводящих эксперименты с чашечной горелкой [3]. На рисунке показаны рассчитанные профили температуры на разной высоте (слева) и мольные доли компонент на высоте 15 мм над источником, точки представлены экспериментальные данные.



Таким образом, результаты расчетов свидетельствуют о применимости предложенного скелетного механизма к расчету горения мономера MMA в воздухе, как в диффузионном режиме, так и для предварительно перемешанных бедных и околостехиометрических смесей. В то же время, в задачах зажигания требуется использование детальных механизмов или дальнейшее совершенствование скелетного механизма в части реакций на стадии начального разложения горючего.

- [1] Harper C.A., 2000, Modern Plastics Handbook, McGraw-Hill
- [2] Shanmugasundaram D., Knyazkov D.A., Dmitriev A.M., Korobeinichev O.P. et al, 2019, Comb. Sci. Techn. **191**. 1789–814
- [3] Shanmugasundaram D., Kumaran S.M., Trubachev S.A., Bespalova A., Korobeinichev O.P., Shmakov A.G., Raghavan V., 2020, Combust. Theory Model. **24**, 1153–78
- [4] Bolshova T.A., Chernov, A.A., Shmakov, A.G., 2021, Combust. Explos. Shock Waves **57**. 159–70

**ПОСТРОЕНИЕ УДАРНЫХ АДИАБАТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ДАННЫХ ПО ИЗОТЕРМИЧЕСКОМУ СЖАТИЮ**

М.А. Бирюкова^{1,2}, Д.В. Петров¹, Ю.М. Ковалев², Е.Б. Смирнов^{1,2}

¹ ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск,
Россия

² Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск,
Россия

bma_vniitf@mail.ru

Процессы, протекающие при действии ударных волн на энергетические материалы, представляют большой, как практический, так и теоретический интерес и являются объектом многочисленных исследований. В таких исследованиях одной из актуальных проблем является проблема ударно-волнового разогрева энергетического материала, которая связана с тем, что кинетика ударно-волнового инициирования детонации конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) существенным образом зависит от температуры, возникающей после прохождения ударной волны. Поэтому разработка математических моделей уравнений состояния для определения ударных адиабат и температур ударно-волнового сжатия в задачах инициирования детонации является особенно актуальной. Для ВВ построить ударную адиабату в широком диапазоне давлений не представляется возможным, так как при ударно-волновом сжатии возможно инициирование детонации. Поэтому предлагаются различные способы восстановления ударных адиабат ВВ на основании экспериментальных данных по изотермическому сжатию [1].

В данной работе был предложен алгоритм построения ударных адиабат ТАТБ и ТЭНа на основании экспериментальных данных по их изотермическому сжатию в рамках уравнения состояния в форме Ми-Грюнайзена. В результате проведенных преобразований для давления во фронте ударной волны было получено следующее выражение:

$$P_s(x) = \frac{aP_T(V) + \int_1^x P_T(x)dx + b(1-x)}{a - (1-x)/2}, \quad (1)$$
$$a = \frac{C_V \rho_0}{\alpha K_{T0}}, \quad b = \alpha K_{T0} T_0, \quad x = V/V_0.$$

Здесь C_V , ρ_0 , α , K_{T0} , T_0 , V_0 , $P_T(x)$, $P_S(x)$ - теплоемкость при постоянном объеме, начальная плотность, коэффициент объемного расширения, изотермический модуль сжатия, начальная температура, начальный удельный объем, экспериментальные значения давления при изотермическом сжатии, давление ударного сжатия соответственно.

Для определения значений ударного сжатия, определенного по формуле (1), воспользуемся экспериментальными данными американских исследователей для ТАТБ и ТЭНа. В результате проведенных расчетов была получена табличная зависимость давления ударного сжатия о степени сжатия.

С целью апробации полуэмпирических уравнений состояния [2,3], хорошо описывающих экспериментальные данные по изотермическому сжатию, был проведен расчет давлений ударного сжатия по формуле (1), где значения давлений изотермического сжатия $P_T(x)$ определялись из уравнения состояния, построенного в работе [3]:

$$P = 3K_{T0} \left(x^{-(n+4/3)} - x^{-(n+1)} \right) \quad (2)$$

Значения K_{T0} и n равны 15,14 ГПа и 3,177 для ТАТБ, и 11,558 ГПа и 2,992 для ТЭНа.

В результате проведенных расчетов было показано, что давления ударного сжатия, полученные из экспериментальных данных и уравнений состояния, совпадают в пределах диапазона погрешности определения степени сжатия. В связи с этим, уравнение состояния (1) может быть применено при определении температур ударного сжатия.

Литература

1. Олинджер Б., Кейди Г. Ударная сжимаемость ТЭНА, ТАТБ, CO₂ и H₂O при давлениях до 10ГПа, рассчитанная на основании экспериментальных данных по гидростатическому сжатию//Детонация и взрывчатые вещества –М.:Мир, 1981. -С.203

2. Ковалев Ю.М. Определение температурной зависимости изобарического коэффициента объемного расширения для некоторых молекулярных кристаллов нитросоединений //ИФЖ - 2018. - Т. 91, № 6. - С. 1653-1663.

3. Ковалев Ю.М. Уравнения состояния для описания изотермического сжатия некоторых молекулярных кристаллов нитросоединений //ИФЖ - 2020. - Т. 93, № 1. - С. 229-239.

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ИЗОМЕРОВ ПЕНТАНОЛА С МОЛЕКУЛЯРНЫМ
КИСЛОРОДОМ ЗА УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ АРАС-МЕТОДОМ**

Быстров Н. С.[®], Емельянов А. В., Еремин А. В., Яценко П. И.

Объединённый Институт Высоких Температур Российской

Академии Наук (ОИВТ РАН), Москва, Россия

[®] bystrovns.jiht@gmail.com

Кислородосодержащие топлива в последние годы значительно укрепили свои позиции в качестве альтернативно-возобновляемого источника энергии. Биоспирты ингибируют образование полиароматических углеводородов (ПАУ) и сажи, а их добавки улучшают качество воспламенения и эффективность сгорания используемых в настоящее время топлив [1]. Тем не менее, особенностью сгорания спиртов является образование вредных для здоровья кислородсодержащих побочных продуктов, таких как альдегиды, оксиды азота NO_x , углерода CO_x и др., что вызывает необходимость проводить детальные кинетические исследования химии сгорания таких спиртовых топлив [3].

В данной работе исследовано окисление *n*- и *i*-пентанола ($n\text{-C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$, $i\text{-C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$) при температурах 1600–4000 К и давлениях 1.5–3 бар. Все эксперименты проводились за ударными волнами на высоковакуумной кинетической ударной трубе в ультраразбавленных в аргоне (Ar) смесях 10 ppm топлива ($n\text{-C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$, $i\text{-C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$) с 10 ppm кислорода (O_2).

Количественные измерения временных профилей концентрации атомов кислорода в основном электронном состоянии $\text{O}(^3\text{P})$, образующегося при окислении изомеров пентанола, впервые были выполнены прецизионным методом атомно-резонансной абсорбционной спектроскопии (АРАС) в вакуумной УФ области спектра на линии атома кислорода 130.5 нм.

Наряду с экспериментальными измерениями был проведен детальный кинетический анализ процессов окисления изомеров пентанола по современным кинетическим схемам горения биотоплив [4-9] с использованием программного пакета OpenSMOKE++ [10].

Полученные в ходе комплексного исследования результаты были успешно использованы для верификации современных кинетических схем горения перспективных биотоплив в исследуемом диапазоне температур и давлений.

Данная работа поддержана совместным РФФИ-DFG Грантом (20-58-12003 / SCHU-1369/2).

[1] Johnson M.V., Goldsborough S.S., Serinyel Z., O'Toole P., Larkin E., O'Malley G, Curran H.J., 2009, *Energy Fuels*. **157**. 2–16

[2] Jacobson M.Z., 2007, *Environ. Sci. Technol.* **41 (11)**. 4150–7

[3] Kasper T., Oßwald P., Struckmeier U., Kohse-Höinghaus K., Taatjes C.A., Wang J., Cool T.A., Law M.E., Morel A., Westmoreland P.R., 2009, *Combust. Flame*. **156**. 1181–201

[4] Sarathy SM, Park S, Weber BW, Wang W, Veloo PS, Davis AC, et al., 2013, *Combust. Flame*. **160 (12)**. 2712–28

[5] Dayma G, Togbé C, Dagaut P., 2011, *Energy Fuels*. **25(11)**. 4986–98

[6] C. Togbé, F. Halter, F. Foucher, C. Mounaim-Rousselle, P. Dagaut, 2011, *Proc. Combust. Inst.* **33**. 367–374

[7] K.A. Heufer, S.M. Sarathy, H.J. Curran, A.C. Davis, C.K. Westbrook, W.J. Pitz, 2012, *Energy Fuels*. **26**. 6678–6685

[8] Bagheri, G., Ranzi, E., Pelucchi, M., Parente, A., Frassoldati, A., Faravelli, T., 2020, *Combust. Flame*. **212**. 142–155

[9] Chuangchuang Cao, Yan Zhang, Xiaoyuan Zhang, Jiabiao Zou, Fei Qia, Yuyang Li, Jiuzhong Yang, 2019, *Fuel*. **257**. 116039

[10] Cuoci A., Frassoldati A., Faravelli T., Ranzi E. *OpenSMOKE++*, 2015, *Comp. Phys. Commun.* **192**. 237–264

**Исследование свойств нанотермитной композиции
 $\text{Vi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me}-3\text{H}$ при различной рецептурной компоновке**

Гордеев В.В. [®], Казутин М.В., Козырев Н.В.

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН

[®] gordeev.vladimir92@yandex.ru

Нанотермитные системы рассматриваются как перспективный материал для создания микроразмерных пиротехнических устройств ввиду их способности горения в тонких слоях (0,1 мм и менее) и микронавесках. Однако, в «чистом» виде применение нанотермитов осложнено из-за их высокой чувствительности к механическим и электростатическим воздействиям. В связи с чем ведётся активный поиск флематизирующих добавок для нанотермитных систем, позволяющих добиться снижения чувствительности без потери критических параметров горения.

В литературе приведены разнообразные данные по влиянию добавок на свойства нанотермитных систем. Использование полимерных (фторполимеры, изопреновый каучук, полианилин) и углеродных материалов позволяет снизить чувствительность нанотермитов, однако, взрывчатые параметры композиций (скорость горения, удельный импульс) как правило снижаются, вплоть до потери способности горения в тонком слое. Введение в нанотермитные системы высокоэнергетических материалов (нитроцеллюлоза, гексоген, перхлорат аммония) способствует значительному увеличению взрывчатых параметров, при этом в некоторых случаях удаётся снизить чувствительности нанотермитной композиции. Однако рост взрывчатых параметров возможен только до определенной концентрации добавки, после чего наблюдается снижение исследуемых параметров. При этом, стоит отметить, что представленные в литературе экспериментальные данные по влиянию добавок на свойства нанотермитных систем неоднозначны, в связи с чем описание природы взрывчатого превращения систем нанотермит/добавка и понимание их механизма горения затруднено, и соответственно является актуальной научной задачей.

Настоящая работа посвящена исследованию свойств композиций на основе нанотермитной пары $\text{Vi}_2\text{O}_3/\text{Al}$ с добавкой 1-метил-3-нитро-1,2,4-триазола (1Me-3H). Добавка 1Me-3H, синтезированный в ИПХЭТ СО РАН низкомолекулярное кристаллическое вещество с энтальпией образования $\Delta H = 1,63$ кДж/г, температурой плавления $T_{\text{пл}} \approx 65$ °С, температурой разложения

$T_{\text{разл}} \approx 240\text{--}250$ °С. Данный материал рассматривается нами как перспективный энергоёмкий флегматизатор нанотермитных композиций. В работе исследовались составы при различных рецептурных компоновках: I – соотношение компонентов тройной смеси $\text{V}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$ соответствовало максимальной расчётной теплоте взрыва композиции (Q) при заданном содержании 1Me-3H; II – соотношение компонентов тройной смеси соответствовало максимальному расчётному значению давления (P), развиваемому при горении композиции в замкнутом объёме; III – соотношение компонентов базовой нанотермитной пары $\text{V}_2\text{O}_3/\text{Al}$ (88/12 %), соответствующее максимальному расчётному значению Q, оставалось постоянным в тройной смеси; IV – соотношение компонентов базовой нанотермитной пары $\text{V}_2\text{O}_3/\text{Al}$ (86/14 % масс.), соответствующее максимальному расчётному значению P, оставалось постоянным в тройной смеси.

Для рецептурных компоновок I, III, IV выявлен экстремальный характер зависимости силы взрыва (F) от содержания 1Me-3H, при этом удаётся увеличить силу взрыва композиции на 22 % для компоновок I и III, а для компоновки IV на 29 %, при этом максимальные значения F наблюдается при содержании добавки 5, 10, 21 % для компоновок I, III и IV соответственно. Для рецептурной компоновки II сила взрыва находится на уровне базовой нанотермитной смеси, но при содержании добавки свыше 7 % наблюдается существенное снижения данного параметра. Скорость горения композиций в трубке с внутренним диаметром 2 мм для компоновок I, II остаётся на уровне базового нанотермита, а для компоновок III и IV характерно увеличение скорости горения на 100-200 м/с. Скорость горения исследуемых нанотермитных композиций в тонком слое (0,1 мм) остаётся на уровне базового нанотермитного состава.

Работа выполнена в рамках проекта по бюджетному финансированию № 0308–2021–0005 при использовании приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

ИМПУЛЬСНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ НАНОТЕМИТОВ

Долгобородов А.Ю.^{1,2,@}, Янковский Б.Д.¹, Кириленко В.Г.²,

Ананьев С.Ю.¹, Гришин Л.И.¹, Бражников М.А.²

¹*Объединенный институт высоких температур РАН*

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

Семёнова РАН

@ aldol@ihed.ras.ru

Одним из перспективных направлений создания новых энергетических материалов является использование наноструктурированных термитных смесей, позволяющих получать составы со скоростями горения более 1000 м/с. Нанотермиты (НТ) уже нашли свое применение в иницирующих устройствах, газогенераторах, микротрастерах и др., однако до сих пор отсутствует единый подход к описанию механизма иницирования и высокоскоростного распространения реакций в таких сильно гетерогенных системах. В данном докладе представлены новые результаты иницирования высокоскоростных процессов в составах на основе смесей Al с оксидами металлов (CuO, MoO₃, V₂O₅ и др.) при трех различных видах импульсного воздействия (лазерном, электроискровом и ударно-волновом).

Для приготовления составов использовались две методики: ультразвуковое перемешивание наноразмерных компонентов в инертной жидкости и механохимическая активация исходных смесей микронных порошков в шаровых мельницах. Структура составов исследовалась методами электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Определены температуры воспламенения в зависимости от состава смесей и дозы активации. Для лазерного иницирования использовался лазерный диод мощностью до 8 Вт с длиной волны 808 нм. При электроискровом иницировании энергия в искре изменялась от 1 до 100 мДж. Ударно-волновое нагружение образцов проводилось зарядом гексогена через инертные прокладки. Для определения параметров процессов использовались методики скоростной видео и фото регистрации, электронно-оптической пирометрии, измерения проводимости.

Проведено сравнение составов по критическим параметрам иницирования, а также получена информация о механизмах распространения быстропротекающих процессов. Определены зависимости периода индукции и скорости горения от энергии иницирования, дозы активации и плотности образцов.

СЖАТИЕ АРГОНА НА ВЗРЫВНОЙ МОДЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

Дудин С.В.[@], Сосиков В.А., Торунов С.И., Кулиш М.И.

Институт химической физики РАН

[@] dudinsv@icp.ac.ru

В работе представлены экспериментальные исследования возможности использования взрывной модельной установки для осесимметричного сжатия аргона (рис.1). Ранее отработанная модельная установка [1-6]. состоит из кольцевого заряда взрывчатого вещества. Для его инициирования используется многоточечная схема, которая имеет свои особенности. Аргон помещается в герметичную кювету, расположенную по оси в центральной части заряда.

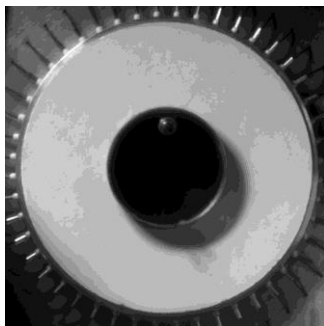


Рисунок 1. Взрывная модельная установка с многоточечным инициированием.

Сжатие аргона производится при осесимметричном движении ударной волны и медной кюветы. В работе показаны особенности такого сжатия, явления, сопровождающие выход ударной волны на поверхность кюветы. Для исследования использовались различные экспериментальные методики: 1) высокоскоростная покадровая съемка с использованием камеры «Наногейт-22/16», 2) съемка в щелевом режиме с использованием камеры СФР, 3) пирометрическая методика, 4) зондовая методика с использованием зондов Ленгмюра. Получены экспериментальные данные по выходу ударной волны на внутреннюю поверхность кюветы, динамика осесимметричного сжатия кюветы и движения ударной волны в аргоне. Представлены результаты по измерению температуры в аргоне и в меди при полном сжатии.

Полученные данные позволяют определить перспективы исследований осесимметричного сжатия различных веществ с использованием модельной взрывной установки с многоточечным инициированием

1. Dudin S.V., Sosikov V.A., Tarunov C.I. Experimental investigation of cylindrical detonation wave Journal of Physics: Conference Series, **774** (2016) 012074, doi:10.1088/1742-6596/774/1/012074 ISSN 1742-6588
2. Sosikov V.A., Torunov S.I., Dudin S.V. 2019 Smoothing the front of the detonation wave in experiments with multipoint initiation *J. Phys.: Conf. Ser.* **1147** 012027
3. С. В. Дудин, В. А. Сосиков, С. И. Торунов, ВЗРЫВНАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЖАТИЯ, Физика горения и взрыва, 2019, т. 55, N- ° 4,
4. Shutov A.V., Sultanov V.G., Dudin S.V. Mathematic simulation of cylindrical detonation wave, Journal of Physics: Conference Series, **774** (2016) 012075, doi:10.1088/1742-6596/774/1/012075 ISSN 1742-6588
5. Dudin S.V., Sosikov V.A., Tarunov C.I. Formation features of cylindrical detonation wave at multipoint initiation, Journal of Physics: Conference Series, **946** (2017).
6. Dudin S.V., Sosikov V.A., Tarunov The output of a shock wave on the inner surface of a cylindrical liner, Journal of Physics: Conference Series, *J. Phys.: Conf. Ser.* **1147** 012025.

**РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЛИЯНИЯ МЕХАНОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО УДАРНОГО СЖАТИЯ
НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ КВАРЦА**

Жуков А.Н., Якушев В.В., Рогачева А.И.

Институт проблем химической физики РАН

azhukov@icp.ac.ru

Воздействие ударных волн на кристаллические вещества приводит к разнообразным изменениям в их состоянии таким как: диспергирование, измельчение, или наоборот консолидация, фазовым превращениям, изменению концентрации дефектов, аморфизации и разложению. Для механохимической обработки характерен примерно такой же список явлений за исключением разве что, консолидации в крупных образования, хотя агрегация очень мелких частиц в несколько более крупные при механохимической обработке также наблюдается. Схожесть перечисленных изменений нередко подчеркивается в работах как по ударно-волновой, так и механохимической обработке веществ. В данной работе результаты механохимического и ударно-волнового воздействия на вещество исследовались совместно, с применением одинаковых методик и единых подходов. Конкретной целью исследования было изучение и сравнение структурных изменений, происходящих в кварце, как при воздействии ударных волн, так и при механохимической обработке.

Для работы использован практически прозрачный кристалл природного кварца (горного хрусталя) из Казахстана. Предварительно кристалл был раздроблен в стальной ступке. Механохимическая обработка проводилась в планетарной шаровой мельнице с использованием стальной оснастки. В результате были получены образцы кварца, обработанные в шаровой мельнице в течение 1, 2, 4, 8, 16, 32 и 64 часов.

Ударно-волновому воздействию были подвергнуты образцы кварца, как прошедшие, так и не прошедшие растирание в шаровой мельнице. Ударно-волновое воздействие осуществлялось методом высокотемпературного ударного сжатия. По этому методу ударно-волновому сжатию подвергают не чистое исследуемое вещество, а его смесь с высокосжимаемым веществом, в качестве которого в работе был использован бромид калия. При сжатии в ударной волне таких составов среда сильно разогревается и передает тепло изучаемому веществу, а при разгрузке, за счет расширения, забирает тепло,

приводя к резкой закалке состояний образовавшихся в ходе ударно-волнового воздействия.

Анализ природы уширения линий проводился методом Ритвелда с использованием программного пакета GSAS [1].

Заметное уменьшение областей когерентного рассеяния (ОКР) происходит при времени механохимической обработки до 16 часов. Дальнейшая обработка приводит лишь к незначительному уменьшению размеров ОКР. Размер ОКР образцов кварца обработанных 32 и 64 часа составил приблизительно 75 нм. Искажения кристаллической решетки в зависимости от времени обработки возрастают практически линейно и при 64 часовой обработке достигают примерно 1 %.

Ударно-волновое сжатие в 14 ГПа приводит лишь к небольшому увеличению ширины пиков. Ритвелдский анализ свидетельствует, что это увеличение вызвано уменьшением размера ОКР до ~300 нм. По рентгенограммам, снятых с образцов полученных при давлении 28 и 22 ГПа, четко прослеживается образование аморфной фазы и асимметричное уширение пиков. Несимметричное уширение линий может говорить о частичном переходе от трехмерной упорядоченности кристаллической решетки к только двумерной. При давлении 33 ГПа и более кварц полностью аморфизуется. Для обработанного в шаровой мельнице кварца видно более значительное, чем для необработанного, уменьшение высоты пиков, при большем увеличении их ширины. Гало имеет большую высоту, что говорит о несколько большей степени аморфизации кварца прошедшего предварительную обработку в шаровой мельнице. Вместе с тем утверждать, что данные различия связаны исключительно с размером частиц кварца нельзя, т.к. обработанные и не обработанные в шаровой мельнице образцы кварца отличаются не только размерами, но и дефектностью кристаллической структуры.

В результате проведенной работы можно заключить, что ударно-волновая обработка по сравнению с механохимической приводит к существенно более заметным искажениям кристаллической структуры кварца вплоть до его полной аморфизации.

Работа выполнена по теме Государственного задания № АААА-А19-119071190040-5.

[1] Larson A. C., Von Dreele R. B. General structure analysis system (GSAS) // Los Alamos National Laboratory Report LAUR 86-748. – 2004.

РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УДАРНО НАГРЕТОГО ВОЗДУХА В ШИРОКОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ

Забелинский И.Е.¹, Быкова Н.Г.¹, Козлов П.В.¹, Герасимов Г.Я.¹,

Левашов В.Ю.^{1@}, Тереза А.М.²

¹*Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова*

²*Институт химической физики РАН*

@levashovvy@imec.msu.ru

Разработка надежных систем теплозащиты вновь создаваемых космических аппаратов приводит к необходимости более точного решения задачи тепломассопереноса у их поверхности с учетом радиационного нагрева [1]. Это стимулирует дальнейшие исследования по измерению потоков излучения в воздухе за фронтом сильной ударной волны в широком диапазоне спектра излучения [2].

В настоящей работе представлены результаты измерения спектрально-временных характеристик излучения ударно нагретого воздуха в спектральной области $\lambda = 115 \div 900$ нм в диапазоне скоростей ударной волны $V_{sw} = 4.2 \div 11.4$ км/с и начальных давлений газа перед фронтом ударной волны $p_0 = 0.25 \div 5.00$ Торр. Экспериментальные данные получены на модернизированной двухдиафрагменной ударной трубе DDST-M с детонационным инициированием сильных ударных волн, подробное описание которой приведено в [3].

Спектры излучения воздуха при $p_0 = 0.25$ Торр в вакуумно-ультрафиолетовой (VUV) и ультрафиолетовой/видимой (UV/VIS) спектральных областях приведены на рис. 1. Видно, что в VUV области интенсивность излучения атомарных линий N и O существенно выше интенсивности молекулярных полос (см. рис. 1a). Так, на длинах волн $\lambda = 180 \div 210$ нм излучение определяется несколькими UV полосами молекул NO, образующихся в ударной волне. На участке спектра $\lambda = 380 \div 395$ нм, который изображен на рис. 1b, излучение относится в основном к суммарному излучению молекул CN в фиолетовой системе полос и молекулярных ионов N_2^+ в первой отрицательной системе полос. Наличие линий углерода может быть объяснено диффузией этого элемента со стенок ударной трубы, а также присутствием в окружающем воздухе CO_2 и углеродсодержащих примесей.

Примеры временных зависимостей интенсивности излучения отдельных спектральных линий приведены на рис. 2. Видно, что интенсивность излучения атомарного азота (рис. 2a) и молекул NO

(рис. 2б) быстро растет при увеличении скорости ударной волны V_{SW} и, соответственно, температуры газа за фронтом ударной волны.

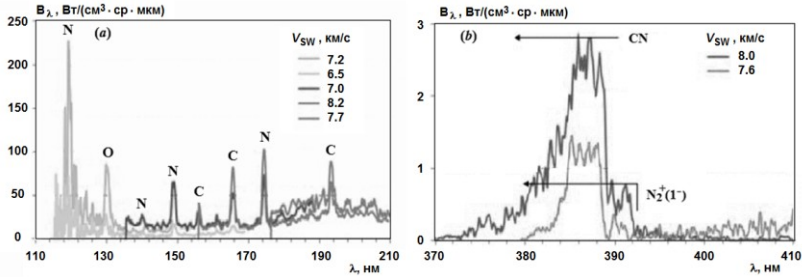


Рис. 1. Спектральная плотность излучения воздуха в VUV (а) и UV/VIS (b) диапазонах при различных скоростях ударной волны.

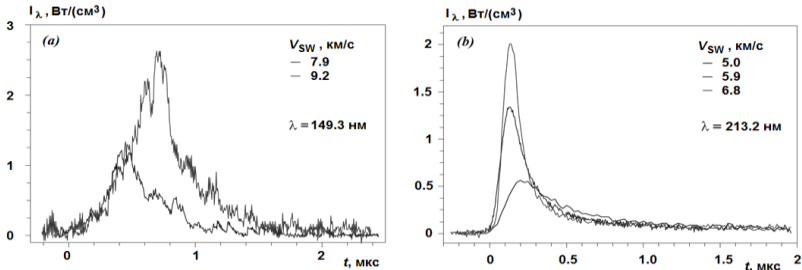


Рис. 2. Временная зависимость интенсивности излучения атома азота при $p_0 = 0.25 \text{ Торр}$ (а) и молекулы NO при $p_0 = 1 \text{ Торр}$ (b) при различных скоростях ударной волны.

Анализ результатов измерения спектрально-временных характеристик излучения ударно нагретого воздуха показывает, что продолжительность излучения отдельных спектральных линий, а также их максимальная интенсивность сильно зависят от скорости ударной волны, начального давления и наблюдаемой длины волны излучения. Важно отметить, что только совместные результаты о временных и спектральных характеристиках излучения могут дать полезную информацию для построения расчетной модели этих процессов. Результаты, полученные в настоящей работе, хорошо согласуются с данными измерений других авторов [4].

[1] Uyanna O, Najafi H., 2020, Acta Astronaut. **176**. 341-56.

[2] Kozlov P.V., Surzhikov S.T., 2017, AIAA Paper 2017-0157.

- [3] Забелинский И.Е. и др., 2022, Хим. физика. **40** (11), 22-28.
- [4] Cruden B.A., Brandis A.V., 2017, AIAA Paper 2017-4535.

Экспериментальное исследование распространения ударной волны в материале подобном водной эмульсии

Ростилов Т.А., Зиборов В.С.

*Объединённый институт высоких температур РАН
Москва, Российская Федерация
ziborov.vs@yandex.ru*

Интерес к свойствам эмульсий при ударном сжатии связан не в последнюю очередь с наличием теплового эффекта при схлопывании пор. В результате образуются так называемые «горячие точки», которые могут играть ведущую роль в запуске тех или иных физико-химических процессов в веществе, что имеет прикладное значение. Из имеющихся литературных данных на текущий момент невозможно сделать надёжный расчёт количества (удельной концентрации) «горячих точек» и оценить тепловой эффект.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию свойств вещества, моделирующего водную эмульсию, при ударе плоского ударника. Эксперименты выполнены на метательной установке СТРЕЛА-2М. Методом лазерной интерферометрии VISAR получены профили скорости свободной поверхности образцов вещества, каркас которого состоит из полых стеклянных микросфер, и воды, заполняющей пространство между ними в момент выхода на неё ударной волны.

В результате измерений получена ударная адиабата вещества в диапазоне давлений сжатия от 0.15 до 0.41 МПа. Установлено, что в координатах «удельный объём – давление» адиабата имеет аномальный вид, что подтверждает наличие теплового эффекта при схлопывании пор. Найдено свидетельство расщепления ударной волны с выделением волны - предвестника малой амплитуды. Дальнейшее исследование этого эффекта даст информацию о характере воздействия волны предвестника на каркас из микросфер и особенностях формирования волн ударного сжатия в средах с микросферами.

О КОРРЕЛЯЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ДЕТОНАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ЭМУЛЬСИОННОГО ВВ НА ОСНОВЕ НИТРАТА АММОНИЯ И ТРИНИТРОТОЛУОЛА

Зубарева А.Н.^{1,@}, Кудряшов А.В.², Лавров В.В.^{1,3}, Уткин А.В.¹

¹*Институт проблем химической физики РАН г. Черноголовка*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

³*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН г. Москва*

@ zan@icp.ac.ru

Чувствительность и детонационная способность являются основными свойствами, характеризующими взрывоопасность веществ при обращении. Считается, что более чувствительные гетерогенные ВВ обладают лучшей детонационной способностью и наоборот. При анализе данных, приведенных в литературе, не было обнаружено примеров, противоречащих общепринятому мнению.

Оценка чувствительности и детонационной способности проводилась на тротиле и эмульсионном взрывчатом веществе (ЭВВ), являющихся типичными представителями различных групп ВВ.

Исследовалось два состава ЭВВ с массовым содержанием полых стеклянных микросфер 1 и 3%. Инициирование осуществлялось узлами, генерирующими ударные волны с плоским фронтом и прямоугольным профилем. О результатах инициирования судили по изменениям профиля массовой скорости на границе раздела ВВ/преграда, регистрируемого с использованием лазерного интерферометра, и скорости фронта процесса на различном удалении от плоскости инициирования. Измерения скорости фронта в переходной области для обоих составов проводились на зарядах с диаметром, превышающим критический диаметр детонации. Он был определен в работе [1], увеличение количества микросфер с 1 до 3% приводило к четырехкратному его снижению.

В результате проведенных исследований было установлено, что детонация в ЭВВ с 3% микросфер возбуждается иницирующей ударной волной со скоростью не более 1.87 км/с, в то время как для ЭВВ с 1% микросфер при скорости волны 2.24 км/с наблюдался отказ. Полученные данные позволяют сделать вывод о возможности прямой корреляции между детонационной способностью ВВ и его чувствительностью.

Для проведения исследований на штатном мономолекулярном ВВ использовался тротил в гранулированном виде (Гранулотол) с

размером частиц не менее 2 мм в двух состояниях: сухом и водонаполненном. С этой целью изготавливались два одинаковых заряда сухого Гранулотола с плотностью 0.945 г/см^3 , один из которых впоследствии полностью заливался водой. Плотность водонаполненного тротила составляла 1.30 г/см^3 . Инициирование осуществлялось узлами, генерирующими ударные волны разной мощности с искривленным фронтом и треугольным профилем. В качестве основного показателя результата инициирования применялся критерий "взрыв-отказ", широко использующийся в стандартных методах оценки детонационной способности и чувствительности.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что детонационная способность сухого Гранулотола значительно хуже, чем у водонаполненного, критический диаметр детонации которого в пластиковой оболочке составлял не более 36.7 мм. Нормальная детонация сухого Гранулотола со скоростью 4.46 км/с, которая для тротила при плотности около 1 г/см^3 близка к критической, наблюдалась в заряде с диаметром 66.6 мм. Оценка чувствительности для обоих составов проводилась на зарядах с диаметром, превышающим критический диаметр детонации. Было установлено, что в сухом Гранулотоле детонационный процесс возбуждается от слабого иницирующего узла из Аммонита 6ЖВ, а при иницировании водонаполненного Гранулотола тем же узлом наблюдался отказ.

Результаты проведенного исследования позволяют сделать вывод, что взаимосвязь между чувствительностью и детонационной способностью гетерогенных взрывчатых веществ не обязательно является прямой. ВВ с худшей детонационной способностью могут быть как менее, так и более чувствительными.

Полученные результаты являются крайне важными с практической точки зрения. Адекватная оценка взрывоопасности не может основываться только на оценке детонационной способности вещества без реальной оценки его чувствительности, как это делается для большой группы опасных продуктов. Этот вывод подтверждается, в том числе, регулярными катастрофическими авариями при обращении с составами на основе аммиачной селитры по всему миру.

[1] Лавров В.В., Зубарева А.Н., Комиссаров П.В., 2019, Хим. Физика. **38(8)**. 31-39.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ СО СПЛОШНОЙ И ОБЪЁМНО-ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

А.И. Клёнов, М.А. Шестириков, Д.Т. Юсупов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИГФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск,
Россия, Klenov174@gmail.com

В настоящей работе приведены результаты исследований динамических свойств образцов нержавеющей стали, полученной с помощью аддитивной технологии – методом 3D-печати. Исследовались образцы, как со сплошной однородной, так и с объёмно-периодической структурой. Эксперименты по нагружению проведены на установке метода составных стержней Гопкинсона (ССГ). Метод ССГ позволяет проводить испытания широкого круга материалов, исследовать динамические диаграммы сжатия и растяжения в диапазоне скоростей деформации $\dot{\epsilon} = 10^2 - 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Цель работы: исследование динамических свойств образцов, изготовленных по методу аддитивных технологий.

Задача: получение и анализ экспериментальных результатов, полученных в результате проведения серии экспериментов на установке ССГ с образцами 3-D нержавеющей стали, имеющими сплошную и объёмно-периодическую структуру.

Образцы из нержавеющей стали (аналог 12X18H10T), как сплошные, так и объёмно-периодические были изготовлены методом лазерного спекания металлического порошка (Selective Laser Sintering) на промышленном 3-D принтере.

В ходе исследований проведено более 50 экспериментов с образцами из нержавеющей стали. В работе получены диаграммы напряжение-деформация и скорость деформации-деформация в диапазоне скоростей ударника от 7 до 14 м/с, при этом собственные скорости деформации образцов составили от $0,75 \times 10^3$ до $2,8 \times 10^3$ 1/с. Проведен сравнительный анализ результатов исследования образцов, изготовленных с помощью аддитивных технологий, с данными стали, изготовленной традиционным способом, представлены направления дальнейших исследований.

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО – ВРЕМЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ МАРКИ 12Х18Н10Т И МЕДИ МАРКИ М1

Ковалев А.Е.^{1,2,@}, Гармашев А.Ю.^{1,2}, Смирнов Е.Б.^{1,2}, Ковалев Ю.М.²,
Панкратов Д.Г.¹, Попцов А.Г.¹, Ольховский А.В.¹

¹ *Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский
Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно -
исследовательский институт технической физики имени академика
Е.И. Забабахина» 456770 Снежинск*

² *Южно – Уральский Государственный Университет (НИУ), 454080
@ kae-snz@mail.ru*

При оптимизации экспериментов по изучению материалов при воздействии ударной волны ставятся задачи высокой информативности и точности полученных данных. Для достижения этих задач используются многоканальные, непрерывные методы регистрации параметров и последующий анализ для получения параметров течения под действием ударной волны. Ранее для увеличения информации полученной в одном эксперименте применялась методика, в которой записи параметров течения регистрировались с поверхности клиновидного образца, такая методика получила название оптического рычага [1]. Данные эксперименты проходили при помощи скоростного фотохронографа, что позволяло регистрировать профиль $x(t)$ свободной поверхности на фотографическую пленку. Идея получения ударно – волновых свойств материала на нескольких толщинах хорошо зарекомендовала себя в получении данных.

Этот принцип постановки эксперимента применен в данной работе с использованием лазерно-гетеродинной методики [1] на ступенчатых образцах стали марки 12Х18Н10Т и меди марки М1. Это позволило улучшить разрешение по времени записи и профиля скорости свободной поверхности по сравнению с данными оптического рычага. По результатам этих опытов получены прочностные характеристики материалов и параметры ударной волны и волны разрежения.

[1] Экспериментальные методы в физике ударных волн и детонация: Монография/ под общ. ред. док. физ.-мат. Наук М.В.Жерноклетова. - Саров: ФГУП РФЯЦ - ВНИИЭФ, 2020. – 519 с.

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕН ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПРОПАН-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ НА УДАРНОЙ ТРУБЕ

Козлов П.В.¹, Тереза А.М.², Герасимов Г.Я.¹, Левашов В.Ю.^{1@},
Забелинский И.Е.¹, Быкова Н.Г.¹

¹ *Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова*

² *Институт химической физики РАН*

@ levashovvy@imec.msu.ru

Несмотря на значительный прогресс в изучении горения пропан-воздушных смесей, экспериментальные исследования характеристик воспламенения этих смесей продолжают в настоящее время [1]. Однако имеющиеся данные по временам задержки воспламенения ограничены и относятся в основном к сильно разбавленным горючим смесям [2]. Данные по высокотемпературному воспламенению пропан-воздушных смесей при различных коэффициентах избытка топлива не охватывают диапазон давлений выше 20 атм [3]. С другой стороны, существующие кинетические модели горения пропана не позволяют с достаточной степенью точности описать все наблюдаемые особенности процесса воспламенения [4].

В настоящей работе времена задержки воспламенения τ_{ign} измерялись в пропан-воздушных смесях за отраженной ударной волной в интервале температур $T = 1050 \div 1780$ К и давлений $p = 20 \div 40$ атм при коэффициентах избытка топлива $\varphi = 0.5, 1.0$ и 2.0 . Эксперименты проводились на ударной трубе, входящей в состав экспериментального комплекса «Ударная труба» НИИ механики МГУ [2]. Момент прихода ударной волны к торцевой стенке трубы фиксировался по сигналу с датчика давления, а момент начала воспламенения - по излучению электронно-возбужденных радикалов OH^* и CH^* на длинах волн $\lambda = 308$ нм и 430 нм с двух световодов, расположенных в торце ударной трубы.

Результаты измерения τ_{ign} в зависимости от температуры смеси и коэффициента избытка топлива и их сравнение с имеющимися данными других авторов приведены на рис. 1, где показаны также расчетные кривые, полученные с помощью недавно разработанного кинетического механизма ChPhMech 2.0 [5]. Видно, что измеренные значения τ_{ign} хорошо согласуются с результатами других измерений и расчетными кривыми. Кинетический механизм ChPhMech 2.0 позволяет также достаточно хорошо описать измеренные в

экспериментах профили излучения радикалов OH^* , образование которых в горючей смеси свидетельствует о начале ее воспламенения.

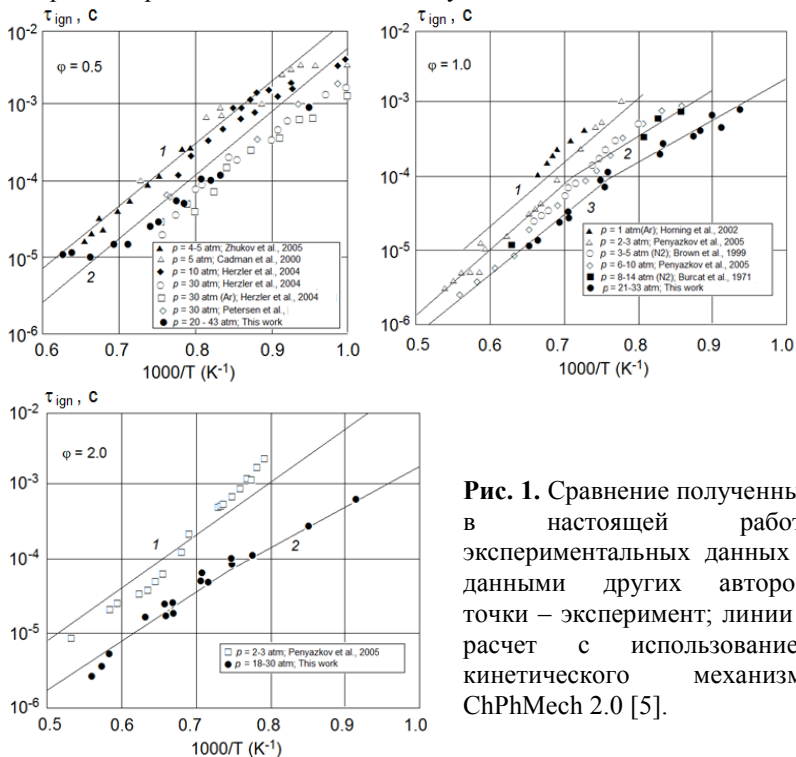


Рис. 1. Сравнение полученных в настоящей работе экспериментальных данных с данными других авторов: точки – эксперимент; линии – расчет с использованием кинетического механизма ChPhMech 2.0 [5].

Полученная в настоящей работе информация существенно расширяет базу имеющихся экспериментальных данных. Особенно это касается богатых смесей ($\phi = 2.0$), для которых отсутствуют экспериментальные данные по временам задержки воспламенения в исследованном диапазоне температур и давлений.

[1] Burnett M.A., et al., 2021, *Combust. Flame*. **224**. 24-32.
 [2] Козлов П.В. и др., 2021, *Хим. физика*. **40**(9). 35-40.
 [3] Penyazkov O.G., et al., 2005, *Proc. Combust. Inst.* **30**. 1941-1947.
 [4] Lei X., et al, 2022, *Combust. Flame*. **237**. 111881.
 [5] Tereza A.M., Medvedev S.P., Smirnov V.N., 2021, *Acta*

Astronaut. **181.** 612-19.

О ДИНАМИКЕ, СТРУКТУРЕ И ФОРМЕ ФРОНТА РЕАКЦИИ ПРИ УСКОРЕНИИ ПЛАМЕНИ

Кривошеев П.Н.[@], Новицкий А.О., Пенязьков О.Г.

Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН

Беларуси, Минск, Беларусь

[@] krivosheyev.pavlik@gmail.com

Проведена высокоскоростная визуализация процесса воспламенения, горения, ускорения пламени и перехода горения в детонацию в гладкой, прозрачной трубе при инициировании горения слабым источником. Исследована динамика изменения формы фронта пламени по мере его распространения вдоль оси трубы (рис. 1).

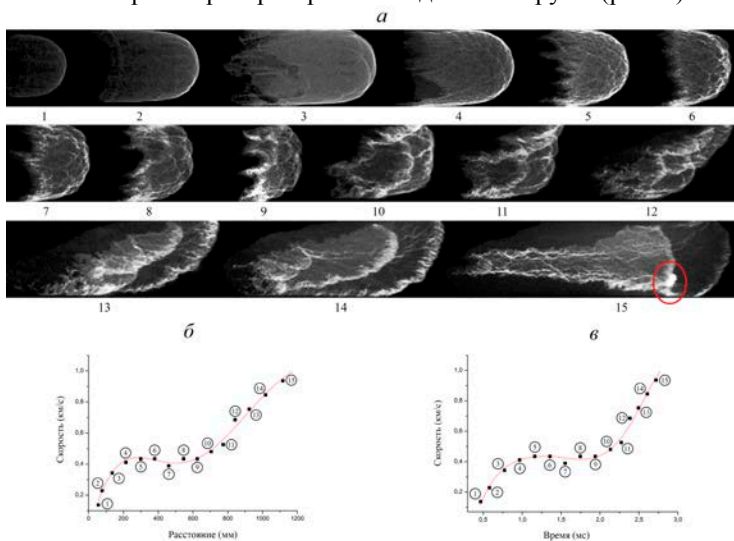


Рисунок 1. Мгновенные фотографии пламени в смеси ацетилен/кислород/аргон при начальном давлении 20.8 кПа (а). Поперечный размер каждого кадра (внутренний диаметр трубы) 60 мм. Профили скорости (интерполяция по результатам обработки и усреднения массива изображений) в зависимости от расстояния (б) и времени (в). Цифрами на графиках указаны положения во времени соответствующих мгновенных изображений фронта пламени. На кадре 15 указано возникновение локального взрыва, приводящего к формированию детонационной волны.

Выделены и описаны четыре характерных фазы процесса распространения: на первой стадии пламя ускоряется, затем следует стадия его замедления, период распространения пламени с почти постоянной скоростью и стадия повторного ускорения, в ходе

которого и формируется детонация [1]. Все эти стадии были рассмотрены в недавних экспериментальных [1] и теоретических [2, 3] работах. Заключительная стадия ускорения фронта пламени и различные режимы возникновения детонации были детально исследованы авторами в своей работе [4], обзор и классификация сценариев развития финальной стадии ускорения пламени в каналах и трубах, включая переход в детонацию на фронте пламени и формирование условий очагового воспламенения перед фронтом можно найти, например в [5].

Приводятся визуализации характерной для каждой стадии формы пламени, определены зависимости скорости фронта пламени вдоль оси трубы. Показано как меняется динамика процесса при изменении начального давления смеси.

Определена нормальная (ламинарная) скорость горения стехиометрической смеси ацетилена с кислородом с 25-ю %-ным разбавлением азотом либо аргоном при пониженном (8-21 кПа) начальном давлении.

Выполнено сравнение полученных экспериментальных результатов с доступными в литературе теоретическими моделями. Показано, что на начальной стадии ускоренного распространения вытянутого вдоль стенок канала пламени (в англ. литературе *finger flame*), до момента замедления, скорость ведущей точки (расположенной в вершине вытянутого фронта) очень хорошо описывается экспоненциальной зависимостью, сформулированной в работе [6] с учетом поправки, предложенной авторами [7].

[1] П.Н Кривошеев, А.О. Новицкий, О.Г. Пенязков., 2022, Хим. физика. (в печати)

[2] Киверин А.Д., Тюрнин А.В., Яковенко И.С., 2021, Хим. физика. 40. 12-18

[3] Ivanov, M.F.; Kiverin, A.D.; Yakovenko, I.S.; Liberman, M.A., 2013, *Int. J. Hydrog. Energy*. 38(36). 16427–16440

[4] P. Krivosheyev, O. Penyazkov, A. Sakalou, 2020, *Combust. Flame*. 216. 146-160

[5] Киверин А.Д., Смыгалина А.Е., Яковенко И.С., 2020, Хим. Физика. 39(8). 9

[6] C. Clanet, G. Searby, 1996, *Combust. Flame*. 105. 225–238

[7] M.A. Liberman, M.F. Ivanov, A.D. Kiverin, M.S. Kuznetsov, A .A. Chukalovsky, T.V. Rakhimova, 2010, *Acta Astronaut.* 67. 688–701

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИИ В СМЕСИ НИТРОМЕТАН/МИКРОСФЕРЫ

Мочалова В.М.^{1,®}, Уткин А.В.¹, Шакула М.Ю.^{1,2}, Лавров В.В.¹
¹*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия*
²*МФТИ, Долгопрудный, Россия*
[®] roxete20000@mail.ru

Жидкое взрывчатое вещество (ВВ) нитрометан (НМ) представляет большой интерес для исследования детонационных процессов. Его свойства хорошо изучены и представлены, например, в работах авторов [1–3]. Проведенные в предыдущие годы исследования показали, что при добавлении к НМ аминов [3–5] или небольшого количества микросфер [6–8] значительно уменьшаются его критический диаметр и давление инициирования, а также изменяется структура зоны химической реакции в детонационной волне. Это является следствием увеличения начальной скорости химической реакции НМ.

При разбавлении НМ аминами полученная смесь остается гомогенной. Однако, при добавлении стеклянных микросфер взрывчатое вещество становится гетерогенным. Кинетика таких ВВ в основном определяется горячими точками, которые возникают при схлопывании микросфер [7,8]. В очагах скорость химической реакции увеличивается, и разложение ВВ становится неоднородным по объему. Смеси НМ с калиброванными стеклянными микросферами идеально подходят для исследований, анализа и численного моделирования, поскольку при сжатии получаются горячие точки одинакового размера и температуры.

В данной работе приведены результаты исследования влияния концентрации микросфер на структуру детонационных волн и критические параметры НМ с плотностью $1,12 \text{ г/см}^3$. В предыдущей работе авторов [9] было показано, что для обеспечения длительной стабильности смеси с микросферами необходимо повысить вязкость НМ. Для этого к нему было добавлено 3 вес.% ПММА. Средний диаметр полых стеклянных микросфер, использовавшихся в экспериментах, составлял 70 мкм, плотность $0,14 \text{ г/см}^3$. Для регистрации профилей массовой скорости и измерения скорости детонации в смеси гелеобразного НМ с микросферами использовался лазерный интерферометр VISAR. В [9] был определен критический диаметр гелеобразного нитрометана в стеклянной оболочке, он составляет 16,5 мм. Проведенные исследования показали, что при

добавлении 2 вес.% микросфер наблюдается резкое уменьшение критического диаметра до 6 мм. Затем регистрируется его плавное снижение до 3,5 мм при 8 вес.% микросфер с последующим медленным увеличением до 5 мм при 18 вес.% микросфер. Дальнейшее повышение концентрации микросфер до 30 вес.% вызывает резкое увеличение критического диаметра до 16 мм. Наряду с критическим диаметром были определены значения скорости детонации, массовой скорости и давления в точке Чепмена-Жуге. Показано, что увеличение количества микросфер в смеси приводит к уменьшению детонационных параметров: скорость детонации при этом падает с 6,3 км/с до 2,5 км/с при изменении концентрации микросфер от 0 до 30 вес.%.

Следует отметить, что структура детонационных волн в НМ при добавлении микросфер качественно остается неизменной – в зоне реакции формируется отчетливо выраженный химпик, тогда как при малых концентрациях амина в НМ регистрируется резкое снижение амплитуды химпика вплоть до его полного исчезновения [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №20-03-00245а) и по теме Государственного задания № АААА-А19–119071190040–5 .

- [1] Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. (1970). Детонационные волны в конденсированных средах. Наука.
- [2] Воскобойников И. М., Богомолов В. М., Апин А. Я. (1968). Физика горения и взрыва. **4**. 45-49.
- [3] Мочалова В. М., Уткин А. В., Лапин С. М. (2016). Физика горения и взрыва. **52**. 82-88.
- [4] Gruzdkov Y. A., Gupta Y. M. (1998). J. Phys. Chem. A. 102. 2322-2331.
- [5] Engelke R., Sheffield S. A., Stacy H. L., Quintana J. P. (2005). Phys. Fluids. **17**. 096102.
- [6] Prestes H. N., Vidal P., Gois J. C., Khasainov B. A., Ermolaev B. S. (1995). Shock Waves. **4**. 325-329.
- [7] Lee J. J., Frost D. L., Lee J. H. S., Dremine A. (1995). Shock Waves. **5**. 115-119.
- [8] Engelke R. (1979). Phys. Fluids. **22**. 1623-1630.
- [9] Mochalova V., Utkin A., Shakula M., Lavrov V., Savchenko A., Yakushev V. (2021). Phys. Fluids. **33**. 046108.

О НЕКОТОРЫХ АВТОМОДЕЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ФОРМИРОВАНИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ФРОНТОВ И РАЗРУШЕНИЯ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Наймак О.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН

naimark@icmm.ru

Автомодельные закономерности формирования упруго-пластических волновых фронтов и разрушения при ударно-волновом нагружении связываются с механизмами структурной релаксации, обусловленными коллективными эффектами в ансамблях дефектов (микросдвигов, микротрещин) в условиях специального типа критических явлений — структурно-скейлинговые переходы. Установлена связь механизмов разделения волнового фронта на упругий предвестник и пластический фронт с термодинамикой метастабильного состояния твердого тела с дефектами и формированием областей ориентационного упорядочения дефектов, обнаруживающих коллективную динамику. Установлен вид неравновесного термодинамического потенциала твердых тел с дефектами в зависимости от «параметра порядка» - деформации, индуцированной дефектами, и получены определяющие соотношения, описывающие связь релаксационных механизмов и локализацию поврежденности. Показано, что универсальность пластических волновых фронтов имеет автомодельную природу и обусловлена «подчинением» кинетики релаксации коллективным модам дефектов автосолитонной природы, формирующимся в области перехода от упругого предвестника (предела Гюгонио) к пластическому фронту. При этом амплитуда упругого предвестника определяется кинетикой перехода в области метастабильности в зависимости от динамики роста напряжений, максимальная амплитуда упругого предвестника - шириной области метастабильности по напряжениям [1-3]. Установлено, что закономерности формирования пластических волновых фронтов аналогичны кинетике инициирования областей локализованного (адиабатического) сдвига на спектре масштабов коллективных мод дефектов; механизмам деформирования локализованным сдвигом и разрушения соответствует инициирование двух разных типов коллективных мод дефектов: автосолитонных мод и диссипативных структур обострения [1]. Показано, что формирование автомодельных пластических волновых фронтов,

множественного откола, волн разрушения может быть связано с качественными изменениями типов метастабильности материалов с дефектами, следствием которых является «резонансное» возбуждение установленных коллективных мод дефектов и «подчинение» поведения системы динамике коллективных мод дефектов. Обсуждаются асимптотические зависимости вязкости, обусловленные нелинейной кинетикой дефектов и влиянием на релаксационные свойства. Результаты моделирования перечисленных эффектов подтверждены оригинальными широкодиапазонными экспериментами [4,5].

Исследования поддержаны грантом Российского научного фонда № 21-79-30041.

[1] Наймарк О.Б., 2003, Физ.Мезомех. **6**. 45-72.

[2] Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б., 2004, Физ. Мезомех. **7**. 305-308.

[3] Saveleva N.V., Bayandin Yu.V., Savinykh A.S., Garkushin G.V., Lyapunova E.A., Razorenov S.V., Naimark O.B., 2015, Tech. Phys. Lett. **41**. 579-582.

[4] Sokovikov M., Bilalov D., Oborin V., Chudinov V., Uvarov S., Bayandin Yu., Naimark O., 2016, Fracture and Structural Integrity. **10**. 280-287.

[5] Naimark O., Bayandin Yu., Uvarov S., Bannikova I., Saveleva N., 2021, Acta Mech. **232**. 1943–1959.

ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ И УГЛА АТАКИ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТАЛЬНЫХ И ТЯЖЕЛОСПЛАВНЫХ УДАРНИКОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПРЕГРАДАМИ

Радченко П.А., Радченко А.В.[®], Батуев С.П.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

[®] andrey@ispms.ru

Численно в трехмерной постановке исследуется влияние вращения оживального цилиндрического ударника из высокопрочной стали на разрушение при высокоскоростном взаимодействии со стальной преградой конечной толщины и влияние угла атаки на процесс взаимодействия удлиненного ударника из сплава ВНЖ 90 с преградой из алюминиевого сплава при низкоскоростном ударе.

Рассмотрен диапазон углов взаимодействия α от 0° до 75° и скоростей удара v_0 от 200 до 1000 м/с. Частота вращения ν оживального ударника вокруг продольной оси варьировалась от 0 до 10000 об/с. Поведение материалов ударника и преграды описывается упругопластической моделью. В качестве критерия разрушения используется предельная величина интенсивности пластических деформаций e_u . Моделирование проводится в трехмерной постановке методом конечных элементов с использованием авторского алгоритма и программного 3D комплекса EFES, позволяющего моделировать фрагментацию взаимодействующих тел с образованием новых контактных и свободных поверхностей, эрозионное разрушение материалов. Адекватность математической модели и численного алгоритма подтверждается хорошим согласием экспериментальных и численных результатов.

На рис. 1 в сечении приведены распределение e_u и конфигурации взаимодействующих тел после перфорации преграды. Ударник – цилиндр с оживальной головной частью, диаметром 25.4 мм и длиной 143.7 мм. Толщина преграды составляла 50 мм. Материал ударника – высокопрочная сталь VASCOMAX T-20 с пределом текучести 1.72 ГПа. Материал преграды – сталь с пределом текучести 1.01 ГПа. Как показывают расчеты, наличие вращения приводит к интенсификации пластической деформации и эрозионного разрушения ударника.

Рис. 2 иллюстрирует взаимодействие удлиненного ударника из тяжелого сплава ВНЖ 90 с преградой из алюминиевого сплава Д16 толщиной 12 мм при отсутствии угла атаки $\beta=0^\circ$ и с положительным углом атаки $\beta=10^\circ$. Угол атаки определяется следующим образом:

$\beta = \alpha_0 - \alpha$, где α_0 – угол между вектором скорости ударника и нормалью к преграде, α – угол между продольной осью ударника и нормалью к преграде. Наличие положительного угла атаки $\beta = 10^\circ$ приводит к нормализации ударника и перфорации преграды.

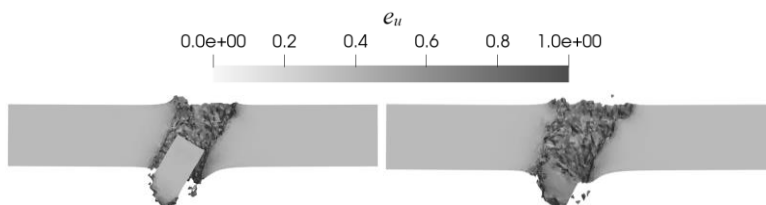


Рис. 2. Конфигурации ударника и преграды и распределение e_{ii} . $v_0 = 1000$ м/с, $\alpha = 30^\circ$. Слева – $v = 3000$ об/с, справа – $v = 10000$ об/с.



Рис. 2. Конфигурации ударника и преграды после их взаимодействия. $v_0 = 250$ м/с, $\alpha = 50^\circ$. Слева – $\beta = 0^\circ$, справа – $\beta = 10^\circ$.

Проведенные исследования показали, что наличие вращения ударника и угла атаки оказывают существенное влияние на разрушение взаимодействующих тел и кинематику ударника. Вращение приводит к интенсификации пластической деформации ударника в контактной области и эрозионного разрушения ударника, и способствует его рикошету, т.е. приводит к уменьшению угла взаимодействия при котором возникает рикошет. Положительный угол атаки приводит к нормализации ударника и перфорации преграды, отрицательный угол атаки, напротив, способствует рикошету ударника от преграды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-20091, <https://rscf.ru/project/22-21-20091/> и средств Администрации Томской области.

РАЗРУШЕНИЕ АНИЗОТРОПНОЙ КОМПОЗИТНОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ НАГРУЗКАХ

Радченко А.В.[®], Радченко П.А., Батуев С.П.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
[®] andrey@ispms.ru

Композиты на основе угле- и органопластиков находят все большее применение в различных областях техники, позволяя существенно уменьшить массогабаритные характеристики конструкций при сохранении надежности и прочности. Особенно это актуально для авиационной и космической техники, где основным параметром, характеризующим эффективность, является масса полезной нагрузки. В процессе эксплуатации элементы конструкции самолета испытывают разнообразные динамические нагрузки, в том числе многократные удары частиц воды или льда по композитному крылу. В результате таких воздействий в композите могут возникнуть повреждения, которые с течением времени могут привести к разрушению элемента конструкции.

В анизотропном материале упругие и прочностные свойства зависят от направления, во том числе и скорости распространения волн. Другими словами – волновая картина и динамика разрушения в анизотропном материале будут зависеть от ориентации осей симметрии к направлению действия внешней нагрузки. В работе численно в трехмерной постановке исследуется влияние анизотропии на распространение волн и разрушение ортотропной пластины при генерации в ней плоской волны сжатия и развитие разрушения при многократном нормальном и косом взаимодействии с частицами льда. Поведения композита описывается в рамках упруго-хрупкой модели. Для описания разрушения используются тензорно-полиномиальные и деформационный критерии, учитывающие различие в прочности композита и льда на сжатие и растяжение. Численное моделирование проводится с помощью авторского программного комплекса EFES.

На рис. 1 в сечении ZX представлены распределения областей разрушения в ортотропной композитной пластине толщиной 6 мм (справа от оси симметрии) и распределение напряжений (слева от оси симметрии) для исходной (рис. 1а) ориентации упругих и прочностных свойств ($E_x > E_y > E_z$) и для переориентированной (рис. 1 б) относительно оси Y на 90° ($E_x < E_y < E_z$), при ударе по ней алюминиевой пластины толщиной 3 мм со скоростью $v_0=100$ м/с. Здесь E_x , E_y , E_z – модули упругости в направлении X, Y и Z. Исследования показали, что

ориентация свойств в анизотропном материале по отношению к внешней нагрузке качественно меняет картину разрушения. В исходном материале наблюдается разрушение в волне разгрузки вблизи тыльной поверхности по типу откола. В переориентированном происходит разрушение только в волне сжатия в верхней части пластины. Это обусловлено большей прочностью в переориентированном материале в направлении Z и большей скоростью распространения волны в этом направлении, за счет этого волна разгрузки от тыльной поверхности ударника догоняет волну сжатия в преграде и снижает в ней уровень напряжений, что в итоге приводит к уменьшению растягивающих напряжений в отраженной волне разгрузки.

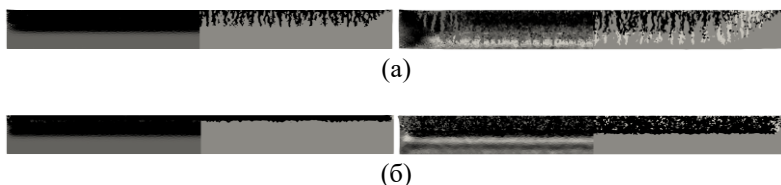


Рис. 1. Распределение напряжения σ_{zz} – слева от оси симметрии и областей разрушения – справа от оси симметрии, $v_0=100$ м/с. (а) – исходный материал $E_x > E_y > E_z$, (б) – переориентированный $E_x < E_y < E_z$.

На рис. 2 представлены сечения композитной пластины после последовательного удара по ней трех частиц льда с начальной скоростью $v_0=100$ м/с при нормальном ($\alpha=0^\circ$) и косом ударе ($\alpha=45^\circ$). В результате ударных воздействий в композитной пластине возникают повреждения глубиной 0.35 мм при $\alpha=45^\circ$ и 1.5 мм при $\alpha=0^\circ$.



Рис. 1. Повреждения в преграде, $v_0=100$ м/с.
Слева – $\alpha=0^\circ$, справа – $\alpha=45^\circ$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00407, <https://rscf.ru/project/22-21-00407/>.

Особенности ударно-волнового инициирования детонационного фронта в жидких взрывчатых веществах

Работа Д.Ю.^{1,@}, Уткин А.В.¹, Мочалова В.М.¹, Торуннов С.И.¹,
Сосиков В.А.¹

¹*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия,
@daniil.yurievichr@gmail.com*

Процесс инициирования детонационного фронта ударной волной является одним из важных аспектов в теории детонации конденсированных систем. Считается, что протекание химических реакций в ударно-сжатых жидких взрывчатых веществах имеет тепловую природу. Следовательно, исследования по данной теме способны дать более детальное представление о процессах возникновения и протекании химических реакций, а также о структурировании гидродинамических потоков в нестационарных условиях. Существующие теоретические представления предполагают инициирование детонации гомогенным процессом, происходящим в тонком слое вещества. Они достаточно хорошо описывают процессы ударно-волнового инициирования в нитрометане и его смесях с некоторыми инертными разбавителями. Однако, применимость этих моделей для описания других ВВ неочевидна, в частности, виден недостаток экспериментальных данных по данной тематике. Таким образом, целью работы было расширение круга исследованных веществ и уточнение теоретических представлений с использованием современной техники.

В рамках исследования были проведены эксперименты по изучению процессов инициирования детонационного фронта в чистом тетранитрометане и его смесях с инертными разбавителями, такими как ацетон и нитробензол. Регистрация ударно-волновых и детонационных процессов осуществлялась различными методиками. Свечение детонационного фронта в режиме инициирования и развития детонации фиксировалось сверхскоростными камерами НАНОГЕЙТ-4БП и НАНОГЕЙТ 22/16, а также СФР. Эволюция волновых профилей при ударно-волновом инициировании регистрировалась многоточечным лазерным интерферометром VISAR.

На полученных фоторазвёртках и снимках детонационного фронта зафиксированы картины инициирования детонации, отличающиеся от классических представлений. Как в смесях, так и в чистом тетранитрометане наблюдается процесс очагового зарождения детонационного фронта. Каждый очаг представляет собой отдельную сверхскоростную детонационную волну. Разрастаясь со скоростями порядка 10 км/с, волны начинают сливаться, догоняют фронт ударной волны и формируют единый детонационный фронт. В местах слияния образуются ярко светящиеся участки пересжатой детонации, след от которых фиксируется даже спустя 1,5 мкс после его образования. Рост концентрации разбавителя приводит к уменьшению количества очагов. При приближении к критическим концентрациям характер инициирования становится однородным, очаги исчезают. Кроме того, были получены снимки области преднагрева для чистого тетранитрометана. На протяжении всего эксперимента можно наблюдать, как фронт детонации от кадра к кадру повторяет форму пятна преднагрева, постепенно приближаясь к его границе.

Для смесей ТНМ/НБ 45/55 и ТНМ/НБ 76/24 получены профили скоростей на различной глубине образцов. В обоих случаях характер изменения волновых профилей во времени заметно отличается от ожидаемого характера развития детонации.

Таким образом, в тетранитрометане и его смесях с инертными разбавителями наблюдается неклассический, очаговый режим инициирования детонации. В частности, в смесях ТНМ/НБ нет никаких признаков формирования сверхскоростной детонации в ударно-сжатом ВВ. Результаты всех трёх методик хорошо согласуются между собой.

Работа выполнена по теме Государственного задания
№ АААА-А19–119071190040–5.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ВВ В ФОРМЕ JWL НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО СХЕМЕ CYLINDER- TEST С СИНХРОТРОННОЙ ДИАГНОСТИКОЙ

Е.Б. Смирнов^{1,2}, Д.В. Петров¹, А.Ю. Гармашев¹, А.К. Музыря¹,
К.М. Просвирнин¹, С.В. Шахмаев¹, Э.Р. Прууэл³, К.А. Тен³,
А.О. Кашкаров³

¹ ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск,
Россия

² Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск,
Россия

³ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия
ewgeny_smirnov@mail.ru

Процесс совершения работы над окружающей средой при детонации, а также параметры ударной волны, создаваемой в окружающей среде, для каждого ВВ однозначно определяются уравнением состояния продуктов взрыва (ПВ). Уравнение состояния продуктов взрыва ВВ как правило определяется на основе изэнтропии ПВ, проходящей через точку Чепмена-Жуге. Для определения хода изэнтропии расширения ПВ проводят эксперименты по определению метательного действия ВВ. С этой целью широко используются эксперименты по торцевому метанию пластин продуктами взрыва ВВ, а также эксперименты по метанию цилиндрических оболочек, получившие название экспериментов по схеме Cylinder-test. Наличие металлической оболочки в эксперименте вносит искажение в процесс расширения продуктов взрыва ВВ, но является необходимым для осуществления оптической или электроконтактной диагностики.

В данной работе предложена редакция экспериментов по схеме Cylinder-test без металлической оболочки с диагностикой процесса расширения ПВ при помощи синхротронного излучения. Эксперименты выполнены на ускорительном комплексе ВЭПП-3 Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН.

На основании экспериментальных данных построена изэнтропа расширения продуктов взрыва ВВ для уравнения состояния ПВ в форме Джонса-Уилкинса-Ли (JWL).

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ СПЛАВОВ ЛОКАЛИЗОВАННЫМ СДВИГОМ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ НАГРУЗКАХ

Соковиков М.А.¹, Симонов М.Ю.², Чудинов В.В.¹, Оборин В.А.¹,
Уваров С.В.¹, Наймарк О.Б.¹

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН*
²*Пермский национальный исследовательский политехнический
университет*
@sokovikov@icmm.ru

Целью данной работы является изучение одного из механизмов локализации пластического сдвига обусловленного структурными переходами в ансамблях дефектов мезоуровня при интенсивном нагружении [1].

Проводилось исследование механизма локализации пластического сдвига при динамическом нагружении на установке Гопкинсона – Кольского образцов специальной формы, обеспечивающих реализацию плоского деформированного состояния; образцов, в которых реализуется динамическое кручение, а также скошенных цилиндрических образцов) из сплава АМг6.

На оригинальной баллистической установке по исследованию пробивания были нагружены образцы из сплава алюминия АМг6. При высокоскоростном взаимодействии ударника с мишенью реализуется разрушение в виде формирования и выноса пробки. Температурные поля в реализованных процессах высокоскоростного деформирования исследовались «in-situ» с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M [2-10].

Проведены динамические испытания образцов, специальной формы из сплавов АМг6, Д16 и Сталь 3, на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского с применением системы измерения деформаций StrainMaster. Построены поля деформаций в образцах специальной формы из сплавов АМг6, Д16 и Сталь 3, испытанных при динамическом нагружении на стержне Гопкинсона-Кольского.

Сравнение экспериментально полученных полей температур и полей деформаций с результатами проведенного численного моделирования, проведенного с учетом особенностей кинетики накопления мезодефектов в материале, дает удовлетворительное соответствие с точностью ~20%.

Сохраненные после эксперимента образцы подвергались микроструктурному анализу с помощью оптического интерферометра-

профилометра и сканирующего электронного микроскопа. Структурный анализ показал коррелированное поведение ансамбля дефектов, которое может быть классифицировано, как структурный переход, обеспечивающий локализацию деформации.

Данные экспериментальных исследований, изучение структуры деформированных образцов, а также данные численного моделирования [2-10], проведенного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале позволяют предполагать, что один из механизмов локализации пластической деформации для исследованных материалов и реализованных условий нагружения обусловлен скачкообразными процессами в дефектной структуре материалов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-79-30041).

- [1] Наймарк О.Б., 2003, Физ. Мезомех. **6**. 45-72
- [2] Соковиков М.А., Билалов Д.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Плехов О.А., Терехина А.И., Наймарк О.Б., 2014, Письма в ЖТФ. **40**. 82 -88
- [3] Билалов Д.А., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Баяндин Ю.В., Терехина А.И., Наймарк О.Б., 2015, Вычислительная механика сплошных сред. **8**. 319-328
- [4] Билалов Д.А., Соковиков М.А., Чудинов В.В., 2017, Деформация и разрушение материалов. **5**. 43-47
- [5] Билалов Д.А., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Баяндин Ю.В., Терехина А.И., Наймарк О.Б., 2017, Вычислительная механика сплошных сред. **10**. 103-112
- [6] Соковиков М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Уваров С.В., О.Б. Наймарк, 2019, Вычислительная механика сплошных сред. **12**. 301-312.
- [7] Билалов Д.А., Соковиков М.А., Баяндин Ю.В., Чудинов В.В., Оборин В.А., Наймарк О.Б., 2019, Вестник ПНИПУ. Механика. **5**. 5-14
- [8] Соковиков М.А., Симонов М.Ю., Билалов Д.А., Симонов Ю.Н., Наймарк О.Б., 2020, Физ. Мезомех. **23**. 45–57
- [9] Соковиков М.А., Симонов М.Ю., Оборин В.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б., 2021, Вычислительная механика сплошных сред. **14**. 300-311.
- [10] Соковиков М.А., Оборин В.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б., 2021, Вестник ПНИПУ. Механика. **3**. 154-162

ФОРМИРОВАНИЕ СХОДЯЩЕЙСЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ С ОБРАТНОЙ КРИВИЗНОЙ ФРОНТА

Султанов В.Г.^{1,@}, Дудин С.В.¹, Сосиков В.А.¹, Торунов С.И.¹,
Василенок Е.В.², Размыслов А.В.¹

¹*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка*

²*МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

@sultan@icp.ac.ru

При использовании метода многоточечного инициирования цилиндрического заряда формируется детонационная волна, имеющая сложную газодинамическую структуру. В случае осесимметричного сжатия детонационная волна между узлами, т.е. местами сопряжения волн от соседних точек инициирования, имеет форму многоугольника и всегда выпуклая в сторону оси сжатия. В работе предлагается использовать специальные устройства – линзы – для получения детонационной волны с обратной кривизной. Исходя из экспериментальных данных рассчитывается профиль линзы из инертного материала. Модель узла инициирования, включая линзы изготавливаются из полимера методом 3D печати. Проведено математическое моделирование работы узла инициирования. Получены уравнения состояния для продуктов взрывчатого вещества, которое используется в узле инициирования, и пластика, из которого изготовлена линза. Представлены результаты расчетов по созданной модели, которые выявили некоторые особенности работы узла инициирования. С использованием высокоскоростной съемки получена картина формирования цилиндрической детонационной волны с использованием отработанной системы инициирования и линз из инертного материала. Представлена динамика осесимметричного сжатия сходящейся детонационной волной. Проведено сравнение с полученными расчетами.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ,
СОСТОЯНИЙ ПИКА НЕЙМАНА И ЧЕПМЕНА-ЖУГЕ В
ГОМОГЕННЫХ ВВ

А.В.Федоров, Л.К.Антонюк, Д.В.Назаров, С.А.Финюшин *РФЯЦ–
ВНИИЭФ, 607188 Саров* fedorovsarov@mail.ru

С помощью метода лазерного интерферометра Фабри–Перо проведено исследование параметров детонации монокристаллов ТЭНа и октогена. Для исследуемых ВВ определены величины состояний пика Неймана, Чепмена–Жуге, параметров ширины зоны химической реакции (ЗХР). Установлено, что длительность ЗХР в монокристаллах ВВ во много раз выше, чем в гетерогенных ВВ, например, для монокристалла ТЭНа превышение составляет более 20 раз. Для смесевых жидких ВВ на основе тетранитрометана (ТНМ), нитрометана (НМ) и нитробензола (НБ) в зависимости от состава компонентов зарегистрированы как устойчивые, так и неустойчивые режимы детонации. Переход от устойчивого к неустойчивому режиму происходит в том случае, когда величина критического давления инициирования детонации превышает давление Чепмена–Жуге. В смесевых ВВ (типа горючее–окислитель) критическое давление инициирования растёт с увеличением массовой доли горючего. Например, для смеси ТНМ/НБ критическое давление инициирования превышает давление Чепмена–Жуге и режим становится неустойчивым при массовой концентрации НБ ≥ 20 %.

О ПЕРЕДАЧЕ ДЕТОНАЦИИ ЧЕРЕЗ ЗАЗОР В НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОМ ВВ

Шорохов Е.В., Сырцов А.Б., Беляков В.И., Лебедев А.В.,
Оглезнева Н.П.

*ФГУП “РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина”,
г. Снежинск, Россия
vniitf@vniitf.ru*

Экспериментально исследовалось развитие детонации в низко чувствительном ВВ на основе ТАТВ после введения в него зазора. Определялось влияния величины зазора на структуру детонационного фронта и характер взрывчатого превращения. Исследуемый образец ВВ состоял из двух шашек $\varnothing 60$ мм. и длиной 40мм и 15мм., соответственно. Между шашками организовывался зазор, величина которого варьировалась в опытах от нуля до 4.3 мм. Иницирование ВВ осуществлялось с помощью генератора плоской детонационной волны. Предварительно было показано, что в донорской шашке устанавливался стационарный детонационный режим со скоростью детонации 7.64 км/с. Измерения в опытах проводилась с применением двух пьезорезистивных датчиков, которые устанавливались в приемной шашке на глубине 5 мм от зазора в одной плоскости. Рассматривались зазоры от нуля до 4.3 мм. В опытах без зазора и с зазором 0,43 мм были получены близкие по форме профили детонационных волн. В обоих опытах на фронте выделялись острый пик и примыкающая к нему по давлению полочка. Давление на пике волны составило (28 - 30) ГПа, а на полочках с длительностью от 0.1 мкс до 0.3 мкс было (25-28) ГПа. Затем следовал спад по давлению, обусловленный разлетом продуктов взрыва. Отмечено, что давления на фронте волны по своей величине коррелируют с давлением в точке Жуге для ВВ РВХ 9502. При зазоре 0.94 мм начинают появляться различия в измерениях датчиков. Один из них зарегистрировал острый пик с давлением 29 ГПа и полочку с амплитудой в 25 ГПа. У другого начальное давление во фронте не превышало 25 ГПа, и только потом, спустя 0.1 мкс, возрастало до 28 ГПа. При зазоре 1.91 мм у

обоих датчиков отмечается завал фронта до 0.2 мкс. Далее, соответственно, формируются полочки с давлением 29 ГПа и 25 ГПа. Отмечается, что профили разлета продуктов взрыва оказываются достаточно близкими. Наиболее радикальные изменения в детонационной волне происходят при зазорах 4 мм и выше. Это проявляется в виде завала фронта, задержки возникновения детонации, ее неполном протекании и срыве. Причем весь процесс носит вероятностный характер и чувствителен к малым изменениям величины зазора. Полученные результаты представляют интерес при изучении инициирования других низкочувствительных ВВ, а также при рассмотрении вопросов связанных с обеспечением безопасности проведения взрывных работ.

ПОВЫШЕННОЕ УПЛОТНЕНИЕ ПОРИСТОГО АЛЮМИНИДА НИКЕЛЯ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

Якушев В.В.[@], Уткин А.В., Жуков А.Н.
ФГБУН Институт проблем химической физики РАН,
г. Черноголовка, Россия
[@] yakushev@icp.ac.ru.

С использованием лазерного интерферометра проведена регистрация волновых профилей в пористых (пористость 30%) образцах алюминид никеля в диапазоне давлений до 50 ГПа. Получены данные по ударной сжимаемости образцов.

Образцы в форме таблеток диаметром 20 мм и толщиной 3 мм изготавливались путем прессования порошка алюминид никеля эквиатомного состава с последующим спеканием в вакуумной печи. Ударно-волновое нагружение образцов осуществлялось алюминиевыми ударниками, разгоняемыми с использованием взрывных метательных устройств. Регистрация профилей скорости движения границы образца с водяным окном или с пустотой проводилась лазерным интерферометром VISAR. Скорость ударной волны в образцах определялась по меткам времени.

Обнаружено аномально высокое уплотнение, проявляющееся в пересечении ударных адиабат сплошных [1] и пористых образцов при давлении 28 ГПа, которое указывает на наличие фазового превращения.

Работа выполнена по теме Государственного задания № АААА-А19-119071190040-5.

[1] Yakushev V. V., Utkin A. V., Zhukov A. N., Ananov S. Y., Dolgoborodov A. Y., Moskovskikh D. O., 2019, High Pressure Res. **39**. 471-79.

МАТЕРИАЛООБРАЗУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

АЛЫМОВ М.И.

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А. Г. Мержанова РАН,
г. Черногловка, РФ
alymov@ism.ac.ru*

Разработки и исследования материалообразующих процессов горения и взрыва, структурной макрокинетики и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) позволяют получать новые материалы с уникальными свойствами. Для этого проводятся теоретические и экспериментальные исследования методами общей и структурной макрокинетики механизмов высокотемпературных физико-химических процессов, имеющих ключевое значение для создания перспективных технологий и материалов. Отличительной особенностью структурно-макрокинетического подхода является комплексный анализ физико-химических превращений на всех структурных уровнях, от атомного до макроскопического, в их взаимосвязи. Создаются новые и развиваются существующие методы теоретического моделирования и экспериментальной диагностики сложных процессов, охватывающих: кинетику элементарных актов физико-химических превращений в газах, расплавах и твердых телах на атомно-молекулярном уровне; макрокинетику процессов диффузии, конвекции, рекристаллизации, кондуктивного и конвективного теплопереноса; структурную макрокинетику фазовых переходов, эволюции кристаллической структуры реагирующей среды и формирования структуры продуктов реакции.

Разрабатываются методы СВС новых материалов, в том числе новых поколений конструкционных жаропрочных, жаростойких высокотемпературных материалов на основе тугоплавких металлов и их соединений, функциональных и высокочистых материалов. Перспективны методы время-разрешающей рентгенографии и высокотемпературной рентгенографии для исследования механизмов фазообразования при СВС и изучения динамики фазовых и структурных превращений материалов.

РЕЖИМЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ В СВС-РЕАКТОРАХ

Грачёв В.В.

*ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем
материаловедения им. А.Г. Мерджанова РАН (ИСМАН)*

г. Черноголовка, Россия

grachev@ism.ac.ru

Промышленное внедрение СВС-технологий диктует необходимость детального исследования стадии масштабирования процесса от лабораторного экспериментального до индустриально-технологического уровня. Поскольку самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) представляет собой сложное макрокинетическое явление, характеризующееся множеством параметров с сильно нелинейными связями, то предсказать заранее результат масштабирования процесса без специальных дополнительных исследований не всегда возможно. Простое пропорциональное увеличение, например, массы используемой при синтезе шихты и геометрических размеров реактора не всегда приводит к ожидаемому результату и получению продукта требуемого качества. Особенно это характерно для процессов СВС в системах газ-твердое. В лабораторной практике исследование закономерностей синтеза проводят, как правило, на предварительно спрессованных таблетках небольшого размера диаметром порядка 1 см и при постоянном давлении газа. Этому посвящено подавляющее большинство публикаций по синтезу различных неорганических соединений методом СВС. В то же время в лабораторных и промышленных реакторах для синтеза используют шихту насыпной плотности, причем масса шихты намного превышает массу спрессованных таблеток, используемых в лабораторных исследованиях. Указанные обстоятельства качественно меняют закономерности процесса горения в реакторах по сравнению с горением маленьких таблеток.

Несмотря на большой практический интерес, данные по горению в реакторах в литературе крайне скудны и носят в основном экспериментальный характер. В данной работе на основе теоретического анализа модели процесса фильтрационного горения в СВС-реакторе проводится общая классификация тепловых режимов синтеза, и приводятся некоторые экспериментальные данные по синтезу в реакторе, полученные с использованием развитых теоретических представлений.

СВС СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НИОБИЯ И ГАФНИЯ

Камынина О.К.^{1@}, Вадченко С.Г.², Ковалев И.Д.², Прохоров Д.В.¹

¹ *Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН*

² *Институт структурной макрокинетики и проблем
материаловедения им. А.Г. Мерджанова РАН*

@ kok@issp.ac.ru

В последнее время все более широкое применение находят композиционные слоистые материалы, сочетающие в себе свойства металла и керамики. Сочетание свойств металла (пластичность, термостойкость, высокая теплопроводность и др.) и керамики (твердость, коррозионная стойкость, жаропрочность, низкая теплопроводность и т.д.) обеспечивают металлокерамическим материалам использование в различных отраслях промышленности: авиакосмической, машиностроении, энергетике и т.д. Однако, различие физических, прочностных и химических характеристик керамики и металлов осложняют производство многослойных композиционных материалов на их основе. Можно выделить два основных фактора, влияющих на надежность соединения: соответствие коэффициента теплового расширения (КТР) и образование нежелательных промежуточных слоев [1].

В работе [2] показано, что методы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) могут быть успешно применены к соединению различных материалов: керамика, металлы, углеродные материалы и т.д.

В данной работе экспериментально исследуется формирование соединений фольг тугоплавких металлов (Ti, Hf, Nb, Ta, Ni) с керамическими слоями, образующимися в результате горения реакционных лент, прокатанных из порошковых смесей (Ti+1.7V, Ti+0.65C, 5Ti+3Si).

В результате проведенных экспериментов показано, что за доли секунды в условиях СВС формируются легкие, тонкие композиционные материалы металл-керамика (толщиной 1,5–2 мм). Микроструктура и фазовый состав полученных образцов исследовались методами СЭМ и РФА. Термомеханические свойства образцов определяли по схеме трехточечного нагружения при комнатной температуре и при нагревании до 1100°C.

Анализ микроструктуры синтезированных образцов показал, что соединения в режиме горения между металлическими фольгами и

реакционными лентами, прокатанными из порошковых смесей, обеспечивается за счет реакционной диффузии, взаимной пропитки и химических реакций, протекающих в реакционных лентах и на поверхности металлических фольг. При этом формируются тонкие промежуточные слои, состоящие из твердых растворов и металлокерамических соединений. Формирование промежуточных слоев в виде металлокерамики и эвтектических растворов обеспечивает синтезированным многослойным материалам хорошие прочностные свойства (до 275 МПа при 25°C, до 72 МПа при 1100°C).

В процессе горения практически все пары (ленты Ti+1.7B, Ti+0.65C, 5Ti+3Si и фольги Ti, Hf, Nb, Ta, Ni) образуют прочные соединения, что позволяет на их основе конструировать материалы с заданной структурой, размером пористости и прочностными характеристиками.

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

[1] Wunderlich W., 2014, Metals, 4, 410-427

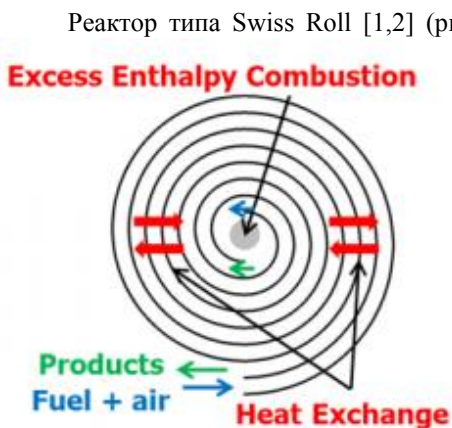
[2] Rogachev A.S. et. al., 2018, Adv. Eng. Mater., 20(8), 1701044

РЕАКТОР SWISS ROLL ДЛЯ СЖИГАНИЯ НИЗКОКАЛОРИЙНЫХ ГАЗОВ: КАЧЕСТВЕННАЯ ТЕОРИЯ

Полианчик Е.В.

Институт проблем химической физики РАН

polian@icp.ac.ru

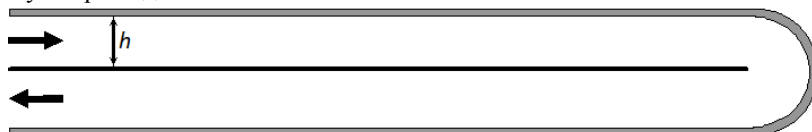


образованной двумя каналами – входным и исходящим, позволяет обеспечить эффективный теплообмен между потоками исходных реагентов и продуктов реакции при почти полном отсутствии внешних теплотерь и поэтому обеспечивает возможность проведения реакций с малым тепловым эффектом при высокой температуре –

в сверхадиабатическом режиме.

Рассмотрим качественную картину горения низкокалорийного газа в Swiss Roll. При анализе мы сделаем ряд упрощений, которые позволят получить решение в явном виде, позволяющем анализировать характер зависимости процесса от управляющих параметров.

Итак. Упростим геометрию, «развернув» реактор в два канала, идеально теплоизолированных снаружи (рис.2). Полагаем, что оба канала имеют прямоугольное сечение высотой h и шириной d . Суммарная длина канала L .



Реакционноспособный газ поступает во входной канал, постепенно нагреваясь от стенки (которую с противоположной стороны нагревают продукты). В результате нагревания реакционноспособный газ воспламеняется и реагирует с выделением тепла. Основные допущения, которые мы принимаем при анализе: поток газа можно считать одномерным (вдоль канала); теплофизические характеристики

газа постоянны; внешние теплотери отсутствуют; химическая реакция описывается простой аррениусовской зависимостью с большой энергией активации. При сделанных допущениях распределение температуры во входном (T) и выходном (t) канале по длине (x):

$$(\rho c u) \partial T / \partial x = -\alpha(T-t)/h + qW;$$

$$-(\rho c u) \partial t / \partial x = -\alpha(t-T)/h$$

$$(\rho u) \partial n / \partial x = -W = -k_p n \exp(-E/T)$$

В случае, когда химическая реакция отсутствует, а в центре спирали ($x = L$) действует нагреватель мощностью Q распределение температуры принимает вид: $T(x) = T_0 + x * \alpha Q / (h \rho c u)$; $t(x) = T_0 + Q + x * \alpha Q / (h \rho c u)$, т.е., при увеличении общей длины канала температура в центре может неограниченно возрастать. Однако при подаче реакционноспособного газа это не так. При достаточно высокой температуре начнётся реакция и зона тепловыделения сместится во входной канал. При высокой энергии активации можно оценить положение узкой зоны реакции из условия равенства теплоприхода от стенки и тепловыделения за счёт реакции.

$$\alpha q / ch = k_p \exp(-E/T^*), \text{ т.е. } T^* = E / \ln(hck_p / \alpha)$$

Отметим, что температура воспламенения T^* не зависит ни от скорости подачи газа, ни от теплового эффекта реакции. Таким образом, распределение температуры имеет вид

$$0 \leq x \leq L^* : T(x) = T_0 + x * \alpha (q/c) / (h \rho c u); \quad t(x) = T_0 + q/c + x * \alpha (q/c) / (h \rho c u);$$

$$L^* < x \leq L : T(x) = t(x) = T^* + q/c$$

С увеличением скорости потока происходит смещение зоны горения дальше по входному каналу. Равенство $L^* = L$ (фронт горения находится в центре спирали) соответствует критическим условиям: при большей скорости подачи газа происходит срыв горения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-23-00784.

[1] Lloyd S., Weinberg F. (1974) Nature, **251**, 47-49.

[2] Jones A., Lloyd S., Weinberg F. (1978) Proc. Royal Soc. London A, **360**, 97-115.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ CoCrFeNiCu НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА

Поляков М.В.^{1,2,@}, Рогачев А.С.¹

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

²*ИНМЭ РАН, г. Москва, Россия*

@ maxsimpolykovv@gmail.com

Удешевление процесса производства, экологичность, простота синтеза – вектор развития материалов. Многочисленная комбинация составов ВЭС их уникальных свойств, а также их исследование привлекает большой интерес. На их основе можно создавать термоэлектрические преобразователи, имеющие высокую эффективность ($ZT > 3$ [1]), коррозионностойкие покрытия, а также создание приборов спинтроники.

Краеугольным камнем ВЭС является то, что все элементы взятые в равных или близких мольных долях входящие в состав сплава образуют одну фазу. В кристаллической решетке атомы разных типов располагаются в случайном порядке, таким образом ВЭС является разупорядоченным твердым раствором замещения. С увеличением содержания компонентов в сплаве увеличивается конфигурационная энтропия и повышается стабильность структуры [2].

Из-за различий в размерах атомов разных элементов, входящих в сплав, кристаллическая решетка оказывается сильно искаженной, поэтому структуру можно рассматривать как промежуточную между метастабильными металлическими стеклами, в которых отсутствует дальний порядок и стабильными кристаллическими фазами с небольшой равновесной концентрацией дефектов. Особенности структуры приводят к возникновению уникальных свойств, таких как: повышенная пластическая деформация при низких температурах и малый коэффициент диффузии. В связи с этим особенно актуальным является стабильность ВЭС [3].

В докладе обсуждаются результаты исследований термической стабильности наноструктурированного CoCrFeNiCu высокоэнтропийного сплава. Стабильность CoCrFeNiCu высокоэнтропийного сплава была изучена после отжига длительностью 1 сутки, 3 суток, 10 суток, 20 суток и 204 суток при температуре 800 °С. Просвечивающая электронная микроскопия проводилась на кросс-

секциях, подготовленных методом фокусированного ионного пучка. Был получен элементный состав при помощи энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, а также определены фазы при помощи дифракции выбранной области.

Показано, что основные структурные изменения происходят в первые сутки термического отжига, но даже длительный отжиг приводит к дальнейшему укрупнению частиц в сплаве.

[1] A. Bharwdaj et al., Current Research and Future Prospective of Iron-Based Heusler Alloys as Thermoelectric Material, Nanotechnologies in Russia (2019)

[2] N.F. Shkodich et al., Fast mechanical synthesis, structure evolution, and thermal stability of nanostructured CoCrFeNiCu high entropy alloy, Journal of Alloys and Compounds (2021)

[3] А.С. Рогачев, Структура, Стабильность И Свойства Высокоэнтропийных Сплавов, Фи-зика Металлов И Металловедение (2020)

СВС В НАНОСИСТЕМАХ: НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДА СИНТЕЗА ГОРЕНИЕМ

Рогачев А.С.

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

г.Черноголовка, РФ

rogachev@ism.ac.ru

Процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), открытые российскими учеными около 55-ти лет назад, послужили основой для создания ряда новых технологий материалов и изделий [1-3]. Современные тенденции развития этого метода связаны с переходом к использованию наноразмерных исходных реагентов, получаемых разными способами. В обзорном докладе рассмотрены три новых направления исследований и разработок в области СВС, объединенных общей идеей нано-гетерогенности исходной реакционной среды: синтез горением растворов, горение многослойных реакционных фольг и механически структурированных систем.

Метод синтеза горением растворов первоначально был разработан для синтеза нанопорошков оксидов, в том числе многокомпонентных и со сложной кристаллической структурой [4]. Идея метода состоит в том, что органическое горючее (глицин, сахароза и др.) растворяется в воде вместе с окислителем (нитраты металлов), вода выпаривается и получается гель, способный воспламеняться как на воздухе, так и в инертной атмосфере. Продукт горения образуется в виде высокопористой структуры, состоящей из частиц с узким распределением размеров, около 100 нм и менее. Простота метода и уникальные свойства продуктов быстро привлекли исследователей из десятков стран, и количество ежегодных научных публикаций в этой области превосходит число публикаций по всем остальным видам СВС. Найдены способы получать нанопорошки чистых металлов, а также полые металлические сферы диаметром 1-2 микрона и другие интересные морфологии частиц продуктов для разнообразных применений [5]. При этом механизм горения и структурообразования в данных системах остается малоизученным.

Биметаллические фольги, состоящие из тысяч чередующихся нанослоев металлических реагентов (Ni/Al, Pd/Al и др.), полученных магнетронным напылением, расширили наши представления о закономерностях и механизмах горения СВС-систем безгазового типа

и нашли промышленное применение для соединения термочувствительных и разнородных материалов и изделий [6,7]. Исследования последних лет выявили весьма необычный механизм горения реакционных нанофольг термитного типа (CuO/Al).

Производительным методом получения реакционных СВС-составов из субмикронных чередующихся слоев реагентов является механическое структурирование, причем наибольшее влияние эта обработка оказывает на температуру зажигания благодаря образованию наноразмерных зародышей продукта реакции [8].

Таким образом, использование наногетерогенных реакционных составов дает новый импульс развитию метода СВС.

1. Мержанов А.Г., Шкиро В.М., Боровинская И.П. Способ синтеза тугоплавких неорганических соединений. Авт. свид. № 255221, 1967, заявка № 1170735. Бюлл. Изобр., 1971, №10.
2. Мержанов А.Г., Боровинская И.П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез тугоплавких неорганических соединений. Доклады АН СССР, 1972, т.204, №2, с.366-369.
3. Рогачев А.С., Мукасян А.С. Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетику (монография). Москва, Физматлит, 2012, 398 с.
4. Patil K.C., Hedge M.S., Rattan Tanu, Aruna S.T. Chemistry of Nanocrystalline Oxide Materials: Combustion Synthesis, Properties and Applications, World Scientific, New Jersey, 2008, 345 pp.
5. Varma A., Mukasyan A.S., Rogachev A.S., Manukyan Kh.V. Solution Combustion Synthesis of Nanoscale Materials. Chem. Rev., 2016, 116 (23), pp 14493–14586.
6. Barbee T.W., Weihs T. Ignitable heterogeneous stratified structure for the propagating of an internal exothermic chemical reaction along an expanding wavefront and method of making same. US Patent № 5538795. Jul. 23, 1996
7. Рогачев А.С. Волны экзотермических реакций в многослойных нанопленках. Успехи химии, 2008, т. 77(1), с. 22-38.
8. Рогачев А.С. Механическая активация гетерогенных экзотермических реакций в порошковых смесях. Успехи химии, 2019, 88 (9) 875 – 900.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-13-00277).

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ПОЛУЧЕННОЙ СКОРОСТИ РОСТА ВОЗМУЩЕНИЙ ФРОНТА МЕТАНО- ВОЗДУШНОГО ПЛАМЕНИ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ

Володин В.В.[@], Ельянов А.Е., Голуб В.В., Микушкин А.Ю.

Объединенный институт высоких температур РАН

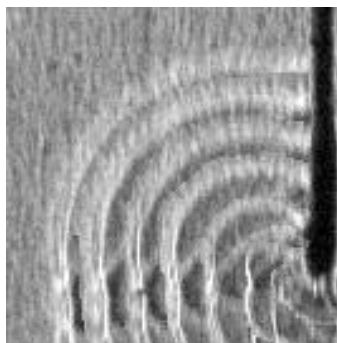
[@] vlad@ihed.ras.ru

Точное моделирование скорости и эволюции пространственной структуры фронта ламинарного газового пламени на протяжении многих лет является одной из наиболее актуальных задач физики горения и взрыва. Неустойчивость гладкого фронта пламени впервые была обнаружена экспериментально, впоследствии математическая теория неустойчивости газовых пламен была независимо сформулирована в работах Г. Дарье и Л.Д. Ландау. В дальнейшем теория уточнялась с учетом подавления роста неоднородностей с короткой длиной волны и растяжения пламени при сферическом распространении.

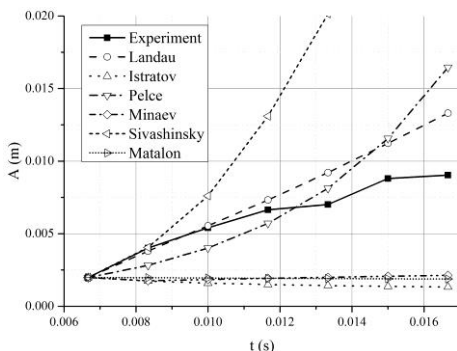
В данной работе экспериментально получены временные зависимости амплитуды неоднородностей на складчатом сферически расширяющемся фронте пламени в метано-воздушных смесях с содержанием метана от 7,5 до 13 об. %.

На рис. 1(a) представлена последовательность теневых снимков, демонстрирующая развитие неоднородностей на фронте пламени в метано-воздушной смеси с содержанием метана 7,5 об. %. На каждом снимке определяются координаты трёх точек, две из которых представляют основание неоднородности и одна – вершину. После этого, решением треугольника получают значения длины волны и амплитуды. Экспериментальная зависимость амплитуды от времени (пример на рис. 1(b) для одной из неоднородностей фронта пламени в метано-воздушной смеси с содержанием метана 7,5 об. %) используется для сравнения с теоретическими зависимостями.

Для сравнения с экспериментальными зависимостями по моделям Л.Д. Ландау [1], Пелсе-Клавина [2], Истратова-Либровича [3], Г.И. Сивашинского [4], С.С. Минаева [5] и М. Маталона [6] построены аналитические решения или алгоритмы численного интегрирования по времени. В качестве начального значения взята амплитуда, измеренная на первом кадре.



a



b

Рисунок 1. а) Наложенные друг на друга теневые изображения 7,5 об. % метано-воздушного фронта пламени с интервалом 1/150 с; б) измеренные и рассчитанные зависимости амплитуд неоднородностей от времени.

На графиках, представленных на рис. 1(б), видно, что до 12 мс амплитуда возмущений лучше всего описывается моделью Л.Д. Ландау. После 12 мс рост амплитуды замедляется, а модели, учитывающие сферическое расширение распространения пламени (М. Маталона, С.С. Минаева, Истратова-Либровича), дают значения значительно ниже измеренных. Модель Г.И. Сивашинского сильно завышает скорость роста неоднородностей; модель Пелсе-Клавина сначала показывает увеличение амплитуды меньше измеренного, но через 13 мс оно превышает измеренное значение.

В результате сравнения экспериментальных и теоретических зависимостей показаны модели, наилучшим образом описывающие рост амплитуды неоднородностей расширяющегося фронта пламени в различных метано-воздушных смесях.

[1] Ландау Л.Д., 1944, ЖЭТФ. **14**. 240-4.

[2] Pelce P., Clavin P., 1982, J. Fluid Mech. **124**. 219-37.

[3] Истратов А.Г., Либрович В.Б., 1966, ПМТФ. **1**. 67-78.

[4] Filyand L., Sivashinsky G., Frankel M., 1994, Physica D. **72**. 110-8.

[5] Минаев С.С., Пирогов Е.А., Шарыпов О.В., 1996, ФГВ. **5**. 8-16.

[6] Addabbo R., Bechtold J.K., Matalon M. 2002, Proc. Combust. Inst. **29**. 1527-35.

ФИЛЬТРАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕНОСА

Гулбоев Б.Дж.¹, Баротов А.С.²

¹Российско-Таджикский (Славянский) университет

²Дангаринский государственный университет

г. Душанбе, Республика Таджикистан

bakhtiyor-2012@mail.ru

Целью настоящей работы является выяснение влияния температурной зависимости коэффициентов переноса на скорость волны фильтрационного горения газов. При этом используется математическая модель, состоящая из системы уравнений распространения тепла, переноса массы каждого компонента смеси, сохранения полного количества вещества в потоке и уравнение состояния идеального газа[1]. В этой модели коэффициенты переноса были приняты постоянными. В теории горения переменность теплофизических свойств реакционных систем не принимается в расчёт, хотя из общих соображений ясно, что изменения могут быть весьма существенными ввиду большого перепада температур. Ещё в конце шестидесятых годов двадцатого века [2] была решена задача о распространении пламени с учётом гидродинамики и температурной зависимости коэффициентов переноса. В связи с этим в данной работе предлагается предложение, что параметры и коэффициенты переноса системы (реакционная смесь и пористая среда) должны соответствовать состоянию воспламенения реакционной смеси. То есть значения коэффициентов переноса должны соответствовать температуре воспламенения смеси, которая в свою очередь зависит от значения параметров при нормальных условиях. Для получения значений коэффициентов переноса при характерной температуре в [3,4] приведены следующие соотношения соответственно

$$c_{p,O_2} = 1.0697 + 0.9 \cdot 10^{-4} (T - 873), \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}),$$

$$c_{p,N_2} = 1.1401 + 1.1 \cdot 10^{-4} (T - 873), \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}),$$

$$c_{p,CH_4} = 2.2526 + 0.8 \cdot 10^{-2} (T - 298)^{0.8}, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$$

$$\lambda_1(T_*) = \lambda_{10} \left(\frac{T_*}{T_0} \right)^{0.77}, \quad D_{1(i)}(T_*) = D_{1(i)0} \left(\frac{T_*}{T_0} \right)^{\alpha_i - 1}, \quad i=1,2,3,4,$$

$$D_{1(1)0} = 1.96 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}, \quad D_{1(2)0} = 1.81 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с},$$

$$D_{1(3)0} = 2.77 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}, \quad D_{1(4)0} = 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с},$$

где $\alpha_1 = 1.76$, $\alpha_2 = 1.92$, $\alpha_3 = 1.8$, $\alpha_4 = 1.9$ - показатели степени в температурной зависимости коэффициентов диффузии метана, кислорода, паров воды и диоксид углерода соответственно.

Скорость волны определялся по нижеприводимому соотношению для случая горения метановоздушной смеси в инертной пористой среде [1]

$$\begin{aligned}
 (v_{10} - U)^2 = k_0 \exp\left(-\frac{1}{\beta}\right) \frac{\gamma \lambda_1 \Lambda \alpha_1}{\rho_{10} c_p u_\varphi} \cdot \frac{T_0}{T_e} & \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{Le_{eff(1)} u_\varphi}} - \frac{\eta_{1(1)0}}{1 + \frac{\gamma}{Le_{eff(1)} u_\varphi}} - \right. \\
 - \frac{4\eta_{1(1)0}}{1 + \frac{\gamma}{Le_{eff(2)} u_\varphi}} + \frac{9}{4} \cdot \frac{\eta_{1(1)0}}{1 + \frac{\gamma}{Le_{eff(3)} u_\varphi}} + \frac{11}{4} \cdot \frac{\eta_{1(1)0}}{1 + \frac{\gamma}{Le_{eff(4)} u_\varphi}} + \frac{\eta_{1(1)0}}{1 + \frac{2\gamma}{Le_{eff(1)} u_\varphi}} & + \\
 + \frac{4\eta_{1(1)0}}{1 + \frac{\gamma}{Le_{eff(2)} u_\varphi} + \frac{\gamma}{Le_{eff(1)} u_\varphi}} - \frac{9}{4} \frac{\eta_{1(1)0}}{1 + \frac{\gamma}{Le_{eff(3)} u_\varphi} + \frac{\gamma}{Le_{eff(1)} u_\varphi}} - \frac{11}{4} \frac{\eta_{1(1)0}}{1 + \frac{\gamma}{Le_{eff(4)} u_\varphi} + \frac{\gamma}{Le_{eff(1)} u_\varphi}} & \left. \right]
 \end{aligned}$$

$$Le_{eff(i)} = \frac{Le_i}{\Lambda}, \quad \Lambda = 1 + \frac{\alpha_2 \lambda_2}{\alpha_1 \lambda_1}, \quad Le_i = \frac{D_{1(i)} \rho_{10} c_p}{\alpha_i \lambda_i}, \quad \gamma = \frac{RT_e^2}{E(T_e - T_0)},$$

$$u_\varphi = 1 - \frac{\varphi}{u_0 - 1}, \quad \varphi = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_{10} c_p}, \quad u_0 = \frac{v_{10}}{U}, \quad T_e = T_0 + \frac{Q \eta_{1(k_e)0}}{c_p u_\varphi}, \quad \beta = \frac{RT_e}{E}.$$

Расчёты скорости волны при температурной зависимости коэффициентов переноса показывают её относительное увеличение.

[1] Кабилов М.М., Гулбоев Б.Дж. – ДАН РТ, 2013, т.56, №1, с. 35-43.

[2] Шкадинский К.Г., Филоненко А.К. ФГВ, 1969, №1, с. 80-84.

[3] Сабденов К.О. ФГВ, 2016, т. 52, № 4, с. 24-35.

[4] Иванов Ю.С. Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация, 2004, №5(15), с. 56-64.

ТЕПЛОВОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ГАЗОВОЙ СМЕСИ В ИНЕРТНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Кабилов М.М.

*Российско-Таджикский (Славянский) университет, г. Душанбе,
Таджикистан, maruf1960@mail.ru*

Целью работы является математическое моделирование температуры газа в порах пористой среды, при которой происходит иницирование химической реакции, а также стационарной скорости волны горения, профили температур и недостающего компонента смеси в зависимости от физико-химических констант пористой среды и смеси газов.

Математическая модель воспламенения смеси газов в инертной пористой среде, в системе координат движущейся со скоростью u и в безразмерных параметрах и переменных имеет вид [1, 2]

$$\gamma_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \bar{t}} + \gamma_1 \left(1 - \frac{1}{u_0}\right) \frac{\partial \theta_1}{\partial \bar{x}} = -\alpha' \gamma_1 (\theta_1 - \theta_2) + n \exp\left(\frac{\theta_1}{1 + \beta \theta_1}\right), \quad (1)$$

$$\gamma_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial \bar{t}} - \frac{\gamma_2}{u_0} \frac{\partial \theta_2}{\partial \bar{x}} = \gamma_2 \Lambda \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial \bar{x}^2} + \alpha' \gamma_1 (\theta_1 - \theta_2),$$

$$\frac{\partial n}{\partial \bar{t}} + \left(1 - \frac{1}{u_0}\right) \frac{\partial n}{\partial \bar{x}} = -n \exp\left(\frac{\theta_1}{1 + \beta \theta_1}\right).$$

$$\bar{x} = \frac{x}{L}; \quad L = \frac{u_{10}}{k_0 \exp(-E/RT_*)}; \quad \bar{t} = k_0 \exp(-E/RT_*) \cdot t; \quad \gamma_1 = \frac{RT_*^2 c_p}{EQ \eta_0}; \quad \gamma_2 = \gamma_1 \varphi;$$

$$\theta_1 = \frac{E}{RT_*^2} (T_1 - T_*); \quad \theta_2 = \frac{E}{RT_*^2} (T_2 - T_*); \quad n = \frac{\eta}{\eta_0}; \quad \varphi = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_{10} c_p}; \quad \beta = \frac{RT_*}{E};$$

$$\alpha' = \frac{\alpha_c S_c}{\rho_{10} c_p k_0 \exp(-E/RT_*)}; \quad \Lambda = \frac{\alpha_2 \lambda_2}{L^2 \rho_{10} c_p k_0 \exp(-E/RT_*)}; \quad u_0 = \frac{u_{10}}{u}.$$

Здесь θ_1, θ_2, n - неизвестные функции температуры смеси газов, пористой среды и относительной концентрации реагирующего компонента.

Особенность задачи заключается в том, насколько влияет межфазный теплообмен на воспламенение смеси газов.

В случае низкотемпературного горения, где температур воспламенения и горения мало отличаются, полагая $\theta_1 = \theta_* = 0$, из (1) имеем упрощённую систему

$$\begin{aligned} \alpha' \gamma_1 \theta_2 + n &= 0, \\ \gamma_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial \bar{t}} - \frac{\gamma_2}{u_0} \frac{\partial \theta_2}{\partial \bar{x}} &= \gamma_1 \Lambda \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial \bar{x}^2} - \alpha' \gamma_1 \theta_2, \\ \frac{\partial n}{\partial \bar{t}} + \left(1 - \frac{1}{u_0}\right) \frac{\partial n}{\partial \bar{x}} &= -n, \end{aligned} \quad (2)$$

Функция $n = \exp(-ka\bar{t} - k\bar{x})$, где $a = 1 - 1/u_0 \neq 0$, $k = 1/2a$ удовлетворяет третье уравнение системы (2). Далее, из первого уравнения (2) находим

$$\theta_2 = -\frac{1}{\alpha' \gamma_1} \exp(-ka\bar{t} - k\bar{x}). \quad (3)$$

Подставляя функцию θ_2 из (3) во второе уравнение системы (2) получим следующее соотношение

$$2\varphi \left(1 - \frac{u}{v_{10}(1-u/v_{10})}\right) - 4\alpha' + \frac{\Lambda}{(1-u/v_{10})^2} = 0. \quad (7)$$

Это соотношение при $u = 0$ используется для определения температуры иницирования химической реакции $T_* = -E/R \ln \bar{t}$, где

$$\bar{t}_r = \frac{\varphi \rho_{10} c_p v_{10}^2}{k_0 \alpha_2 \lambda_2} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4\alpha_c S_c \alpha_2 \lambda_2}{(\varphi \rho_{10} c_p v_{10})^2}} \right).$$

Для случая $a = 1 - 1/u_0 = 0$, то есть $u_0 = 1$, что означает равенство скоростей вдува смеси и распространения волны горения, принимаем следующее решение системы (1)

$$n = \exp(-\bar{t} - \bar{x}), \quad \theta_2 = -\frac{1}{\alpha' \gamma_1} \exp(-\bar{t} - \bar{x}), \quad \alpha' = \Lambda. \quad (8)$$

Из последнего соотношения (8) находим

$$T_* = -\frac{E}{R \ln \left(\sqrt{\alpha_c S_c v_{10}^2 / \alpha_2 \lambda_2} / k_0 \right)}.$$

Заметим, что в полученных формулах определения температуры иницирования химической реакции входят коэффициент межфазного теплового потока и удельная поверхность частиц пористой среды, что дают возможность исследовать их влияние.

- [1] Лаевский Ю.М., Бабкин В.С. Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. – Новосибирск: Наука, 1988, с.108–145.
 [2] Кабилов М.М., Халимов И.Х. – Доклады АН РТ, 2013, т.56, №5, с.376-380.

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОГО ДАВЛЕНИЯ СМЕСИ НА ПАРАМЕТРЫ ВОЛНЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВ

Кабилов М.М., Халимов И.И.

*Российско-Таджикский (Славянский) университет, г. Душанбе,
Таджикистан, maruf1960@mail.ru*

Влияние исходного давления смеси на основные характеристики волны горения изучалось во многих работах [1-3] и установлено, что во всех исследованных пропановоздушных смесях нормальная скорость распространения пламени уменьшается с ростом давления. В [2] отмечено, что экспериментально наблюдаемая стационарная скорость перемещения пламени в инертной пористой среде с ростом исходного давления метановоздушной смеси увеличивается и в 40 раз больше нормальной скорости.

Целью настоящей работы является математическое моделирование влияния исходного давления углеводородо-воздушной смеси при её горении в инертной пористой среде, с помощью, разработанной в [4] эквивалентной модели фильтрационного горения газов. В соответствии с [4] зависимости безразмерной температуры газа, пористой среды и доли концентрации недостающего компонента от продольной координаты и времени имеют вид

$$\theta_1 = \theta_e \pm \frac{u_0 - 1}{2\gamma_2 a \sqrt{\pi \bar{\tau}}} \cdot \exp\left(-\frac{\bar{\xi}^2}{4a^2 \bar{\tau}}\right) \left\{ 1 + \frac{1}{\alpha'} \left(\frac{\bar{\xi}^2}{4a^2 \bar{\tau}^2} - \frac{1}{2\bar{\tau}} \right) (\varphi \mp \frac{\chi_2}{a^2}) \pm \frac{\varphi \bar{\xi}}{2a^2 \bar{\tau} \alpha' u_0} \right\}$$

$$\theta_2 = \theta_e \pm \frac{u_0 - 1}{2\gamma_2 a \sqrt{\pi \bar{\tau}}} \cdot \exp\left(-\frac{\bar{\xi}^2}{4a^2 \bar{\tau}}\right), \quad \theta_e = \frac{1}{\gamma_1 (1 + \varphi / (1 - u_0))},$$

$$n = \gamma_1 (\theta_e - \theta_1) + \frac{1}{2a \sqrt{\pi \bar{\tau}}} \exp\left(-\frac{\bar{\xi}^2}{4a^2 \bar{\tau}}\right), \quad a = \sqrt{\frac{\chi_2 (u_0 - 1)}{\varphi u_0}}, \quad (1)$$

$$\theta_i = \frac{E(T_i - T_0)}{RT_e^2}, \quad i = 1, 2, \quad n = \frac{\eta}{\eta_0}, \quad \bar{\xi} = \frac{\xi}{L}, \quad \bar{\tau} = \frac{k_0 \cdot \tau}{\exp(1/\beta)},$$

$$L = \frac{\nu_{10}}{k_0 \exp(-1/\beta)}, \quad \alpha' = \frac{\alpha}{\rho_{10} c_p k_0 \exp(-1/\beta)}, \quad u_0 = \frac{\nu_{10}}{U},$$

$$\beta = \frac{RT_e}{E}, \quad \gamma_1 = \frac{c_p T_e \beta}{Q \eta_0}, \quad \gamma_2 = \gamma_1 \varphi, \quad \varphi = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_{10} c_p}, \quad \chi_2 = \frac{\alpha_2 \lambda_2}{\rho_{10} c_p k_0 \exp(-1/\beta) L^2},$$

Знаки плюс и минус в решении соответствуют субадиабатическим ($u_0 < 0$, встречный поток) и сверхадиабатическим ($u_0 > 0$, спутный поток) режимам фильтрационного горения газов соответственно. Скорость волны U для каждого набора исходных значений параметров и в каждом режиме определяется индивидуально, в зависимости от граничных условий. Например, при $\bar{\xi} = 0$, полагаем $\theta_2 = \theta_{2*}$, $\theta_1 = 0$, $n = 1$, $\bar{\tau} = \bar{\tau}_*$. Здесь τ_* - период времени, в течение которого устанавливается стационарная структура волны горения, то есть время выхода волны в стационарный режим. Значения θ_{2*} , $\bar{\tau}_*$ - неизвестные, условие $\theta_1 = 0$ означает, что смесь на границе пористой среды имеет исходную, первоначальную температуру. При этих условиях из решения (1) получаем следующую замкнутую алгебраическую систему с тремя неизвестными θ_{2*} , $\bar{\tau}_*$, U

$$\theta_e + \frac{u_0 - 1}{2\gamma_2 a \sqrt{\pi \bar{\tau}_*}} \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2\bar{\tau}_* \alpha} \cdot \left(\varphi + \frac{\chi_2}{a^2} \right) \right\} = 0,$$

$$\tau_* = \frac{1}{4a^2(1 - \gamma_1 \theta_e)^2}, \quad \theta_e = \frac{1}{\gamma_1(1 + \varphi/(1 - u_0))},$$

$$\theta_{2*} = 2\theta_e.$$

В этом случае фронт горения распространяется навстречу дуваемому потоку и равновесная температура ниже адиабатической температуры, однако максимальная температура газа на фронте выше неё. Расчёты показывают увеличение скорости волны с ростом давления исходной смеси.

В связи с приведёнными функциями температур и доли концентрации от координат и времени, а также правил определения скорости волны для вышеуказанных режимов появляется возможность исследовать расчётную зависимость скорости волны от давления исходной смеси.

1. Бабкин В.С., Вьюн А.В., Козаченко Л.С. Физика горения и взрыва. 1966. №2. С. 52-60.
2. Коржавин А.А., Бунев В.А., Абдулин Р.Х., Бабкин В.С. Физика горения и взрыва. 1982. №6. С. 20-23.
3. Бабкин В.С., Бухаров В.Н., Мольков В.В. Физика горения и взрыва. 1989. №1. С. 57-64.
4. Халимов И.И. Дис... канд. физико-матем. наук: 05.13.18. Таджикский национальный университет, Душанбе. 2021 – 127 с.

О РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Аслан Р. Касимов

Сколковский институт науки и технологий

a.kasimov@skoltech.ru

Мы рассматриваем динамику одномерной волны детонации в газовой смеси с периодически меняющимися в пространстве свойствами. Это могут быть неоднородности температуры или концентрации топлива, или неоднородности, связанные со свойствами канала, в котором распространяется волна. Хорошо известно, что одномерная детонация может распространяться со скоростью, зависящей от времени периодически или хаотически. Возникает вопрос о влиянии периодической неоднородности в горючей смеси на такую нестационарную динамику детонации. Этот вопрос исследовался ранее как в рамках модельного уравнения Бюргерса [4, 6], так и на основе уравнений Эйлера [5, 3]. В этих работах были обнаружены явления резонансного усиления колебаний скорости детонации и захвата частот. Последнее означает, что нерегулярные колебания скорости детонации при распространении в однородной среде могут быть стабилизированы в том смысле, что они становятся более регулярными, если волна бежит по периодически неоднородной среде.

Стабилизация зависит от амплитуды и длины волны неоднородности. В данной работе продолжено исследование этих явлений в рамках уравнений Эйлера для идеального газа, реагирующего согласно модели Аррениуса. Обнаружено, что процесс захвата частот приводит к возникновению языков Арнольда и захвату мод разного порядка [7]. Рассчитанные для этого процесса числа вращений в зависимости от волнового числа периодичности в исходной смеси имеют вид дьявольской лестницы подобно тому, что наблюдается на практике и в некоторых более простых динамических системах [2, 1].

С той же целью выяснения влияния внешних периодических воздействий на нестационарную детонацию мы также исследовали одномерную детонацию в канале с неоднородной шероховатостью и двумерную детонацию в канале с учетом потерь импульса и тепла. В одномерной задаче с потерями динамика взаимодействия во многом подобна той, что имеет место при распространении детонации в

неоднородной смеси. В двумерном случае возникают некоторые новые явления, связанные с особенностями ячеистой структуры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта No 22-21-00902.

- [1] Per Bak. Devil's staircase. *Physics Today*, 39(12):38–45, 1986.
- [2] M.H. Jensen, P. Bak, and T. Bohr. Complete devil's staircase, fractal dimension, and universality of mode-locking structure in the circle map. *Physica Review Letters*, 50(21):1637–1639, 1983.
- [3] A. R. Kasimov and A. Yu. Goldin. Resonance and mode locking in gaseous detonation propagation in a periodically nonuniform medium. *Shock Waves*, pages 1–9, 2021.
- [4] A. R. Kasimov and A. R. Gonchar. Analog modeling of detonation in a periodic medium. In *Proceedings of 27th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, number Paper 168, 2019.
- [5] Aslan R. Kasimov and Andrei Yu. Goldin. Reactive Euler model for detonation propagation in a nonuniform medium. In S. M. Frolov, editor, *Detonation: Latest accomplishments*. Moscow: TORUS PRESS, 2021.
- [6] Aslan R. Kasimov and Andrei R. Gonchar. Reactive Burgers model for detonation propagation in a non-uniform medium. *Proceedings of the Combustion Institute*, page S1540748920306404, October 2020. ISSN 15407489. doi: 10.1016/j.proci.2020.07.149. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1540748920306404>.
- [7] Michael Rosenblum and Arkady Pikovsky. Synchronization: From pendulum clocks to chaotic lasers and chemical oscillators. *Contemporary Physics*, 44(5):401–416, 2003. doi: 10.1080/00107510310001603129.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЕНИЯ ПЛАМЕНИ И ПЕРЕХОДА В
ДЕТОНАЦИЮ - "ВЕЧНОЗЕЛЕНАЯ" ТЕМА
АКАДЕМИКА ФОРТОВА**

Киверин А.Д.

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

На протяжении многих десятилетий одной из наиболее животрепещущих задач теории горения и взрыва является задача об ускорении пламени и переходе в детонацию. Академик Зельдович шутливо называл науку о горении "вечнозелёной" темой, таковой она оставалась и в эпоху плодотворной творческой жизни академика Фортова, и в этой области под его руководством и при его участии были получены весьма интересные и важные результаты. При этом одну из ключевых ролей в развитии этого направления сыграло взрывное развитие численного моделирования. К концу 20-ого, началу 21-ого века с совершенствованием компьютерной техники, вычислительных алгоритмов и математических моделей стало возможным аккуратное детальное моделирование нестационарных переходных режимов горения, определяющую роль в развитии которых играют как многомерные газодинамические процессы, так и многообразие кинетических механизмов. Это существенно расширило представления о задействованных физических механизмах, сформированных ранее на основе экспериментальных данных, и позволило подробным образом описать все стадии развития горения от воспламенения и формирования фронта пламени к стадии развития неустойчивости фронта, его ускорения и, как следствие, перехода к детонации. В зависимости от конкретных условий, сформированных в ходе нестационарного развития горения в ограниченном или свободном пространстве, реализуются различные сценарии перехода к детонации, и совместный экспериментальный и расчетно-теоретический анализ позволяет выявить определяющие физико-химические механизмы и определить количественные критерии перехода к детонации. Так, например, в условиях сжатия реагирующей среды сильной ударной волной, очаг детонации формируется непосредственно в области сжатия и развивается в условиях формируемого ударной волной течения [1]. Это, в том числе, является ведущим механизмом, определяющим реиницирование детонации при ее распаде в результате неустойчивости [2] и, как следствие, существование околокритических галопирующих режимов распространения детонационной волны в зарядах конечной толщины.

В условиях развития пламени в ограниченном объеме (в канале) ведущим механизмом, определяющим переход в детонацию, является сжатие непосредственно на фронте непрерывно ускоряющегося фронта пламени [3]. В свободном пространстве определяющую роль играет развитие неустойчивости расходящегося пламени, его автотурбулизация [4] и генерация волн сжатия при локальном ускорении отдельных участков фронта пламени [5].

- [1] Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Клумов Б.А., Фортов В.Е. От горения и детонации к окислам азота // УФН. 2014. 184(3). 247-264.
- [2] Иванов М.Ф., Фортов В.Е., Борисов А.А. Численное моделирование развития детонации в газовых объемах конечной толщины // ФГВ. 1981. 17(3). 108-116
- [3] Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Либерман М.А., Фортов В.Е. Механизм ускорения пламени и переход в детонацию водородно-кислородной смеси в канале // ДАН. 2010. 434(6). 756-759.
- [4] Гостинцев Ю.А., Истратов А.Г., Кидин Н.И., Фортов В.Е. Автотурбулизация газовых пламен. Теоретические трактовки // ТВТ. 1999. 37(4). 633-637.
- [5] Киверин А.Д., Яковенко И.С., Фортов В.Е. Механизм формирования детонации при свободном распространении пламени в неограниченном пространстве // ДАН. 489(5). 461-464.

О ВЛИЯНИИ ГОРЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ВЗРЫВА В ШАХТЕ

Крайнов А.Ю.^{1, @}, Моисеева К.М.¹

¹Томский государственный университет

@ akrainov@ftf.tsu.ru

Доклад посвящен расчетно-теоретическому исследованию влияния распространения пламени по газозвеси угольной пыли, поднятой со стенок выработок шахты ударной волной от аварийного взрыва метана в на интенсивность ударной волны.

При прохождении подготовительных выработок в угольных шахтах существует опасность скопления метана в подготовительной выработке (рис. 1). На стенках подготовительной выработки в процессе работ накапливается угольная пыль. При аварийном взрыве метана в подготовительной выработке распространяется ударная волна (УВ). Она поднимает со стенок отложения угольной пыли, которая прогревается от продуктов взрыва, воспламеняется, горит и вносит вклад в интенсивность распространяющейся по выработкам взрывной волны. Для оценки взрывобезопасных расстояний необходимо учитывать горение угольной пыли.

В докладе представлены результаты моделирования распространения ударной волны в описанных выше условиях. Для моделирования использована математическая модель и методика численного решения, изложенная в [1].

Задача учитывает наличие водяных заслонов в выработках. В решении проанализированы варианты, когда установленные в подготовительной выработке водяные заслоны сработали или не сработали.

Установлено, что при распространении фронта горения по газозвеси угольной пыли после взрыва метана за ударной волной поддерживается повышенное давление. В связи с этим ударная волна, распространяющаяся по выработкам, имеет интенсивность чуть большую, чем в случае, когда угольная пыль не горит (рис.2). Водяные заслоны обеспечивают существенное снижение интенсивности ударной волны.

Предложенный подход может быть полезен для практического применения при анализе влияния горения угольной пыли на интенсивность ударной волны в угольных шахтах при аварийных взрывах метана.

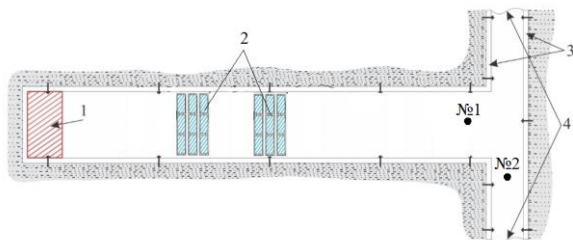


Рис. 1. Схема расположения подготовительной протяженностью 2000 м и сквозной выработок. 1 - зона взрыва метана, 2 – водяные (сланцевые) заслоны, 3 - борта выработки, 4 – действующая сквозная выработка, 1, 2 – контрольные точки

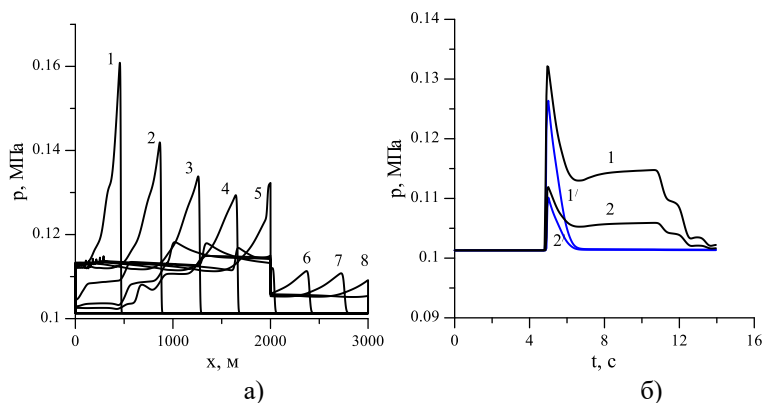


Рис. 2. (а) - Распределения давления по длине подготовительной и ветви сквозной выработок в фиксированные моменты времени с интервалом 1 с при горении угольной пыли. (б) - Изменение давления во времени в контрольных точках. 1, 1' – контрольная точка № 1, 2, 2' – контрольная точка № 2. Линии 1', 2' – угольной пыли нет, линии 1, 2 – угольная пыль горит.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 21-71-10034.

[1] Васенин И.М. и др, 2006, Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем.

О ВЛИЯНИИ ГАРМОНИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Крайнов А.Ю.^{1,*}, Порязов В.А.¹

¹Томский государственный университет

@ akrainov@ftf.tsu.ru

Доклад посвящен расчетно-теоретическому исследованию влияния гармонического колебания давления на скорость горения металлизированного смесового твердого топлива (МСТТ).

Расчет скорости горения проводился на основе нестационарной модели горения МСТТ в сопряженной постановке [1].

Расчеты проводились при давлении 5 МПа. Закон изменения давления имел вид $P=P_0+\Delta P\sin(\omega t)$. Результаты расчетов скорости горения представлены на Рис. 1а. В расчетах учитывался порядок химической реакции в газовой фазе. Расчеты проводились для смесового твердого топлива без добавления металлического горючего.

На рис.1б, для наглядности, представлены результаты в безразмерных переменных $P_{отн}=P(t)/P_0$, $u_b=u(t)/u(P_0)$.

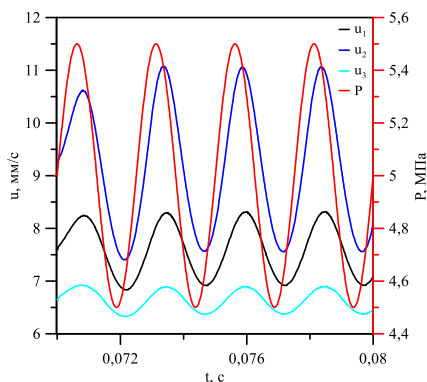


Рис. 1а

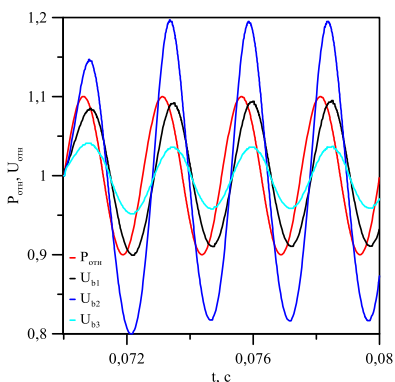


Рис. 1б

Рис.1. Зависимость скорости горения и давления от времени.

u_1 – порядок химической реакции в газовой фазе 1; u_2 – порядок химической реакции в газовой фазе 1.4; u_3 – порядок химической реакции в газовой фазе 0.6. Частота колебаний давления 400 Гц.

Видно, что порядок химической реакции существенно влияет как на абсолютную величину скорости, так и на амплитуду ее изменения.

Изучено влияние частоты колебаний давления на амплитуду изменения скорости давления. Расчеты проводились для смесевых твердых топлив с добавками металлического горючего. В расчетах использовался порошок алюминия различной дисперсности. Результаты расчетов представлены на рис.2. Показано, что добавки мелкодисперсного порошка алюминия стабилизируют переходный процесс при гармоническом изменении давления. На рис. 3 представлена зависимость максимальной величины скорости горения от частоты изменения давления для разного порядка химической реакции в газе (0.6, 1.0, 1.4 соответственно).

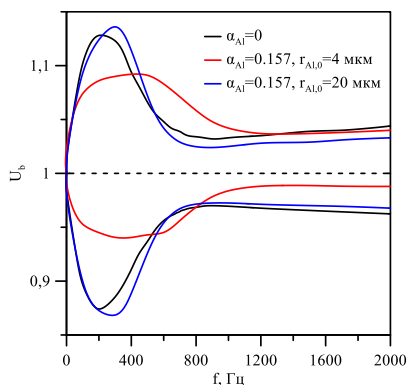


Рис. 2. Зависимость максимальной величины скорости горения от частоты изменения давления.

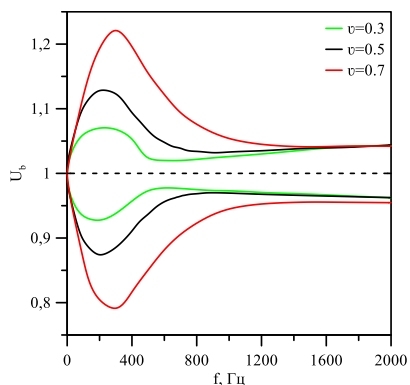


Рис. 3. Зависимость максимальной величины скорости горения от частоты изменения давления.

Предложенный подход может быть полезен при анализе акустической проводимости новых видов смесевых твердых топлив с добавлением металлического горючего.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSWM-2020-0036).

[1] Yu. Krainov, A., Poryazov, V. A., & Krainov, D. A. (2022). Mathematical modelling on extinction of metallized composite solid propellant under a sudden drop in pressure. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 47(1) doi:10.1002/prop.202100123.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С НЕПРЕРЫВНОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ

Е.В. Михальченко^{1,@}, В. Ф. Никитин¹

¹Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва

@MikhalchenkoLena@yandex.ru

Вопрос о реализации двигателя с рабочим циклом, основанном на сгорании топлива в постоянном объёме, возник еще в 20 веке, но из-за проблем реализации, а также из-за бурного развития и совершенствования двигателей с циклом, основанном на сжигании топлив при постоянном давлении, данный вопрос был отложен на долгие годы. Однако, с появлением новых типов материалов и топлив интерес к таким двигателям был восстановлен и в последние годы количество работ по данной тематике только растёт [1-2].

В работе представлены результаты численного моделирования процессов в камере сгорания детонационного двигателя. Проведено трехмерное численное моделирование камеры сгорания двигателя с вращающейся детонационной волной цилиндрического типа с внутренним корпусом. В основу математической модели были положены многокомпонентная газодинамическая модель с учетом химических превращений и турбулентная модель RANS. Для описания горения ацетилен использовали короткую кинетическую схему, включающую в реакцию следующие компоненты: C_2H_2 , CO, CO_2 , H_2 , O_2 , H_2O , OH, O, H, N_2 . Проведено сравнение с расширенными кинетическими механизмами. Расчеты проводились с использованием геометрии прототипа предложенного в работах [3-4]. Проведено сравнение с экспериментальными данными.

Работа выполнена за счет гранта в форме субсидии Министерства образования и науки Российской Федерации на выполнение проекта по теме: «Исследование и разработка детонационных камер сгорания для использования в перспективных аэрокосмических силовых установках» (Соглашение №075-15-2021-1385).

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

[2] Anand V., Gutmark E., 2019. Progress in Energy and Combustion Science 73, 182 – 234.

[3] Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., 2010. Физика горения и взрыва 46, 3:116 – 124.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ И СГОРАНИЯ ГАЗОВЗВЕСИ ПОРОШКА БОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХ ПОДХОДОВ К КИНЕТИКЕ ГОРЕНИЯ

Моисеева К.М.^{1,@}, Крайнов А.Ю.¹

¹*Томский государственный университет*

@ Moiseeva_KM@t-sk.ru

Доклад посвящен исследованию закономерностей горения газовзвеси порошка бора. Горение частиц бора классически описывается моделью Кинга [1] и PSU-моделью [2]. Основным тезисом моделей является разделение процессов низкотемпературного и высокотемпературного окисления частиц бора.

При близости общих допущений есть некоторые различия в формулировке модели горения частицы бора. Модель [1] построена в допущения реакции бора с кислородом. Модель [2] с последующими модификациями других авторов (в частности, [3, 4]) учитывает окисление частиц бора не только в реакции с кислородом, но и с газообразными парами воды, фтора, фтороводорода. Кроме того, модификации модели [2] содержат утверждения о слабом влиянии низкотемпературной стадии на общее время реакции частиц бора с окислителем.

Вопрос горения газовзвесей порошков бора стоит в повестке современных задач горения. Хотя вопрос эффективности использования бора в составе смесевых твердых топлив вызывает сомнения [5], исследование закономерностей горения порошков бора актуально для понимания дальнейших перспектив работы с топливами на основе бора.

В работах [6, 7] были проведены исследования вопросов горения частиц бора в газовзвеси и в составе смесевых твердых топлив. В качестве модели горения частиц бора была выбрана модель [1]. Исследования показали два возможных сценария горения частиц бора. В составе газовзвеси частицы бора горели, в зависимости от размера, в режиме последовательных процессов низкотемпературного и высокотемпературного окисления или практически сразу в режиме высокотемпературного окисления. За время воспламенения и горения частицы бора накапливали оксидную пленку, реагировали через оксидную пленку, а также в режиме гетерогенного горения после исчезновения оксида бора с поверхности частицы. В составе смесевых твердых топлив частицы бора после выхода с поверхности твердого топлива реагировали только в режиме накопления оксидной пленки, с

частичным испарением оксида. Режимов гетерогенного горения на поверхности оголившихся частиц не наблюдалось.

Рядом исследователей утверждается, что модель Кинга является приближенной моделью, и модификации, внесенные в [2] позволяют более точно описывать процессы горения газозвеси порошка бора. С целью исследования было проведено численное моделирование воспламенения и горения частиц бора с использованием модели [2]. Были взяты механизмы реагирования, а также физико-химические параметры [2] и проведено исследование режимов горения частиц бора. В качестве допущения полагалось, что процесс является нестационарным, не учитывалось изменение параметров по пространству. Задача описывалась системой дифференциальных уравнений первого порядка и решалась с использованием разностной схемы Рунге-Кутты-Мерсона.

Из численного исследования было определено, что модель [2], несмотря на наличие в описании двух механизмов окисления низкотемпературного и высокотемпературного, работает преимущественно для механизма горения в гетерогенном режиме. Стадия образования оксидной пленки практически отсутствует. Стадия разложения оксида (испарения оксидной пленки) протекает во много раз быстрее, чем в модели [1]. В то же время по данным экспериментов, выполненных в Институте химической кинетики и горения, а также по данным [5] в режиме горения топлив при высоких давлениях наблюдается недогорание частиц бора и выход в продуктах реакций оксидов порошка бора. В связи с этим требуется более подробно исследовать горение газозвесей частиц бора с использованием [2] для дальнейшего вывода о применимости данной модели к вопросам горения частиц бора в составе топлив.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента СП-134.2022.1.

- [1] King M. K., 1974, *Combust. Sci. Technol.* 8 (5-6). 255–273.
- [2] Yeh C. L., Kuo K. K., 1996, *PECS.* 22 (6). 511-541.
- [3] Hussmann B., Pfitzner M., 2010, *Combust Flame.* 157. 803–821.
- [4] Hussmann B., Pfitzner M., 2010, *Combust Flame.* 157. 822–833.
- [5] Яновский Л.С., и др., 2020, *ФГВ.* 56 (1). 71-82.
- [6] Крайнов А.Ю., и др., 2021, *ИФЖ.* 94 (2). 360-371.
- [7] Порязов В.А., и др., 2022, *ФГВ.* 58 (2). 78-87.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ УГЛЕ- МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С УЧЕТОМ ПОДЪЕМА ПЫЛИ

Моисеева К.М.^{1,@}, Крайнов А.Ю.¹
¹*Томский государственный университет*
[@]Moiseeva_KM@t-sk.ru

Исследование процессов распространения пламени в угле-метано-воздушной смеси – одна из актуальных задач физики горения и взрыва. Газовзвесь угольной пыли может быть следствием внезапных выбросов метана и подъема накопившейся угольной пыли в угольных забоях.

Представляет интерес выполнить численное исследование скорости распространения пламени угле-метано-воздушной смеси в закрытом цилиндрическом канале с учетом подъема угольной пыли от стенок канала.

Постановка задачи основывается на подходах механики двухфазных реагирующих сред [1] и физико-математической модели [2]. В цилиндрическом канале протяженностью L и радиусом R равномерно распределена газовзвесь угольной пыли с начальной массовой концентрацией витающей пыли m_{p1} , объемной долей метана a_{vol} . На стенках канала равномерно распределена взвесь угольной пыли с массовой концентрацией m_{p2} . Массовые концентрации угольной пыли задаются таким образом, чтобы после полного подъема угольной пыли со стенок канала суммарная концентрация пыли составила $m_{dust} = m_{p1} + m_{p2}$. Прочие допущения физико-математической модели соответствуют [2]. Задача решается в двухмерной осесимметричной постановке. Расчеты выполнены с использованием метода Ван Леера [3] для определения потоков на гранях расчетных ячеек. Шаг по времени определялся из условия Куранта-Фридрихса-Леви для случая двухмерной постановки задачи.

На рис.1 представлены распределения полей температуры газа при горении угле-метано-воздушной смеси в закрытом с правого торца канале. Для расчета выбран случай $m_{p1}=10^{-4} \text{ кг/м}^3$, $m_{dust}= 0.1 \text{ кг/м}^3$. Начальная объемная доля метана в смеси – 7%. Под действием подъемной силы F_p пыль отрывается от стенок канала и вовлекается в поток движущегося газа. Отрыв пыли от стенок канала задается по выражениям [4]. Скорость отрыва пыли от стенок канала определяется миделевым сечением частиц пыли, толщиной слоя залегания пыли. Последующее движение угольной пыли определяется величиной

продольной и поперечной компонент скорости газа. Из расчета получено, что средняя скорость распространения пламени для случая, представленного на рис.1, выше средней скорости пламени смеси в случае $m_{dust} = m_{pl} = 0.1 \text{ кг/м}^3$ (в отсутствии накопления частиц на стенках и начальной запыленности смеси 0.1 кг/м^3). Это связано с тем, что в приведенном случае пламя распространяется в основном по газу.

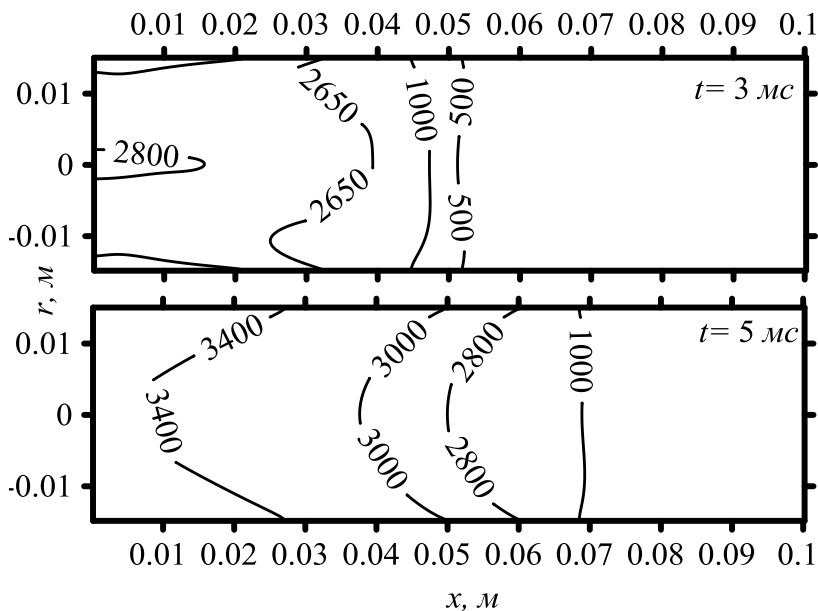


Рис.1 – Распределение температуры газа в фиксированные моменты времени.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, код проекта 21-71-10034 .

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

[2] Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., 2020, Искровое зажигание горючих газов и газозвесей: монография.

[3] Van Leer B., 1979, J. Comput. Phys., 32 (1). 101–136.

[4] Соболев А. А., Мельников П. А., Тютюнник А. О., 2011, Вектор науки ТГУ. 3(17). 82 – 86.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАНА ПРИ НЕДОСТАТКЕ ВОЗДУХА НА ПОРИСТОЙ МАТРИЦЕ

Размыслов А.В.[@], Султанов В.Г.

Институт проблем химической физики РАН

[@] sanaraz@mail.ru

Доклад посвящен математическому моделированию неполного окисления метана в потоках предварительно перемешанных воздушно-метановых смесей с низкими коэффициентами избытка окислителя (0,1 — 0,3) в канале с установленной пористой металлической матрицей. Этот процесс может использоваться для получения синтез-газа.

При моделировании течение в канале описывается уравнениями сохранения массы, импульса и энергии, уравнениями баланса отдельных компонентов смеси. Для описания горения метана используется глобальная кинетическая схема [1], течение смеси через матрицу описывается законом Дарси. Тепловое состояние матрицы описывается уравнением теплопроводности, обмен тепла между матрицей и потоком газа учитывается с помощью закона Ньютона с применением соответствующей оценки для коэффициента теплоотдачи [2]. Учитываются потери тепла через стальную стенку реактора.

В докладе приведены результаты расчета теплового состояния в канале реактора и оценки предела воспламенения по коэффициенту избытка окислителя.

[1] Басевич В.Я., Беляев А.А., Фролов С.М. 1998, Химическая физика. Т. **10**. № **9**. 112-128

[2] Ergun S. A.A., 1952, Chem. Eng. Prog. **48**. 89-94

ОБРАЗОВАНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ СМЕСЕВЫХ ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ

Рашковский С.А.

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва,
Россия*

rash@ipmnet.ru

Для повышения энергетических характеристик смесевых твердых ракетных топлив (СТРТ) в их состав вводят порошкообразные горючие. Наиболее распространенным в настоящее время металлическим компонентом СТРТ является алюминий. Его содержание в твердых ракетных топливах обычно не превышает 20-22% по массе; в пиротехнических составах содержание металла может достигать 50% и более. Размеры частиц алюминия в современных СТРТ лежат в пределах 5...50 мкм. Применительно к ракетно-прямоточным двигателям (РПД) активно разрабатываются смесевые составы на основе бора или боридов алюминия и магния, частицы которых имеют размеры 1-10 мкм, а их содержание в топливе может достигать 40%.

Применение порошкообразных горючих в СТРТ позволяет существенно повысить удельный импульс и плотность топлива, а также способствует подавлению акустической неустойчивости в ракетных двигателях, делая процесс горения СТРТ более стабильным.

При горении таких СТРТ образуется большое количество конденсированных продуктов сгорания (КПС). Содержание КПС может достигать 70%. Течение двухфазной смеси в сопловом тракте РДТТ и в камере дожигания РПД приводит к дополнительным (двухфазным) потерям удельного импульса, которые увеличиваются с ростом среднего диаметра частиц к-фазы и уменьшением диаметра минимального сечения сопла, и могут достигать (5-8)%. Инерционное выпадение частиц к-фазы на стенки камеры сгорания может приводить к прогару корпуса ракетного двигателя и потере его работоспособности. Особенности воспламенения и горения бора могут приводить к неполному сгоранию топлива в рабочем тракте РПД, что снижает эффективность двигателя. Так, в зависимости от организации рабочего процесса в камере дожигания РПД полнота сгорания топлива может изменяться в пределах 0.6...0.97.

Эксперименты показывают, что частицы КПС, образующиеся при горении таких составов, имеют размеры в десятки и сотни раз превышающие размеры исходных частиц порошкообразного горючего в топливе, что и приводит к указанным выше явлениям. Увеличение размеров частиц КПС является результатом агломерации и конгломерации исходных частиц на поверхности горения и образования больших капель – агломератов или больших кластеров (конгломератов), состоящих из спекшихся частиц.

В данной работе обсуждаются имеющиеся данные по агломерации микронных частиц алюминия и конгломерации частиц бора и наноразмерных частиц алюминия. Обсуждаются механизмы этих процессов и их математические модели. Рассматриваются методы моделирования агломерации частиц алюминия и конгломерации частиц бора и наноразмерных частиц алюминия при горении СТРТ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00541.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ В ПРОТИВОТОЧНОМ РЕАКТОРЕ ВЫТЕСНЕНИЯ

Самойленко Н.Г.^{1,@}, Шатунова Е.Н.¹,
Шкадинский К.Г.¹, Корсунский Б.Л.^{1,2}

¹*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка,
Россия*

²*Федеральный исследовательский центр химической физики им.
Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия*
^{@sam@icp.ac.ru}

Численно проанализированы особенности динамики выхода противоточного реактора вытеснения на стационарный режим работы. Противоточный реактор представляет собой вертикально стоящую цилиндрическую область, в которую сверху подается дисперсионная среда. Дисперсионная среда представляет собой раствор двух веществ A и F . Снизу в виде сферических пузырьков подается с постоянной скоростью дисперсная фаза, содержащая вещество B . Дисперсионная среда вещество B экстрагирует, где оно вступает в реакцию с веществом A . Продукт этого взаимодействия (вещество C) затем вступает в реакцию с веществом F . Обе реакции второго порядка и экзотермические.

Система дифференциальных уравнений с начальными и граничными условиями решалась численно. В зависимости от знака скорости аппроксимация конвективной составляющей осуществлялась с помощью правой или левой трёхточечной схемы. Полученные разностные уравнения решались методом прогонки.

В математическую модель введен параметр, характеризующий независимость частиц дисперсной фазы друг от друга. Показано, что при малых значениях этого параметра выход противоточного реактора вытеснения на стационарный режим происходит через максимальные разогревы дисперсионной среды. Также исследована зависимость тепловых режимов и динамики выхода реактора на установившийся (стационарный или периодический) режим работы от теплообмена с окружающей средой и концентрации исходных веществ. Для двухстадийной последовательной реакции найдено, что в реакторе, в зависимости от управляющих параметров, стационарное состояние может реализоваться в двух режимах: высокотемпературном и низкотемпературном. При этом переход в стационарный режим происходит через высокотемпературное состояние.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОГО ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ С УЧЁТОМ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ МЕЖДУ ФАЗАМИ

Скрылева Е.И.^{1,2,@}, Никитин В.Ф.^{1,2}, Макеева М.Н.^{1,2}, Манахова А.Н.¹

¹*Механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова*

²*ФГУ «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований РАН»*

@ jennyne@yandex.ru

В условиях «нефтегазовой» экономики ключевая стратегическая проблема — это разработка отечественных технологий разведки и добычи нефти и газа, обеспечивающих минимально возможную стоимость единицы продукции. В процессе разработки различных стратегий повышения коэффициента извлечения нефти важную роль может играть предсказательное моделирование подземной гидродинамики с учетом внешних активных воздействий на пласт: механических, термических, химических и комбинированных. Одними из самых перспективных методов увеличения нефтедобычи являются термохимические: внутрислоевого горения, термогазовый метод, кислотная обработка призабойной зоны. Их суть заключается в том, что в пласт закачивается агент, вступающий в реакцию с находящейся там нефтью или пористым скелетом. В результате экзотермической химической реакции снижается вязкость нефти, что положительно влияет на динамику её вытеснения.

Задача вытеснения углеводородов осложняется тем, что в практических случаях ее приходится решать на значительном пространственном масштабе. В то же время из-за использования менее вязкой воды для вытеснения более вязкой смеси углеводородов (пластовой нефти) этот процесс является неустойчивым: фронт вытеснения, даже если он был вначале прямым, искажается за счет пальцеобразных выступов, по которым менее вязкая вода прорывается к добывающей скважине, оставляя позади себя не вытесненную нефть. Ещё одна сложность заключается в том, что такая неустойчивость многомасштабна, и дело ее моделирования осложняется тем, что наиболее быстро растут мелкомасштабные пальцы. Основная проблема прямого моделирования неустойчивости в том, что разрешение мелкомасштабных потоков на практической сетке нереально даже с использованием современной вычислительной техники. Поэтому крайне актуальна разработка алгоритмов для многомасштабного моделирования нелинейных процессов подземной гидродинамики. Стоит отметить, что в случае,

когда между вытесняющей и вытесняемой фазами происходят химические реакции, при моделировании особенно важно учитывать неустойчивость вытеснения, так как в результате неустойчивости фронта вытеснения происходит увеличение площади контактной поверхности между реагирующими веществами.

В данной работе предлагаются математические модели для описания процесса вытеснения нефти с учётом термохимических взаимодействий между фазами. Предлагается метод учёта подсеточной неустойчивости. Приводятся результаты численного моделирования, основанного на предложенных математических моделях.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 22-21-00236).

ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ В МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СРЕДАХ

Н.Н. Смирнов^{1,2,@}

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

²*Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, г. Москва*
@ mech.math.msu@inbox.ru

Дается обзор нестационарных переходных режимов распространения самоподдерживающихся экзотермических волн в метастабильных средах различных типов. А именно, рассматривается переход от одного самоподдерживающегося режима к другому. К таким процессам относится переход волн дефлаграции в волны детонации в гомогенных и гетерогенных горючих смесях. Под режимами дефлаграции и детонации в широком смысле будем подразумевать распространение самоподдерживающихся экзотермических волн в среде, когда различие механизмов распространения приводит к существенным различиям структуры волн, дозвуковой и сверхзвуковой скоростям их распространения.

Разработанная математическая модель перехода горения в детонацию в гомогенных и гетерогенных смесях, позволили изучить все характерные стадии процесса: зажигание, ускоряющееся турбулентное горение, образование горячих точек перед фронтом пламени, возникновение детонационных и ретонационных волн, пересжатые режимы и выход на самоподдерживающуюся детонацию. Обсуждается эффективность различных режимов при их реализации в камере сгорания.

Математическая модель основана на системе уравнений трехмерной нестационарной многокомпонентной газовой динамики с химическими реакциями, с учетом эффектов переноса и турбулентности. Использована модель турбулентности k - ω [1]. Граничные условия на стенах соответствуют условию непротекания. Для вязкого турбулентного течения используется дополнительное граничное условие, определяющее напряжение сдвига на стенке по данным модели турбулентности [2, 3].

Показано, что возникновение детонации за счет фокусировки сильной ударной волны происходит в режиме пересжатой детонации. Затем детонационная волна замедляется до самоподдерживающегося режима.

Переходный режим имеет следующие характерные этапы. Сначала за ударной волной появляется горячая точка, которая впоследствии быстро увеличивается во всех направлениях, тем не менее отставая от ударной волны. Таким образом формируется волна горения. Во-вторых, зона горения увеличивается и фронт волны становится неустойчивым. Морщины образуются на переднем фронте, что особенно заметно в плоскости, ортогональной клину. В-третьих, скорость волны горения резко возрастает, особенно в сморщенной зоне, морщины становятся глубже, образуются карманы несгоревшей смеси, окруженные горячими продуктами реакции. Далее в одном из карманов вблизи оси или вблизи стенки возникает “взрыв во взрыве”, что ведет к формированию детонационной волны. Детонационная волна начинает отражаться от боковых стенок цилиндра и далее распространяться в виде детонационных и ретонационных волн во всех направлениях.

В полидисперсных смесях переход горения в детонацию (преддетонационное расстояние и время) существенно зависит от функции распределения диспергированной фазы по размерам: доминирование мелкой фракции сокращает преддетонационное расстояние, доминирование крупной фракции увеличивает преддетонационное расстояние, доминирование среднего размера капель, равномерное распределение капель по размерам и модельная монодисперсная смесь дают примерно одинаковые промежуточные значения величины преддетонационного расстояния. Различные виды неоднородности пространственного распределения конденсированной фазы при одинаковой функции распределения частиц по размерам приводят к возрастанию преддетонационного времени по сравнению с о случаем равномерного распределения средней плотности взвеси для той же функции распределения частиц по размерам.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 20-03-00297.

[1] D.C. Wilcox. Turbulence modeling for CFD. DCW Industries, Inc. 1994.

[2] N.N. Smirnov, V.F. Nikitin. Modeling and simulation of hydrogen combustion in engines // International Journal of Hydrogen Energy. 2014. Vol. 39, Iss.2. P. 1122-1136.

[3] N.N. Smirnov, O.G. Penyazkov, K.L. Sevrouk, V.F. Nikitin, L.I. Stamov, V.V. Tyurenkova, Onset of detonation in hydrogen-air mixtures due to shock wave reflection inside a combustion chamber, Acta Astronautica. 149 (2018) 77–92.

САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ ВОДОРОДА ПРИ ЕГО ИСТЕЧЕНИИ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ В ОКИСЛИТЕЛЬ

Смыгалина А.Е.^{1, @}, Киверин А.Д.¹

¹*Объединенный институт высоких температур РАН*

@ smygalina-anna@yandex.ru

При истечении водорода под высоким давлением в среду окислителя возможно его самовоспламенение. Такой процесс был впервые описан в работе [1] и назван «диффузионное воспламенение»: по мере распространения струи водорода и диффузии водорода в разогретый ударной волной окислитель возникают условия для воспламенения. Этот процесс впоследствии привлек внимание многих исследователей в виду актуальности вопроса в контексте решения задач обеспечения взрывобезопасности при работе с водородом. Современные исследования в этой области посвящены влиянию различных параметров на динамику и результат струйного истечения водорода, что должно позволить с хорошей степенью точности определять критические условия воспламенения. Настоящая работа посвящена изучению особенностей воспламенения водорода при его истечении в окислительную атмосферу различного состава и при истечении в ограниченный объем.

Для определения влияния состава атмосферы на воспламенение водорода в настоящей работе методами численного моделирования рассматривается задача об истечении водорода в трубу в постановке [2, 3]. Показано, что при разбавлении кислорода $H_2O / He / CO_2 / N_2$ существуют определенные концентрационные пределы, выше которых самовоспламенение отсутствует. Порядок, в котором указаны добавки, соответствует снижению их ингибирующего эффекта. При добавлении Ag к кислороду выделяется обратная тенденция: по мере увеличения добавки аргона к кислороду время воспламенения уменьшается, и воспламенение оказывается возможным даже при существенно высоком содержании аргона в смеси с кислородом: до 99,5% по объему.

Влияние геометрии объема, в который истекает водород, на воспламенение исследовано на примере ограничения пространства плоской преградой, расположенной поперек направления истечения водорода. Получено, что возможны следующие сценарии истечения: с воспламенением водорода до подхода струи к стенке, с воспламенением после удара струи о стенку, а также без воспламенения. Такие варианты истечения получены при

варьировании начального давления водорода (от 40 до 400 атм), расстояния от сечения истечения до преграды (от 0,2 до 5,0 см), при рассмотрении истечения из отверстия (цилиндрическая геометрия) либо щели (плоская геометрия), при различном радиусе / полуширине отверстия (1, 2 и 4 мм), а также при истечении из трубки либо объема. В результате исследования получен следующий основной вывод: при повышении начального давления водорода либо его расхода, определяемого геометрией сосуда, размером отверстия, через которое водород истекает, при уменьшении расстояния от диафрагмы до препятствия все более вероятным оказывается вариант истечения с воспламенением водорода: до подхода струи к стенке либо после взаимодействия с ней.

Полученные результаты могут представлять интерес для разработки систем водородной энергетики, обеспечивающих безопасность использования водорода либо, напротив, его воспламенение при определенных условиях.

[1] Wolanski P., Wojcicki S., 1973, Proc. Combust. Inst. **14**. 1217-23

[2] Ivanov M.F., Kiverin A.D., Smygalina A.E., Golub V.V., Golovastov S.V., 2017, Int. J. Hydrogen Energy **42**. 11902-10

[3] Golovastov S., Vocharnikov V., 2012, Int. J. Hydrogen Energy **37**. 10956-62

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ ФОКУСИРОВКЕ УДАРНЫХ ВОЛН

Стамов Л.И.^{1,@}, Смирнов Н.Н.¹, Никитин В.Ф.¹,
Пенязьков О.Г.², Севрук К.Л.²

¹*Федеральное государственное учреждение "Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук", г. Москва, Россия*

²*Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь*

@ lyubenstamov@mail.ru

Исследование процессов горения и детонации очень важно в рамках решения задач пожаро- и взрывобезопасности. Одним из важных аспектов этих процессов является инициирование детонации.

В данной работе проведено трехмерное вычислительное моделирование фокусировки ударных волн в клиновидной полости, заполненной стехиометрической водородно-воздушной газовой смесью. Получены различные сценарии развития процессов в зависимости от интенсивности падающей ударной волны: отражение ударной волны без воспламенения смеси, формирование детонационной волны, отражение ударной волны с образованием отстающей от нее зоны горения и переходный режим с последовательным переходом от дефлаграции к детонации на фронте зоны горения. Подтверждено определяющее влияние турбулентности на формирование переходных процессов. Проведено сравнение с экспериментальными исследованиями, проведенными в ударной трубе. В диапазоне параметров переходных режимов при учете турбулентности результат качественно отличается от результата модели без ее учета и дает правильную картину при сравнении с экспериментальными данными. Получено хорошее соответствие между результатами численного моделирования и данными физического эксперимента при использовании модели с учетом турбулентности.

Для моделирования горения водорода использован модернизированный кинетический механизм Мааса-Поупа. В данный механизм внесены изменения для лучшего соответствия между экспериментальными данными и результатами численного моделирования по задержкам воспламенения для высоких давлений. Вычислительная модель основана на уравнениях типа Навье–Стокса для гомогенной многокомпонентной химически реагирующей газовой смеси. Моделирование турбулентности осуществлялось с использованием k - ω модели турбулентности Вилкокса. Для решения исходной системы газодинамических уравнений использовались явные методы конечного объема второго порядка точности по пространству и времени. Решения жесткой системы уравнений химической кинетики осуществлялось с использованием неявного четырех стадийного метода типа Розенброка с однократным вычислением Якобиана. Исходный код написан на языке программирования C. Расчеты производились с использованием кубической сетки, соединенной в произвольной топологии. Параллельное выполнение реализовано с использованием технологии OpenMP.

Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН на выполнение государственного задания № 1021061509701-5-1.2.1 «Разработка алгоритмической компоновки и программ для расчета многомасштабных процессов и горения» (FNEF-2022-0021).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ЗАПИРАНИЯ КАНАЛА ПРИ ГОРЕНИИ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ¹

Федорова Н.Н.[@], Ванькова О.С.

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН

[@] nfed@itam.nsc.ru

Представлены результаты расчетов реагирующих течений предварительно несмешанной водородно-воздушной смеси в канале со стабилизатором пламени в форме двух симметричных уступов, выполненных для условий экспериментов [1]. В эксперименте, проведенном в высокоэнтуальпийной импульсной установке, получены различные режимы горения, в том числе режим с тепловым запираением канала. Целью настоящей работы является численное исследование процесса горения при числе Маха на входе в модельный канал $M=3.85$, статическом давлении $P_{\infty}=0.06$ МПа, температуре торможения $T_{0\infty}=1576$ К. Холодные водородные струи подавалась в сверхзвуковой поток под углом $\alpha = 90^\circ$ из 8 круглых отверстий, расположенных на стенках канала перед уступом, коэффициент избытка топлива составлял $\varphi=0.82$. Расчеты проводятся с помощью Ansys Fluent на основе решения трехмерных нестационарных осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, дополненных к- ω SST моделью турбулентности и блоком уравнений детальной химической кинетики [2].

В результате расчетов получена подробная информация о воспламенении водородно-воздушной смеси и нестационарном развитии процесса горения, которая качественно и количественно согласуется с экспериментальными данными. Показано, что в данных условиях реализуется режим горения с движением пламени от зоны воспламенения вверх по потоку по дозвуковым областям с последующим выходом волны горения в секцию инъекции. Горение происходит в толстых дозвуковых зонах, которые в местах повышенного тепловыделения смыкаются на оси канала, что приводит к формированию прямого скачка. Локальные сверхзвуковые зоны, образующиеся за прямым скачком, полностью перекрывают поперечное сечение, в результате чего канал «запирается».

[1] Гольдфельд М.А., 2020. Теплофиз. Аэромехан., **27**. 601-13.

[2] Maas U., Warnatz J., 1988. Combust. Flame, **74**. 53-69.

¹ Исследования поддержаны грантом РФФИ № 20-08-00959.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖЕНИЯ КОНГЛОМЕРАТОВ ЧАСТИЦ БОРА В УСКОРЯЮЩЕМСЯ ПОТОКЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАЧАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ

Червакова А.В.^{1,®}, Костюшин К.В.¹

¹Научно-исследовательский институт прикладной математики и
механики Томского государственного университета

® ch-nastya1997@mail.ru

Теоретический и практический интерес представляют задачи моделирования многофазной газовой динамики с учетом агломерации частиц бора при горении борсодержащих высокоэнергетических композиций. При создании эффективных вычислительных моделей особое место занимает моделирование движения конгломератов частиц бора в высокотемпературном потоке газа. Целью настоящей работы является исследование влияния начального положения конгломератов частиц бора сложной формы на характеристики их движения в ускоряющемся потоке продуктов сгорания.

Рассматривалась задача моделирования движения конгломерата в ускоряющемся газовом потоке. Газ вязкий, сжимаемый, теплопроводный. Эффекты теплообмена между газом и конгломератом, горение и разрушение конгломерата не учитывались.

Для описания нестационарного течения вязкого сжимаемого теплопроводного газа использовалась система уравнений Навье-Стокса [2], замкнутая уравнением состояния идеального газа. Для разрешения системы уравнений вязкого газа использовалась модель турбулентности SST $k-\omega$ [3]. В качестве начальных условий в расчетной области использовались параметры установившегося течения в сопле. В качестве граничного условия на входе фиксировались давление и температура, на стенках задавались условия непротекания, на поверхности конгломератов – условия прилипания. Геометрия рассматриваемых конгломератов показана на рисунке 1.

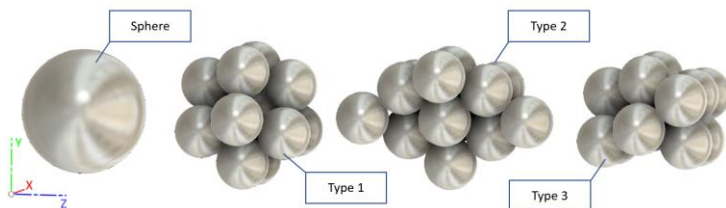


Рис. 1 – Геометрия конгломератов

Численное моделирование движения несферических частиц в ускоряющемся потоке продуктов сгорания выполнялось с использованием программного пакета ANSYS Fluent. Движение конгломерата в расчетной области реализуется при помощи специального программного кода, используемого в качестве UDF-функции.

В результате данной работы были получены траектории движения произвольных конфигураций конгломератов в ускоряющемся потоке в зависимости от их начального положения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 21-19-00541).

[1] Пирогов В.Б., Северинов Л.И., 1981, О расчете внутренних течений вязкого теплопроводного газа //ВИНИТИ. **3359-77** Деп.

[2] Menter F.R., 2003, Turbulence, heat and mass trans. **4(1)**, 625-632.

ВЛИЯНИЕ ВЗВЕШЕННЫХ МИКРОКАПЕЛЬ ВОДЫ НА УСКОРЕНИЕ ПЛАМЕНИ И ПЕРЕХОД К ДЕТОНАЦИИ В ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ НА ОСНОВЕ ВОДОРОДА

Яковенко И.С.^{1,®}, Киверин А.Д.¹

¹*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

@ yakovenko.ivan@bk.ru

Использование водорода в качестве топлива представляет собой перспективную альтернативу традиционным ископаемым топливам. В процессе горения водорода не выделяются загрязняющие углеводородные соединения, что диктует высокий интерес к изучению возможностей использования топливных смесей на основе водорода ввиду необходимости к снижению углеродного следа транспортных систем, промышленности и энергетики. Ввиду высокой химической активности водорода, при его горении могут устанавливаться разнообразные режимы, начиная от медленного горения ультрабедных составов в форме обособленных очагов пламени [1] и заканчивая высокоскоростными режимами горения около стехиометрических составов, включая детонацию [2]. Детонационное горение водорода является наиболее энергоёмким и разрушительным режимом горения и представляет большую практическую важность, с одной стороны с точки зрения пожаро- и взрывобезопасности, а с другой – для создания новых типов двигателей [3]. Реализация детонационного горения возможна в результате различных сценариев. Так, ускорение пламени в замкнутых объемах может привести к переходу от медленного горения к детонации [2]. Механизмы самопроизвольного перехода от дефлаграционного режима горения к детонационному в предварительно перемешанных смесях на основе водорода широко изучены. Однако на практике газовые смеси могут содержать включение дисперсных примесей, таких как твердые микрочастицы или микрокапли жидкости [4,5].

Известно, что присутствие микрокапель воды в газовой фазе имеет двойственное влияние. С одной стороны, при испарении во фронте пламени капли оказывают ингибирующий эффект, отбирая тепловую энергию и разбавляя смесь в зоне реакции. С другой стороны, локальное взаимодействие фронта горения с относительно крупными каплями воды может привести к деформации поверхности фронта, тем самым увеличивая его эффективную поверхность и скорость распространения [4].

В настоящее время имеются экспериментальные исследования процессов перехода от медленного горения к детонации и детонационного распространения пламени при наличии взвешенных микрокапель воды в газовой смеси [6, 7]. Однако, конкретные механизмы влияния микрокапель воды на различных стадиях нестационарного развития пламени до настоящего времени не выявлены. В настоящей работе методами детального численного моделирования исследованы особенности нестационарного ускорения пламени и перехода к детонации в каналах, заполненных газовыми смесями на основе водорода с распыленными в объеме микрокаплями воды различного размера. Определена роль микрокапель на всех стадиях процесса, начиная от инициирования горения, формирования «запертого» пламени и заканчивая непосредственно переходом к детонации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2020-806 от 29 сентября 2020 г.).

[1] Yakovenko I.S., Ivanov M.F., Kiverin A.D., Melnikova K.S. 2018, *Int. J. Hydrogen Energy*, 43(3). 1894-1901.

[2] Kiverin A.D., Yakovenko I.S. 2018, *Math. Modell. Nat. Phenom.* **13**. 54

[3] Frolov S., Aksenov V. Ivanov M. 2015, *Int. J. Hydrogen Energy*, **40**(21), 6970-6975.

[4] Yakovenko I.S., Kiverin A.D. 2021, *Int. J. Hydrogen Energy*, **46**(1). 1259-1272.

[5] Gieras M., 2008, *J. Loss Prev. Process Ind.* **21**(4). 472-477.

[6] Thomas G.O., Edwards M.J., Edwards D.H. 1990, *Comb. Sci. Technol.* 71(4-6). 233-245.

[7] Boeck L., Kink A., Oezdin D., Hasslberger J., Sattelmayer T. 2015, *Int. J. Hydrogen Energy*, **40**(21). 6995-7004.

МЕХАНИЗМЫ НЕСТАЦИОНАРНОГО УСКОРЕНИЯ ПЛАМЕНИ И ПЕРЕХОДА К ДЕТОНАЦИИ В ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ НА ОСНОВЕ АЦЕТИЛЕНА

Ярков А.В.^{1,@}, Киверин А.Д.¹, Яковенко И.С.¹, Тюрнин А.В.¹,
Кривошеев П.Н., Новицкий А.О., Пенязьков О.Г.

¹*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

²*Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,
Минск, Беларусь*

@ yarkov.andrey.v@gmail.com

Использование перспективных топлив на основе ацетилена сопряжено с рисками развития детонационного режима, влекущего за собой возникновение аварийных ситуаций. Это мотивирует дальнейшие исследования в области анализа особенностей перехода процесса горения газообразных смесей в детонацию. К настоящему времени накоплена экспериментальная база по проблеме перехода горения в детонацию в газовых смесях на основе ацетилена [1], тогда как основная масса расчетно-теоретических работ по вопросу перехода горения в детонацию в смесях на основе ацетилена проводилась с использованием упрощенных механизмов химической кинетики [2, 3].

Основной целью настоящей работы являлось получение новой информации о механизмах перехода горения в детонацию в газообразных топливно-воздушных смесях на примере ацетилен-воздушной смеси с использованием детальных физико-химических моделей развития нестационарного горения.

В работе представлен обзор и сравнительный анализ доступных кинетических механизмов, как детальных, так и редуцированных, с помощью которых может быть проведено численное моделирование нестационарного развития горения и детонации в смесях на основе ацетилена. В частности, на основе численного решения уравнений газовой динамики получены и сопоставлены с известными экспериментальными данными значения времени задержки воспламенения и нормальной скорости горения в диапазоне начальных температур, давлений и составов смеси.

С использованием механизмов, наиболее успешно прошедших предварительную проверку, проведен численный анализ особенностей распространения пламени ацетилен-кислородных смесей с различной степенью разбавления инертным газом. В частности, был проведен анализ критериев перехода горения в детонацию по методике,

описанной в работе [4]. На основе полученных расчетно-теоретических результатов по распространению пламени в газовых смесях на основе ацетилена проведена интерпретация имеющихся экспериментальных данных и выявлены основные физические механизмы, определяющие нестационарное развитие и ускорение пламени в каналах.

Результаты настоящего исследования имеют первостепенную важность для решения задач взрывобезопасности в промышленности и энергетике.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №20-58-04024) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант T21PM-103).

[1] Krivosheyev P., Penyazkov O., Sakalou A. 2020, *Combust. Flame*. **216**. 146-160

[2] Khokhlov A.M., Oran E.S., Thomas G.O. 1999, *Combust. Flame*. **117**. 323-339.

[3] Smirnov N.N. et al. 2014, *Acta Astronaut.* **104**. 134-146.

[4] Kiverin A.D., Yakovenko I.S. 2018, *Math. Modell. Nat. Phenom.* **13**. 54

ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ТРАНСПОРТА И СПЕЦХИМИИ

Бенин А.И., Коссой А.А.

ООО «Химинформ», Санкт-Петербург, Россия
office@cisp.spb.ru

Термическая безопасность объекта, для которого существует опасность теплового взрыва, заключается в исключении его развития в заданных условиях и ограничении ущерба допустимыми пределами при его возникновении. Термическая безопасность - один из видов химической безопасности - межотраслевая проблема, равноважная для химической промышленности, транспорта опасных грузов, спецтехники, технического регулирования.

В докладе представлен программно – методический комплекс TSS для исследования термических опасностей с использованием методологии математического моделирования [1,2]. TSS интегрирует современные методы экспериментальных исследований, построения кинетических моделей химических реакций, моделирования теплового взрыва для различных условий теплообмена и объектов сложной геометрии, в единую технологию и позволяет применять на практике сложные математические модели и вычислительные методы.

TSS поддерживает весь спектр работ в автоматизированной технологии исследования термических опасностей:

- 1) экспериментальное исследование кинетики экзотермических реакций с использованием различных современных калориметрических и других экспериментальных методов;
- 2) построение сложных кинетических моделей реакций на основе экспериментальных данных;
- 3) моделирование тепловых режимов объектов (реактора различных типов и геометрии, различные условия теплообмена), определение критических условий теплового взрыва, разработка внутренне безопасных процессов;
- 4) оценка термических опасностей на основе индексов опасности (TMR, SADT, показатель стабильности и других);
- 5) расчет систем аварийного сброса давления.

TSS лидирует на мировом рынке и активно используется в США, Англии, Германии, Франции, Китае, Японии и т. д.

[1] Бенин А.И. Программный комплекс «Тепловой взрыв». Научные основы и методология. Монография. ЛИТЕО : СПб, 2017 г., 672 с.

[2] Бенин А.И., Коссой А.А. Термические опасности и термическая безопасность энергонасыщенных веществ, химических процессов и объектов их применения. Методология исследования на базе системного подхода и математического моделирования. Монография. М. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2021 г., 728 с.

СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ В ДИНАМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

А.Н.Емельянов[@], М.И.Кулиш

Институт Проблем Химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия
[@]emelyanov@icfp.ac.ru g

Задачи измерения быстроменяющихся электросопротивлений возникают при исследовании электрофизических свойств веществ в физике ударных и детонационных волн [1]. Измерения электросопротивления различных веществ в ударно-волновых экспериментах в зависимости от давления и температуры позволяют регистрировать фазовые переходы и химические превращения. Продукты детонации конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) имеют высокую электропроводность [2] $\sim 1-10(\text{Ом см})^{-1}$ для большинства ВВ. Измерение высоких давлений в ударно-волновых экспериментах часто выполняется с применением резистивных манганиновых датчиков [1].

Задача измерения сопротивления не представляет сложности в стационарных условиях, но в динамическом эксперименте необходимо наносекундное разрешение и задача сильно усложняется. Кроме того, для экспериментов с высокой плотностью энергии в веществе объект измерения должен располагаться на удалении более 10 метров от лабораторных приборов, за защитой, и измерение проводится дистанционно с помощью кабельных линий, что вносит дополнительное усложнение экспериментальной методики.

В настоящей работе рассмотрены способы реализации измерения сопротивления с высоким временным разрешением. Схемы позволяют проводить измерения импульсных давлений манганиновыми датчиками и применимы в экспериментах по измерению электрических параметров сред при высоких динамических давлениях. В методиках измерения сопротивления описанных в литературе для создания импульсных токов в образце применяется накопление энергии в конденсаторе в виде заряда или в индуктивности в виде магнитного поля. Для согласования волновых сопротивлений кабельных линий конденсатор разряжается в цепь тока через балластное сопротивление из за чего начальное напряжение на конденсаторе выбиралось большим (300 В-1000 В) [3]. При возможном обрыве измерительной цепи в эксперименте ко входу осциллографа будет приложено большое напряжение, что может вывести из строя

схему регистрации. Низковольтная схема формирования больших токов (до 50 А) с применением активного генератора тока на MOSFET транзисторах в схеме с отрицательной обратной связью описана в [4]. Питание схемы напряжением 18 В. Но в статье [4] не рассмотрено влияние относительно большой выходной емкости MOSFET транзисторов, входящих в активный генератор тока, что приводит к затягиванию и искажению фронтов регистрируемого сигнала.

В настоящей работе рассмотрены два способа измерения сопротивления: двухпроводной, когда линия подводящая ток к образцу и измерительная линии объединены и четырехпроводная методика, когда есть отдельная линия подводящая ток и отдельная линия измерения падения напряжения. Духпроводная методика описанная в работе хорошо подходит для измерения сопротивления манганиновых датчиков с начальным сопротивлением ~ 1.5 Ом, так как в основном датчики с таким сопротивлением используются в лаборатории. Четырехпроводная методика более универсальна и может быть применена для измерения сопротивлений в диапазоне сопротивлений от нуля до десяти Ом. Четырехпроводная методика реализована с применением активного генератора тока на IGBT транзисторе с низкой выходной емкостью.

Для веществ с высокой электропроводности и характерных времен взрывного эксперимента электродинамические процессы имеют выраженный нестационарный характер. Разработка быстродействующих устройств для регистрации электропроводности и динамического давления является актуальной задачей.

[1] Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.:Янус-К, 1996

[2] Бриш А.А., Тарасов М.С, Цукерман В.А. 1959. ЖЭТФ. **37**. 6(12). 1543-49

[3] Якушев В.В., 1978. ФГВ. **14**. №. 2. 3-18

[4] Tasker D. G., 2017, Shock Compression of Condensed Matter: AIP Conference Proceedings. **1793**. 060028

ИНФРАКРАСНО-ОПТИЧЕСКИЕ АНАЛИЗАТОРЫ В ЭКСПРЕСС МОНИТОРИНГЕ ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРЕ ПОЖАРООПАСНЫХ СЖИЖЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ

Загнитко А.В.[@], Зарецкий Н.П., Мацуков И.Д., Алексеев В.И., Федин Д.Ю., Пименов В.В., Сальников С.Е., Вельмакин С.М., Александров А.О., Цуриков И.В., Орлов В.С.

НИИ «Курчатовский институт», Москва, пл. Курчатова, д.1.

[@]e-mail: zagnitko_av@nrcki.ru

При обеспечении промышленной безопасности объектов топливно-энергетического комплекса РФ для получения и хранения сжиженных углеводородных и природных (СПГ) газов необходима оценка последствий их возможных техногенных выбросов в виде струй и/или разливов на грунт и воду, сопровождающихся образованием топливно-воздушных смесей (ТВС) в атмосфере.

Данные по эволюции ТВС, связанные с крупномасштабными выбросами взрывопожароопасных сжиженных углеводородных газов, ограничены. Их анализ достаточно сложен, поскольку необходимо дистанционно измерять флуктуирующие концентрации капель и паров ТВС при температуре $T \geq 150$ К с быстрой за несколько миллисекунд передачей данных на сервер сбора информации. Сеть устройств для определения параметров ТВС должна иметь высокое быстродействие $\tau \approx 0.03\text{--}0.5$ с, функционировать при скорости газочапельных потоков более нескольких сотен метров в секунду и обладать устойчивостью к воздействию импульсов давления газов до 10^5 Па и электромагнитному излучению промышленной частоты.

Разработана сеть инфракрасно-оптических (ИК) анализаторов газочапельных потоков метана, легких алканов и регазифицированного СПГ с быстродействием до 0.03 с для детектирования их импульсных техногенных выбросов в атмосферу при $T = 150\text{--}320$ К. Описаны их конструкции и приведены характеристики в процессе анализа смесей воздуха с метаном, этаном, пропаном и бутаном, а также при исследовании крупномасштабных ТВС регазифицированного СПГ объемом до 10^7 м³ при его импульсных выбросах в виде затопленных струй и разливах массой до десяти тонн на грунт и воду в атмосфере. В газоанализаторах с величиной $\tau = 0.03\text{--}0.5$ с используются отечественные оптические инфракрасные сенсоры типа «Мирех», а также иммерсионные диодные оптопары «Иоффелед» с длиной волны излучения $\lambda \approx 3\text{--}3.6$ мкм.

Быстродействие многолучевых лазерных оптронов с $\lambda = 0.7$ и 3.4 мкм и количеством лазерных лучей от 1 до 12 для анализа высококонцентрированных облаков ТВС с $D \leq 3$ импульсных газокapelных потоков криогенных алканов и СПГ в атмосфере составляет от 10^{-5} до 10^{-3} с.

Показано, что при нормальных условиях время полного испарения тонкодисперсных с $d < 500$ мкм криогенных капель алканов составляет менее 1 с, а кинетика их эволюции может анализироваться созданными быстродействующими ИК анализаторами с видеокaмерами (600 кадр/с). Отметим, что многочисленные отечественные и зарубежные ИК аналоги не позволяют регистрировать столь быстрое испарение тонкодисперсных капель. Установлено, что использование классической теории Максвелла-Ленгмюра для описания диффузионного испарения криогенных и кипящих капель не корректно.

Созданные ИК анализаторы и лазерные анализаторы газокapelных потоков прошли многолетнюю экспериментальную проверку при изучении крупномасштабных импульсных выбросов СПГ в полевых условиях в процессе моделирования аварий на объектах топливно-энергетического комплекса РФ. При этом исследовано развитие облаков ТВС при крупномасштабных импульсных выбросах и разливах СПГ на грунт и воду. Его струйные выбросы массой до 10^4 кг и длиной до 50 м создавались распылением при числах Рейнольдса $Re = Vd\rho/\eta < 10^6$ с их аэродинамическим дроблением при числах Вебера $We = \rho(V-V_0)^2d/\sigma < 10^4$ и парообразованием кипящих капель с формированием облаков ТВС объемом до 10^6 м³ в атмосфере за время менее 30 с. Здесь ρ – плотность воздуха, η и V_0 его динамическая вязкость и линейная скорость, соответственно, σ – коэффициент поверхностного натяжения СПГ при 110 К, $d \approx 100\text{--}50000$ мкм – диаметр его капель и/или жидких фрагментов, $V \leq 60$ м/с – их начальная скорость.

Основные диагностические блоки ИК газоанализаторов и лазерных анализаторов капель защищены более 25-ю патентами РФ за 2019–2022 гг. а результаты опубликованы в ряде статей РАН.

Работа выполнена по теме «Разработка физико-технических основ методов измерения параметров аэрозольных и парогазовых облаков, возникающих при крупномасштабных авариях на объектах ТЭК и создание экспериментальных образцов систем диагностики аэрозольных облаков» согласно приказу № 2748 от 28.10.2021.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Рудинский А.В.^{1,®}, Ягодников Д.А.¹, Новиков А.О.¹, Бобров А.Н.¹,
Кравченко А.В.¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана

® ravman@bmstu.ru

Проведено экспериментальное исследование акустического поля высокосубзвукового потока, формируемого модельным жидкостным ракетным двигателем (ЖРД), работающем на компонентах топлива: газообразный кислород и этанол (75 % по объему). В диапазонах изменения давления в камере сгорания 0,43...0,70 МПа и коэффициента избытка окислителя $\alpha = 0,47...3,65$ получены значения коэффициента полноты сгорания топлива (рис. 1), который учитывался в модифицированном уравнении Лайтхилла [1], определяющем акустическую мощность сверхзвукового потока:

$$W = K_{\eta} K_0 \rho_a v_a^8 a_{зв}^{-5} F_a,$$

где K_{η} – коэффициент, учитывающий влияние коэффициента полноты сгорания, K_0 – постоянный коэффициент, ρ_a – плотность потока на срезе сопла, v_a – скорость истечения, $a_{зв}$ – скорость звука в окружающей среде, F_a – площадь, занимаемая потоком в выходном сечении.

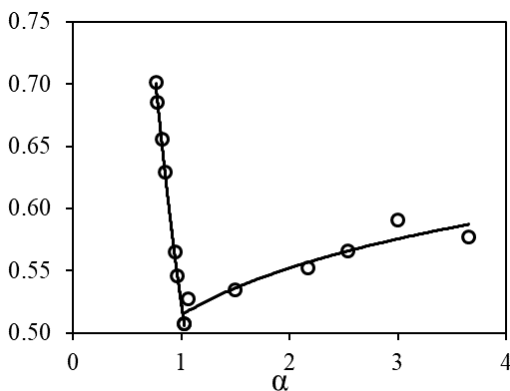


Рис. 1 – Коэффициент полноты сгорания

Амплитуда звукового давления, возникающего вследствие распространения звуковых волн от струи, измерялась шумомером Robotron RFT 00024, расположенным на расстоянии 3 м от среза сопла под углом 90° относительно оси потока. Вторичная обработка сигналов, зарегистрированных в процессе экспериментов, осуществлялась по

методике [2], основанной на стандартных алгоритмах, реализованных в программе «WinПЛОС».

В результате серии огневых испытаний модельного ЖРД и расчетных оценок скорости и плотности истечения высокотемпературного потока определена зависимость акустической мощности потока при изменении коэффициента полноты сгорания в диапазоне $\alpha = 0,47 \dots 3,65$ которая аппроксимируется функцией $W = -137,3 \ln(\alpha) + 550,97$.

Работа выполнена при поддержке Госпрограммы № 0705 2020 0044 фундаментальных исследований лаборатории «Внутрикамерные процессы ракетных и реактивных двигателей».

[1] Пятунин К.Р., Архарова Н.В., Ремизов А.Е., 2016, Акустический журнал. 62, 4. 493-502.

[2] Рудинский А.В., Ягодников Д.А., Гришин С.А., Бурков А.С., Горбунов А.Е., Бобров А.Н., Сафонова Д.Б., 2021, ТВТ. 59, 5. 737-746.

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ

Савватимский А.И.^{1,2,@}, Онуфриев С.В.², Хищенко К.В.²

¹Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

@ savvatimskiy.alexander@gmail.com

Широко известны классические эксперименты (суб-секундного времени нагрева током) Фрэнсиса Банди (США) и Мотохиро Тогая (Япония) по исследованию свойств жидкого углерода при высоких стационарных давлениях. В настоящее время для получения физических свойств жидкого углерода используется быстрый (микросекундный) нагрев импульсом электрического тока. Пионерские работы в этом направлении были выполнены под руководством С.В.Лебедева, в отделе Плазмы ОИВТ РАН. Основные результаты всех упомянутых исследований были рассмотрены в книге [1]. В частности, в эксперименте авторов подтверждена температура плавления графита (4800-4900 К) при давлениях 1-2 кбар. Была получена теплоемкость C_p жидкого углерода в этих условиях ~ 4 Дж/г·К, вплоть до 12000 К (Коробенко В.Н.).

В последние годы методики импульсного нагрева, как более перспективные, совершенствовались. Результаты итоговых исследований углерода импульсным методом нагрева приведены в [2]. Нами исследована теплоемкость C_v для жидкого углерода в условиях быстрого нагрева при ограничении расширения образца в толстостенной стеклянной оболочке, $C_v = 2$ Дж/г·К вплоть до 7500 К (оценка давления – десятки кбар). Измерено электросопротивление R жидкого углерода в условиях ограничения расширения: оказалось, что R имеет постоянное значение. Получен такой же результат, как и при нагреве жидкой ртути при ограничении расширения, - константа электросопротивления (Кикоин, Брэдли).

Обнаружено, что при высокой скорости нагрева (5000 К за 5 микросекунд) для всех исследованных материалов (металлы, карбиды и углерод) наблюдается повышенная теплоемкость в твердой фазе, за 300-400 К до начала плавления. Предполагается, что причиной является образование неравновесных дефектов в решетке твердого тела для обеспечения плавления (в отсутствие равновесных вакансий). Ожидается, что импульсный нагрев, как и ударно-волновые процессы при росте температуры, - неизбежно приводит к повышенной

теплоемкости твердого тела перед его плавлением, что следует учитывать в расчетных работах.

Ранее в работах С.В.Лебедева было показано, что аномально высокая теплоемкость сопровождается аномально высокой электронной эмиссией твердого тела перед плавлением. Это позволило сделать вывод о новом физическом эффекте: импульсный нагрев приводит к избыточной теплоемкости перед плавлением; незначительная введенная дополнительная энергия приводит не к росту температуры плавления, а к снижению энергии Ферми для электронной подсистемы. Последнее неизбежно приводит к росту электронной эмиссии с временем ее существования порядка 2 микросекунд после плавления. Поэтому причины взрывной электронной эмиссии академика Г.А.Месяца (наносекундный диапазон времени) могут быть тесно связаны с разрушением проводников на микрочастицы, обладающие повышенной электронной эмиссией. Это было отмечено в [2] при рассмотрении свойств углерода при быстром нагреве.

К сожалению, в работе [3] (быстрый нагрев током, ОИВТ РАН) были представлены ошибочные результаты для кривой плавления графита, противоречащие всем ранее полученным результатам (в том числе, результатам Банди и Тогая и нашим результатам). Например, для температуры 6400 К расчетное давление в [3] оказалось равным 3 кбар, что, по крайней мере, в 10 раз меньше ожидаемого [4]. При этом, Индикатор.ру опубликовал [5] радостную новость под заголовком: «*Впервые исследованы свойства жидкого углерода...*», ссылаясь на руководителя работ, к.ф.-м.н. Анатолия Рахеля. Последним ранее также публиковалось: при плавлении графита происходит переход металл-неметалл, что не подтверждается ни в одном другом экспериментальном исследовании.

Работа по углероду поддержана грантом РФФ № 19-79-30086

[1] Savvatimskiy A.I., 2015, Carbon at High Temperatures, 2015, Springer Series in Materials Science, V. 134, 1-246.

[2] Савватимский А.И., Онуфриев С.В., 2020, УФН, Т. 190, №10, 1085.

[3] Kondratyev A.M., Rakhel A.D., 2019, Phys. Rev. Letters 122, 175702

[4] Savvatimskiy A.I. and Onufriev S.V., 2020, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1686 012054

[5] <https://indicator.ru/chemistry-and-materials/svoystva-zhidkogo-ugleroda-14-05-2019.htm>

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОЧАГА ВОЗГОРАНИЯ В ПОМЕЩЕНИЯХ НА СТАДИИ ИНИЦИИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ГОРЕНИЯ

Стрижак П.А.^{1,@}, Кузнецов Г.В.¹, Волков Р.С.¹, Жданова А.О.¹

¹Томский политехнический университет, город Томск, Россия

@pavelspa@tpu.ru

Обнаружение очага возгорания и его идентификация на всех основных стадиях пожара является ключевой в области пожарной безопасности закрытых и изолированных от внешней среды помещений [1]. Целью настоящей работы является определение характеристик очага возгорания в помещениях на ранних стадиях горения на основе результатов экспериментальных исследований процессов нагрева типичных веществ и материалов.

Для проведения исследований применен экспериментальный комплекс, внешний вид основных элементов приведен на рис. 1.



Рисунок 1 – Внешний вид основных элементов экспериментального стенда.

Экспериментальный комплекс (рис. 1) состоял из изолированного бокса, щита автоматизации, регистрирующих устройств и систем (термопары, тепловизор, система газоанализа (GDS), датчики пламени (FD), тепловые детекторы (HD), дымовые датчики (SD)), а также ПК для сбора и записи информации. Бокс для размещения очага пожара представляет параллелепипед размерами 1.5×1×1.25 м, грани которого выполнены из стекломангезитового листа, прикрепленного к каркасу из алюминиевых балок. Смотровое окно выполнено из огнеупорного стекла толщиной 4 мм размерами 0.7×0.8 м. В нижней боковой поверхности стенда выполнен канал приточной вентиляции, с противоположной стороны в верхней части стенда – канал вытяжной

вентиляции (рис. 1). В полости стенда (рис. 1) размещены модельный очаг пожара. Сигналы с точечных детекторов (FD, HD, SD) поступают на щит автоматики.

По результатам исследований установлено влияние комбинации материалов модельного очага на характеристики срабатывания SD. На рис. 2 приведены значения времени задержки срабатывания SD для различных комбинаций горючих материалов.

Рисунок 2 – Значения времени задержки срабатывания SD для различных комбинаций горючих материалов.

Выявлено, что в случае комбинированного очага возгорания итоговая частота срабатывания SD на 15-30% выше суммы относительных частот срабатывания SD при сжигании материалов очага по отдельности. Данная особенность, определенно, должна учитываться при проектировании систем обнаружения пожаров.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 21-19-00009, <https://rscf.ru/en/project/21-19-00009/>).

[1] Araujo Lima G.P., Viana Barbosa J.D., Beal V.E., Marcelo M.A., Souza Machado B.A., Gerber J.Z., Lazarus B.S., 2021, International Journal of Disaster Risk Reduction. **61**. 102308.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ

Федоров Ю.И. [®], Крыльцова Н.Ю.

*ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский
технологический университет», г. Казань, РФ*

[®] snchar@yandex.ru

Одним из важных параметров, который оценивается при горении материалов является состав излучателей (продуктов горения). Концентрация продуктов отвечает за эффект, вызываемый при горении: высокое содержание молекулярных излучателей или атомарных, позволяет получить нужный цвет пламени; конденсированные продукты – тепловое излучение и т.д. Учитывая, что ряд соединений вовсе могут быть продуктам частичного окисления и ядовитыми веществами, знание динамики изменения компонентного соотношения в процессе горения является одной из актуальнейших задач.

На первом этапе любого исследования проводится теоретический расчет термодинамических параметров процесса реагирования (температура горения, состав продуктов, объем газообразной фазы, доля конденсированной фазы). Данные расчеты производятся с помощью программного комплекса TERMO (разработка НИИ Прикладной Химии).

Для определения состава конденсированных продуктов горения производится их сбор после окончания процесса реакции и осаждения. К-фаза может быть отобрана в различных областях пламени при установке специальных сеток на разной высоте. Концентрация с соотношением конденсированных продуктов сгорания определяются рентгеноструктурным или ИК-Фурье анализом. Размер частиц и их геометрия оценивается с помощью оптической и электронной микроскопии.

Температура пламени определяется двумя методами: тепловизионным анализом и термодинамическими исследованиями.

Наличие и состав продуктов-излучателей пламени в видимом, ультрафиолетовом диапазонах фиксируется при оценке светотехнических характеристик с помощью комплекса ПИ-1 (в составе: спектрокалориметр, радиометрическая головка, УФ-спектрометр).

Для определения состава излучателей в ИК-диапазоне (прозрачные нагретые газы, твердая фаза) требуется применение ИК-спектрометра. В качестве данного прибора может применяться Фурье-

спектрометр ФСМ-1202 в специальном исполнении (с вынесенным приемником и источником излучения). База измерения данного прибора при оценке в режиме пропускания – $0,2 \div 6,0$ м. Диапазон рабочей области спектра $2 \text{ мкм} \div 25 \text{ мкм}$ охватывает всю зону, в которой сконцентрированы основные спектры поглощения/излучения газообразных продуктов горения с учетом «окон прозрачности» атмосферы. В качестве сравнительного элемента и источника излучения при оценке пропускания применяется ИК излучатель (АЧТ) с температурой нагреваемого элемента до 1200°C (1478 K).

При определении излучающих продуктов пламени приемник Фурье-спектрометра ФСМ-1202 наводился непосредственно на источник излучения на расстоянии $3\text{-}6$ м от центра факела, соосно с центром факела пламени. Расстояние выбирается исходя из габаритов пламени и интенсивности излучения.

В качестве сравнительной точки применяется ИК излучатель, по которому производился подбор коэффициентов для прибора (настройка диапазона замера и спектрального разрешения для обеспечения достаточного времени измерения $\sim 2\text{-}4$ с). Полученный спектр представляет собой эталонный «спектр серого тела», который совмещен со спектром поглощения паров атмосферной воды ($\sim 3700, 1500 - 1700 \text{ см}^{-1}$), углекислого газа ($\sim 2350 \text{ см}^{-1}$) и других веществ, находящихся в атмосфере.

Исходя из полученных данных измерение производится со следующими параметрами: режим – интенсивность; диапазон $1,98 - 5,10 \text{ мкм}$ (2с); $1,98 - 10,10 \text{ мкм}$ (3с); $1,98 - 20,00 \text{ мкм}$ (4с); разрешение – $2,0 - 4,0 \text{ см}^{-1}$; количество сканов (повторных измерений за цикл) – 1.

Проверка применимости данной методики проведена на ряде энергонасыщенных составов, жидких топливах (бензин, керосин, масла), твердых компонентах (древесина, линолеум), газообразных топливах (бутан, пропан, природный газ).

К недостаткам использования Фурье-спектрометра ФСМ-1202 на данный момент относится необходимость обеспечения стабильного горения в период измерения и невозможность точной количественной оценки.

Применяя весь комплекс представленных методов изучения пламени и состава продуктов горения возможно получить большой объем информации, который может быть использован при разработке огнезащитных и энергонасыщенных композиций и углублении понимания процессов, происходящих при горении.

ИЗМЕРЕНИЕ ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ НА УСТАНОВКЕ БЫСТРОГО СЖАТИЯ

Лещевич В.В.¹, Пенязьков О.Г.¹, Шимченко С.Ю.^{1,@}, Копьев Е.П.²
¹ *Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси*
² *Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН*
[@] sergey.shimchenko@gmail.com

Неполное понимание явлений, предшествующих горению насыщенных углеводородов при определенных условиях, – отрицательная температурная зависимость времени задержки и двухстадийность воспламенения, привлекают внимание к их исследованию и получению надежных, верно интерпретированных, экспериментальных данных, востребованных для верификации кинетических механизмов.

Данная работа представляет результаты экспериментального исследования воспламенения смесей н-гептана с воздухом ($\phi = 0,5$ и $\phi = 1$) и изооктана с воздухом ($\phi = 1$) в диапазоне температур 600–1000 К при одинаковой плотности $5,0 \text{ кг/м}^3$. Эксперименты проводились на установке быстрого сжатия (УБС) с возможностью изменения начальной (до сжатия) температуры смеси T_0 от 290 до 340 К за счет предварительного нагрева рабочего цилиндра и камеры сгорания.

В экспериментах с предварительным нагревом до 328–333 К обнаружено, что воспламенение н-гептан-воздушных смесей в УБС происходит при их температуре в конце такта сжатия выше 655 К. При этом в случае бедного состава ($\phi = 0,5$) всегда наблюдается двухстадийный режим воспламенения, первая (холодная) стадия которого сопровождается незначительным увеличением давления (до 12 % от общего прироста при полном сгорании) и низкоинтенсивной хемилюминесценцией, а вторая (горячая) стадия – резким увеличением давления и интенсивным свечением радикала СН. Воспламенение же стехиометрической смеси протекает в одну (горячую) стадию до температуры 690 К, а при более высоких – в две. Аналогичная закономерность была обнаружена ранее в смесях н-декана с воздухом [1].

Изменение начальной температуры камеры сгорания позволяет контролировать процесс конденсации паров углеводорода на ее внутренней поверхности и в тепловом пограничном слое. При начальной температуре $T_0 = 295 \text{ К}$ парциальное давление н-гептана в смеси превосходит его давление насыщенных паров вблизи

поверхности камеры сгорания в 1,5–3,0 раза в зависимости от эквивалентного отношения смеси. В условиях конденсации воспламенение бедной смеси происходит при температурах более 690 К с аналогичным временем задержки, как и в случае предварительного нагрева, т.е. без конденсации. Минимальная температура воспламенения стехиометрической смеси не зависит от конденсации, но вследствие снижения концентрации топлива время задержки увеличивается в 1,5 раза.

В экспериментах с изооктаном (2,2,4-триметилпентан), отличающимся существенно меньшей реакционной способностью по сравнению с н-гептаном, при давлении 1,4 МПа и температурах 860–960 К воспламенение всегда инициируется вблизи посторонних горящих частиц и носит выраженный очаговый характер, аналогичный ранее обнаруженному для газообразных топлив [2]. Поэтому измеремое время воспламенения при данных условиях не зависит от температуры и не может интерпретироваться как период индукции гомогенной смеси.

Таким образом, экспериментально установлено, что на процесс воспламенения жидких углеводородов могут оказывать существенное влияние такие факторы как конденсация паров топлива и наличие посторонних горячих частиц. Это приводит к флуктуациям измеренных задержек воспламенения и, соответственно, необходимости тщательного анализа фактических условий измерения этой величины при их использовании для верификации кинетических схем химических реакций.

Исследование выполнено в рамках совместного проекта с БРФФИ (T21PM-025) и РФФИ (№ 20-58-04011).

[1] Лещевич В. В., Пенязьков О. Г., Шимченко С. Ю., 2020, Докл. НАН Беларуси. **64(6)**. 747-756.

[2] Leschevich, V. V. [et al.], 2016, Shock Waves. **26(5)**. 657-672.

О МОДЕЛИРОВАНИИ ГАЗИФИКАЦИИ ДВУХСЛОЙНОГО ПОРИСТОГО ПОЛИМЕРА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Луценко Н.А.^{1,2,@}, Боровик К.Г.^{1,2}, Фецов С.С.^{1,2}, Салганский Е.А.³

¹ИИПУ ДВО РАН, Владивосток, РФ

²ДВФУ, Владивосток, РФ

³ИИХФ РАН, Черноголовка, РФ

@ nickl@inbox.ru

В настоящее время ведутся исследования по созданию высокоскоростного летательного аппарата, оснащенного твердотопливным двигателем [1]. При больших скоростях полета температура торможения набегающего воздушного потока достигает высоких значений, не позволяющих использовать воздух в качестве теплоносителя в системе охлаждения. В этом случае для охлаждения двигателя может быть использовано углеводородное топливо, размещенное на борту летательного аппарата. Для реализации такого летательного аппарата можно использовать низкотемпературные газогенераторы с комбинированными зарядами, в которых последовательно расположены твердое топливо и испаряемое пористое горючее [2-5]. Это позволяет охлаждать двигатель конвективным потоком продуктов газификации испарившегося горючего. В работах [6-7] предложена математическая модель газификации твердого пористого горючего в комбинированном заряде низкотемпературного газогенератора высокоскоростного летательного аппарата. В работе [8] для этой модели предложен численный метод, основанный на конечно-объемной дискретизации уравнений и итерационном алгоритме SIMPLE [9]; данный численный метод был реализован в виде решателя для пакета OpenFOAM.

Настоящая работа посвящена численному исследованию закономерностей газификации твердого пористого горючего, состоящего из двух слоев различных полимеров. В расчетах полагалось, что одна часть пористого горючего состоит из полиметилметакрилата (ПММА), а другая часть – из полиэтилена (ПЭ), при этом рассматривался как случай, когда ближе ко входу в газификатор располагался ПММА, а далее – ПЭ, так и случай, когда ближе ко входу был ПЭ, а далее – ПММА. Вычислительные эксперименты показали, что время работы газогенератора для двухслойного горючего всегда меньше, чем время работы

газогенератора при использовании чистого ПЭ, и всегда больше, чем время работы газогенератора при использовании чистого ПММА. Кроме этого, время работы газогенератора на двухслойном горючем зависит не только от отношения объема ПММА к ПЭ, но и от его взаимного расположения, причем зависит неоднозначно. Таким образом, показано, что состав топлива является управляющим параметром, определяющим время работы газогенератора.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-79-20008), <https://rscf.ru/project/21-79-20008/>. Расчеты проводились на оборудовании Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М.В. Ломоносова.

[1] Яновский Л.С., Байков А.В., Аверьков И.С., 2016, Тепловые процессы в технике. **8** (3). 111-116.

[2] Shplyuk A.N., Zvegintsev V.I., Frolov S.M., Vnuchkov D.A., Kiseleva T.A., Kislovsky V.A., Lukashevich S.V., Melnikov A.Yu., Nalivaychenko D.G., 2020, Int. J. Hydrogen Energy. **45** (15). 9098-9112.

[3] Shplyuk A.N., Zvegintsev V.I., Frolov S.M., Vnuchkov D.A., Kislovsky V.A., Kiseleva T.A., Lukashevich S.V., Melnikov A.Yu., Nalivaychenko D.G., 2021, J. Propuls. Power. **37** (1). 20-28.

[4] Salgansky E.A., Lutsenko N.A., 2021, Aerospace Sci. Technol. **109**. 106420.

[5] Аульченко С.М., Звегинцев В.И., Фролов С.М., 2022, Инженерно-физический журнал. **95** (1). 22-30.

[6] Левин В.А., Луценко Н.А., Салганский Е.А., Яновский Л.С., 2018, ДАН. **482** (2). 150-154.

[7] Salgansky E.A., Lutsenko N.A., Levin V.A., Yanovskiy L.S., 2019, Aerospace Sci. Technol. **84**. 31-36.

[8] Боровик К.Г., Фецов С.С., 2021, Динамика многофазных сред (ДМС-2021). Тезисы докладов XVII Всероссийского семинара с международным участием. Новосибирск, С. 3.

[9] Patankar S., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New-York. 214 p.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ АВИАЦИИ

Мигалин К.В.^{1@}, Бойчук И.П.¹, Егоров А.Г.², Сиденко К.А.².

ООО «РОТОР», Тольятти, Россия,

Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия,

Прошло уже более 87 лет с изобретения Паулем Шмидтом клапанного пульсирующего воздушно - реактивного двигателя, положившему начало истории развития импульсных двигателей в авиации. Интерес к этому типу двигателей то разгорался, то прерывался на долгое время. Неудовлетворённость ресурсом и надёжностью клапанного механизма заставила инженеров искать новые решения, и они были найдены [1]. Было разработано сравнительно много разнообразных конструкции бесклапанных ПуВРД. Самое главное их преимущество состояло в технологической простоте изготовления и в цене. Она оказывалась в 10-50 раз меньше чем у турбореактивного двигателя аналогичной тяги. Это качество определило и их применение в одноразовых самолётах-мишенях. Для этой цели до сих пор используются ПуВРД типа Термо Джет. В России на сегодняшний день самолёты-мишени с этими двигателями производит фирма Эникс г. Казань. За рубежом подобные типы мишеней так же производятся. Вполне ожидаемым стало решение управления по вооружениям ВВС США о расширении области применения самолётов с ПуВРД и начале финансирования работ по новому типу многоцелевых дронов. Их новое назначение - вскрытие систем ПВО противника и выполнение функций «камикадзе»-удары по наземным целям. Но не только самолёты мишени оказались в зоне возможного применения бесклапанного ПуВРД. Примерно 20 лет назад сообщество двигателистов во всём мире «заболело» идеей создания детонационного ВРД. Наиболее яркие и ресурсозатратные образцы таких двигателей описаны в [2], где показана попытка выноса детонационного контура из двигателя в отдельные камеры с золотниковыми механизмами. Эта и множество других попыток закончились полным провалом. Причин тому много, но главная, состоит в том, что продольный тип детонации, с высокой

частотой пульсаций, оказался технически не реализуем. Увеличить частоту детонационных вспышек можно перейдя к другой форме детонации – сферической. Реализация такого вида детонации требует очень мощного источника циклического зажигания топливоздушной смеси. Бесклапанные эжекторные ПуВРД (рис.1) обладают таким источником и могут это осуществить [3]. И если в новом типе двигателя, вопрос целесообразности, перехода к циклу детонационного горения остаётся открытым, то в случае дефлаграционного горения новый двигатель способен работать на скоростях полёта вплоть до 2М. Все известные на сегодняшний день ПуВРД до звуковые.

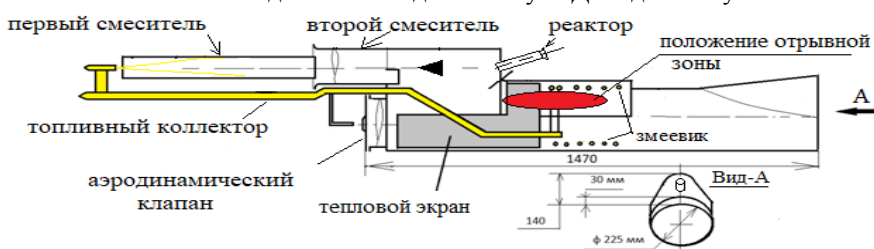


Рис.1. Схема двухконтурного эжекторного ПуВРД

На рис.2 и рис.3. представлены показатели по удельному расходу топлива и удельной тяге эжекторного двухконтурного ПуВРД в сравнении с другими типами авиационных двигателей.

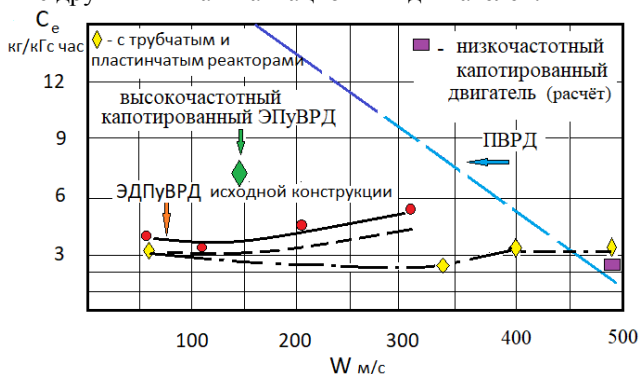


Рис.2. Сравнение удельного расхода топлива эжекторного ПуВРД и ПВРД

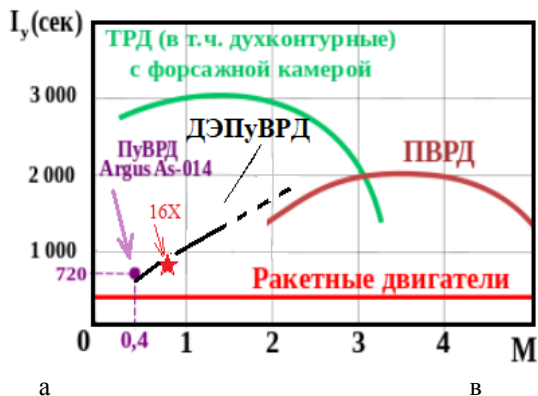


Рис.3. Сравнение удельной тяги для эжекторного ПуВРД и ПВРД.

Можно видеть, что в области скоростей полёта 1-1,5М этот двигатель демонстрирует показатели значительно лучше, чем ПВРД. Если учесть то, что в этом диапазоне скоростей ПВРД стараются не использовать в виду крайне низкой экономичности, то разработанный новый вид ПуВРД может оказаться безальтернативным.

[1]. Мигалин К.В. и др. Пульсирующие воздушно-реактивные двигатели. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2014. –296 с.

[2]. Электронный ресурс:
https://vpk.name/news/521141_impulsnyi_reaktivnyi_dvigatel_kak_budush_ee_vvs_ssha.html

Мигалин К.В., Сиденко К.А., Мигалин К.К. Эжекторные двухконтурные пульсирующие воздушно-реактивные двигатели для около и сверхзвуковых скоростей полёта. Тольятти; Изд-во Спект, 2021.

с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ПРЯМОТОЧНОГО ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ПОРОШКООБРАЗНОМ АЛЮМИНИИ

Ягодников Д.А.¹, Берников В.В.¹, Папырин П.В.^{1, @}

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана

@ papyrin_pv@bmstu.ru

Внутрикамерные процессы всех тепловых ракетных и реактивных двигателей сопровождаются процессами электризации продуктов сгорания топлива и элементов конструкции. При этом для характерных условий работы двигателей степень ионизации рабочего тела невелика и не оказывает существенного влияния на тягово-импульсные характеристики двигательных установок. Тем не менее, знание электрофизических свойств продуктов сгорания может представлять практический интерес в процессе разработки двигателей, в частности, при их бесконтактных контроле и диагностике [1], а также в системах регулирования [2].

Состав топливных композиций, применяющихся в РПД на твердом топливе, характеризуется наличием высокоэнергетических конденсированных добавок, таких как частицы металлов, например, дисперсного алюминия. Приобретенный электрический заряд движущейся горячей частицы определяется суммой потоков ионов и электронов на ее поверхность [3]. Так как горящие частицы обладают высокой температурой поверхности, то доминирующим типом зарядки является термоэлектронная эмиссия. В свою очередь, время горения частицы значительным образом будет определяться параметрами окружающего газового потока. Таким образом, для более точного определения заряда частиц необходимо рассмотрение детальной газодинамической картины течения с учетом особенностей конструкции двигателя.

Целью данной работы является определение плотности распределения вероятности осредненного заряда, радиуса и температуры частиц алюминия при их движении в камере сгорания

прямоточного воздушно-реактивного двигателя на порошкообразном алюминии.

При моделировании движения двухфазного реагирующего потока применялся метод Эйлера-Лагранжа, Поведение газовой среды описывалось при помощи системы уравнений Навье-Стокса, дополненных уравнениями сохранения веществ и $k-\omega$ моделью турбулентности. Дискретизация полученной системы уравнений осуществлялась при помощи метода конечных объемов. Преобразование частиц дисперсной фазы моделировалось системой уравнений, включающих в себя уравнения движения, модель горения и электризации частицы.

Для численного решения этой задачи применялся авторский программный код, позволяющий проводить расчеты на графических ускорителях (GPU). Полученные данные качественно согласуются с результатами других авторов. Показано, что наибольшее влияние на квазистационарную величину заряда частиц оказывает их температура и начальный диаметр, значение которого в процессе выгорания частицы уменьшается, стремясь к нулю.

Работа выполнена при поддержке Проекта № 0705-2020-0044 фундаментальных научных исследований Минобрнауки РФ.

[1] Ягодников Д. А., Рудинский А. В. Диагностика ракетных и реактивных двигателей по характеристикам собственного электромагнитного поля продуктов сгорания // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55. – №. 5. – С. 828-845.

[2] Keshav S., Utkin Y., Adamovich I. Feedback combustion control using chemi-ionization current //46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. – 2008. – С. 1056.

[3] Фортгов В. Е. и др. Пылевая плазма //Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174. – №. 5. – С. 495-544.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРИБАЛЛИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГРД ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Рудинский А.В.^{1, @}

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана

@ ravman@bmstu.ru

Представлены результаты расчетов электрического заряда, приобретаемого частицами конденсированной фазы (к-фазы) – оксидов металлов Al_2O_3 и FeO в ионизированном потоке, формируемым модельным гибридным ракетным двигателем (ГРД) прямой схемы [1] на компонентах: газообразный кислород и горючее типа Hydroxyl Terminated Polybutadiene (НТРВ). Электрический заряд частиц к-фазы с диаметрами 7...10 мкм рассчитывался в предположении ионизационного равновесия в системе «ионизированный газ и частица» с учетом температурного и скоростного «отставания» твердых частиц и потока продуктов сгорания НТРВ+ O_2 .

С использованием теории электростатического зонда в двухфазном потоке [2] проведено сравнение полученных теоретических значений электрического заряда и потенциала частиц, приобретаемым в потоке, с экспериментальными данными [3]. Проведенное исследование позволило теоретически обосновать возможность применения бесконтактного электрофизического метода для определения внутрибаллистических характеристик рабочего процесса модельного ГРД. Разработанная методика теоретического определения электрического заряда частиц к-фазы может быть использована для разработки системы, позволяющей определять скорости и размеры частиц в двухфазных потоках.

Работа выполнена при поддержке проекта № 0705 2020 0044 Российской академии наук.

[1] Shanks R., Hudsont M.K., 1994, 30th Joint Propulsion Conference and Exhibit. 1-11.

[2] Ватажин А.Б., Голенцов Д.А., Лихтер В.А. и др., 1997, Изв. РАН. МЖГ. **2**, 83-95.

[3] Dunn R.W., Wright A.M., Hudson M.K., 1999, International Journal of Turbo and Jet Engines. **16**. 255-262.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРИЙНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТУ НК-38СТ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Тихонов О.А.^{1, @}, Сабирзянов А.Н.¹, Бакланов А.В.²

¹*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань, Россия*

²*Казанское моторостроительное производственное объединение (АО «КМПО»), г. Казань, Россия*

@ OLATikhonov@kai.ru

Задача корректного и быстрого прогнозирования эмиссионных характеристик газотурбинных установок (ГТУ) в широком диапазоне климатических условий является актуальной и важной научной проблемой.

На сегодняшний день для прогнозирования эмиссионных характеристик широко применяют методы математического моделирования, но не существует компактных кинетических механизмов, способных быстро и точно предсказать эмиссию загрязняющих веществ в широком диапазоне температур окружающей среды. Следует отметить, что полные химические механизмы решают данную проблему, но получение результата требует значительных вычислительных и временных ресурсов. Авторы видят решение данной проблемы в формировании глобальных химических механизмов, которые способны корректно прогнозировать эмиссионные характеристики в узких температурных интервалах окружающей среды для быстрого получения результата.

В работе проведено численное моделирование рабочих процессов и эмиссионных характеристики серийной камеры сгорания НК-38СТ, используемой в составе газотурбинной установки (ГТУ), в широком диапазоне температур окружающей среды. Численные исследования проводились средствами пакета Ansys Fluent в адиабатной стационарной постановке. Используемые модели: осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса; RANS модель турбулентности $k-\omega$ SST; модель конечной скорости объемной химической реакции (Finite Rate Chemistry). Исходными компонентами топливной смеси являлись горючее – метан и окислитель – воздух. Для компонентов топливной смеси и продуктов сгорания справедливо уравнение состояния идеального газа. Геометрическая модель представлялась сектором 1/23 части камеры сгорания с условиями периодичности. Сеточная модель – 8,5 млн. полиэдральных элементов

с минимальным ортогональным качеством 0,1. Результаты численного моделирования сравнивались с обобщенными экспериментальными данными по серийной камере сгорания.

Результаты численных исследований показали, что только механизм Gri-Mech 3.0 [1], включающий в себя 50 компонентов и 309 реакций, позволяет корректно оценить эмиссионные характеристики в широком диапазоне температур окружающей среды. Основным недостатком применения кинетического механизма Gri-Mech 3.0 является очень большое время расчета и используемые значительные вычислительные ресурсы. Такие кинетические механизмы как Kee 58, включающий 18 компонентов и 58 обратимых реакций, Smooke 46 (17 компонентов и 46 реакций), типовой глобальный двухступенчатый механизм горения метана (6 компонентов и 3 односторонних химических реакции), 16s29v [2] (16 компонентов и 29 реакций) некорректно оценивают эмиссию и температуру на выходе из камеры сгорания. Для указанных кинетических механизмов горения отклонение численных результатов эмиссии CO от обобщенных экспериментальных данных и расчетные значения температуры сведены в таблицу.

Механизм	Погрешность расчета эмиссии, %		Температура на выходе из КС, К	
	- 16 ⁰ С	+ 16 ⁰ С	- 16 ⁰ С	+ 16 ⁰ С
Gri-Mech 3.0	7	1	1454,2	1603,14
Двухступенчатый механизм	92	255	1442	1555,4
Kee 58	30	4614	790,8	962,98
Smooke 46	27	8395	810,9	1396,6
16s29v	4862	92091	881,15	1265,9

На основании анализа и редуцирования механизмов кинетических реакций, полученных средствами программного продукта Ansys ChemKin, проведена их экспертная оценка, позволяющая применять сформированные механизмы для корректного расчета эмиссионных характеристик камеры сгорания ГТУ НК-38СТ в заданных узких диапазонах температур окружающей среды.

[1] Egolfopoulos F.N., 1989, Combustion and Flame. **76**. 375-391

[2] Козлов В.Е., 2009, ТВТ. **47**. 946-953

ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНЫХ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОДИНАМИКОЙ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ СО СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ ТЕЧЕНИЯ НА ВХОДЕ

Третьяков П.К.¹, Тупикин А.В.^{2,@}

¹*Институт теоретической и прикладной механики им.*

С.А. Христиановича СО РАН

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

@ tupikin@itp.nsc.ru

Одной из основных фундаментальных задач, решение которых требуется для развития технологий высокоскоростного (в том числе гиперзвукового) полета, является реализация рабочего процесса в камере сгорания (КС) с высокой полнотой сгорания и малыми гидравлическими потерями по тракту ПВРД. Экспериментальные исследования, выполненные в нашей стране и за рубежом, свидетельствуют о том, что платой за высокую полноту сгорания, как правило, становятся большие гидравлические потери. Плавного (непрерывного) изменения газодинамической структуры от дозвукового режима течения в проточной части к сверхзвуковому с увеличением числа Маха полёта ЛА осуществить невозможно. Требуется кардинальное изменение рабочего процесса в ПВРД. Возможным решением может стать управляемый переход к преддетанационному режиму горения в КС. Рабочий процесс в ПВРД, основным элементом которого является организация преддетанационного режима горения, представлен в патенте [1]. Возможность реализации предлагаемых режимов работы КС показана в [2,3] при моделировании условий полета с $M=6$.

В работе изучались условия применения активных способов управления газодинамикой при организации рабочего процесса в модельной КС со сверхзвуковой скоростью течения на входе. В том числе были рассмотрены предельные режимы работы модельной КС, и определены нижние границы по температуре и числу Маха на входе в неё при реализации преддетанационного горения.

Модельная КС состояла из двух секций постоянного сечения (диаметрами 50 и 90 мм), в конце первой подавались газодинамические импульсы. В качестве генератора газодинамических импульсов применялся быстродействующий клапан с ресивером на входе. Керосин подавался по оси на входе в КС. Опыты проводились в

режиме присоединенного воздухопровода с параметрами потока на входе в КС: числом Маха $M_c=1.7$ и 2.0 , полным давлением $P^*\approx 0.5-0.7$ МПа и температурой торможения $T^*=1400-1650$ К. Оценка эффективности рабочего процесса проводилась по квазиодномерной методике. Для поддержания преддетонационного режима в расширяющейся части организовывался подвод тепла от горения дополнительного горючего. Для чего перед расширением был расположен второй пояс подачи топлива.

Таким образом, были изучены особенности нового способа организации рабочего процесса в высокоскоростных КС на углеводородном топливе, с применением импульсно-периодического воздействия на газодинамику течения, для управления смешением, иницированием и развитием горения в высокоэнтальпийном потоке.

Экспериментальная реализация предложенного способа в малоразмерных модельных КС показала повышение эффективности горения и снижение гидравлических потерь за счёт осуществления преддетонационного режима горения, отсутствия элементов для стабилизации пламени и торможения потока без перехода к дозвуковой скорости течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-08-00245).

[1] Третьяков П.К., Прохоров А.Н., 2018, **RU2651016**

[2] Третьяков П.К., 2020, ФГВ, **1**. 42-47.

[3] Третьяков П.К. и др., 2020, ФГВ, **5**. 45-48.

ЧИСЛЕННОЕ ИСЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРЕНИЯ В КАМЕРЕ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ НА ГАЗООБРАЗНЫХ КОМПОНЕНТАХ КИСЛОРОД-МЕТАН

Федотова К.В.^{1,®}, Ворожеева О.А.¹, Ковалев К.Е.¹

¹*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

[®] fedotova@bmstu.ru

Повышенные экологические требования и необходимость расширения сырьевой базы отечественного ракетостроения приводят к необходимости использования криогенного метана в качестве горючего в ракетных двигателях малой тяги (РДМТ). Таким образом, в настоящее время актуальной задачей при создании систем ориентации и стабилизации космических аппаратов является надежное воспламенение и горение несамовоспламеняющихся компонентов топлива, в частности, метана с кислородом. Одним из возможных способов стабилизации пламени является выбор соответствующих режимных (давление в камере сгорания, коэффициент избытка окислителя и т.д.) и геометрических факторов. Наибольший интерес представляют электрические системы зажигания (ЭСЗ), для проектирования которых необходимы сведения об уровнях температуры и давления в камере сгорания, скорости потока в области свечи зажигания, характеристики турбулентности потока [1]. Таким образом, актуальной задачей становится разработка математической модели для численного определения параметров неравновесного потока смеси газообразных метана и кислорода в камерах сгорания РДМТ [2].

В работе рассматривается модельная камера сгорания РДМТ с тягой 20...200 Н с зональной системой подачи компонентов. Проведено трёхмерное численное моделирование диффузионного режима горения газообразных метана и кислорода в камере сгорания модельного РДМТ, основанное на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, дополненных соответствующими редуцированными кинетическими механизмами [3]. Для замыкания система уравнений дополнена моделью турбулентности $k - \omega$ SST и уравнением состояния идеального газа. Для совместного решения задач турбулентного течения и химической кинетики используется модель распада вихрей EDM (Eddy Dissipation Model) [4], в которой ламинарными скоростями реакции пренебрегают, поскольку считается, что скорость реакции зависит от интенсивности турбулентности в потоке.

Проведено параметрическое исследование влияния диаметров отверстий подачи компонентов, коэффициента избытка окислителя в диапазоне $0,5 < \alpha < 1,5$, а также массового расхода компонентов в различные зоны камеры сгорания на устойчивость горения негомогенной кислород-метановой смеси. В результате математического моделирования получены поля распределения температуры, концентраций и скорости продуктов сгорания в камере сгорания модельного РДМТ, на основе которых сформулированы необходимые условия организации устойчивого и эффективного рабочего процесса.

Используемый в работе подход актуален в процессе выполнения многопараметрических исследований, а также на этапе предварительного выбора режимов работы и технического облика РДМТ на экологически чистых компонентах.

[1] Андреев Е.А., Новиков А.В., Шацкий О.Е., 2017, Инж. журнал: наука и инновации. 4. 25 с.

[2] Новиков А.В., Ягодников Д.А., Буркальцев В.А., Лапицкий В.И., 2004, Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец.вып. 8-17.

[3] Frassoldati A., Cuoci A., Faravelli T., 2009, 1st Int. Conf. S4FE, 14 p.

[4] Magnussen B.F., Hjertager B.H., 1976, 16th Symposium on Combustion, p. 719

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА
ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В КАМЕРЕ РДТТ ПРИ ГОРЕНИИ
ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ И
ПОЛИБУТАДИЕНОВОГО КАУЧУКА**

Шайдуллин Р.А.[®], Сабирзянов А.Н.

*Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань, Россия*

@samsankimanki@bk.ru

Горение твердого ракетного топлива представляет собой наисложнейший комбинированный процесс, включающий реакции в твердой, конденсированной и газовой фазах. Попытка описания химии горения перхлората аммония (ПХА) и полибутадиенового каучука (ПБК) была сделана Джеппсоном [1], в механизме которого использовались газофазные и конденсированные реакции. Реакции конденсированной фазы описывались полу-обобщенным 8-ми ступенчатым механизмом. Газофазная модель представляла собой редуцированный механизм О.П. Коробейничева [2] с добавлением некоторых реакций [3]. Однако, в открытой литературе не встречается применение данного механизма к условиям, соответствующим ракетному двигателю на твердом топливе (РДТТ).

Посредством численного моделирования проведена оценка распределения состава продуктов сгорания ПХА/ПБК по объему камеры сгорания РДТТ с утолненным соплом с использованием кинетического механизма Джеппсона [1].

По результатам моделирования определено распределение компонентов в ядре потока и в застойных зонах утолненного сопла, где время пребывания намного больше. В застойных зонах за счет меньших скоростей потока и большего времени пребывания основных окислительных компонентов меньше. В минимальном сечении для используемого механизма наблюдался равновесный состав продуктов сгорания (H_2O , C_2H_2 , HCl , CO_2 , CO , HCN , NO_2 , NO , Cl , N_2 , O_2).

[1] Jeppson M.B., 1998, 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit

[2] Коробейничев О.П., 1990, ФГВ. **26**. 46-55

[3] Ермолин Н.Е., 1995, ФГВ. **31**. 58-69

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НОРМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ПЛАМЕНИ В АЭРОЗВЕСИ ЧАСТИЦ БОРА

Шпара А.П.®, Ягодников Д.А., Сухов А.В.

МГТУ им. Н.Э. Баумана

® vmt1@mail.ru

Выполнено моделирование распространения u_n и расчет нормальной скорости пламени по монофракционной аэрозвеси частиц бора в зависимости от давления, коэффициента избытка окислителя и размера частиц. В основу схемы расчета u_n положен “эстафетный” механизм передачи тепла по аэрозвеси частиц с учетом изменения механизмов переноса тепла и массы при уменьшении размеров частиц от микро- до нанодиапазона.

Модель горения аэрозвеси частиц бора заключается в том, что исходная смесь горючего и окислителя представляет собой совокупность частиц с начальным радиусом r_{b0} и условных объемов газа r_{y0} , в котором происходит воспламенение и горение каждой частицы. Центры их расположены в вершинах кубов с ребрами длиной $2r_{y0}$,двигающихся со скоростью U_n и отделенных от зоны с продуктами сгорания неподвижной границей- фронтом пламени. При этом полагаем также, что процессы переноса тепла и массы будут иметь место только в тех условных объемах, центры которых в данный момент находятся на границе фронта.

Принято, что выделяющееся при горении частицы тепло затрачивается только на испарение бора и нагрев газовой среды в условном объеме от начальной температуры газа до адиабатической температуры горения. После прекращения горения частицы за время τ_b будут иметь место следующие события - объем продуктов сгорания переместится вправо в зону продуктов сгорания, его место занимает объем занимает новая частица r_{b0} и присоединенным условным объемом r_{y0} и процесс будет повторяться аналогичным образом.

При такой схеме теплопереноса уравнение для расчета скорости распространения пламени, которая в данной постановке тождественна нормальной скорости пламени, записывается в следующем виде:

$$u_n = 2 r_{b0} / \tau_b.$$

С использованием модели распространения фронта пламени по аэрозвеси частиц бора с учетом молекулярно-кинетического режима тепломассообмена [1] установлены зависимости u_n от r_{b0} , коэффициента избытка окислителя α и давления p (рис. 1). Выявлены условия и приведено обоснование наличия экстремумов и монотонных

зависимостей, обусловленных сменой режима тепломассообмена в условиях сплошной среды (СС) на свободномолекулярный режим.

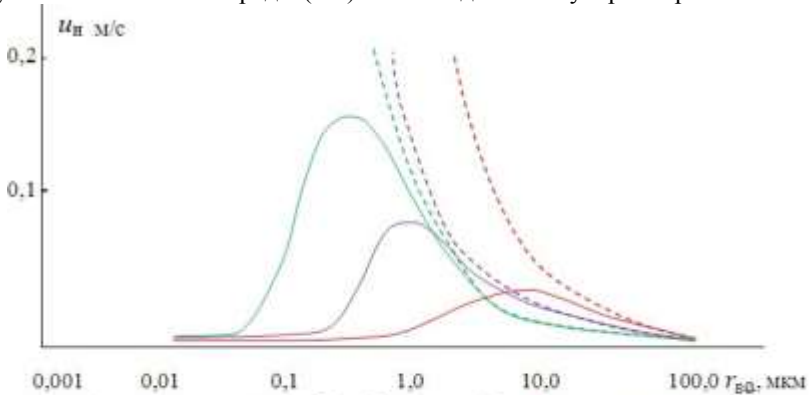


Рис. 1. Зависимость $u_n = f(r_{в0})$ при $\alpha = 1,0$. — $p = 4$ МПа, — $p = 1$ МПа, — $p = 0,1$ МПа. Штриховые линии – расчет для режима СС

На рис. 2 приведено сравнение результатов расчета u_n при горении частиц $r_{в0} = 3$ мкм в кислороде с массовой концентрацией $g_{в} = 200 \dots 400$ г/м³ при $p = 0,1$ МПа и температуре среды, равной адиабатической T^* (кривая 1) с экспериментальными данные работы [2], свидетельствующее их удовлетворительное согласование.

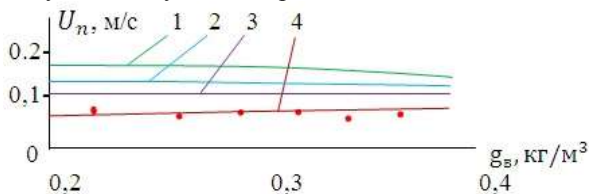


Рис. 2. Зависимость $u_n = f(g_{в})$ Кривая 1 – расчет по предложенной методике, кривые 2, 3 и 4 – расчет по предложенной методике при температурах продуктов сгорания 2600 К, 2400 К и 2000 К. Маркеры – экспериментальные данные [18]

[1] Шпара А.П., Ягодников Д.А., Сухов А.В. К вопросу о влиянии размера частиц на механизм горения бора в воздухе // ФГВ. 2020.Т. 56, №4. С. 112.

[2] Л.В. Бойчук, В.Г.Шевчук, А.И.Швец. Распространение пламени в двухкомпонентных составах газозвесей алюминия и бора //ФГВ. 2002. Т.38, №6. С. 51.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ РАБОЧЕГО
ТЕЛА МОДЕЛЬНЫХ РАКЕТНЫХ И РЕАКТИВНЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ**

Д.А. Ягодников[®], А.Н. Бобров, К.Е. Ковалев, К.В. Степанов
*Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана*
daj@bmstu.ru

Вибро-акустический анализ характеристик состояния материалов, изделий, биологических объектов, окружающей среды является широко применяемым физическим методом технического контроля и диагностики. Этому методу присущи такие важные качества как высокая оперативность, чувствительность, достоверность и информативность результатов, тенденция к быстрому снижению затрат на его реализацию, возможность внедрения на практически любом этапе жизненного цикла изделия (а не только при проектировании), что обуславливает большой интерес к разработке методов акустического контроля применительно к анализу рабочих процессов в ракетных и реактивных двигательных установках.

Цель работы заключается в разработке методов акустического контроля, использующих регистрацию акустического сигнала, генерируемого элементами двигательных установок с турбинным приводом, ракетных двигателей твердого топлива, для его дальнейшего амплитудного и спектрального анализа. Такой подход позволяет получать информацию с двигательных установок, не оборудованных штатными средствами измерения параметров при проведении серийных испытаний. Кроме того, представляется возможным организовать дублирующие каналы регистрации в дополнение к штатным. Это имеет важное значение для диагностики отказов оборудования, возникающих внезапно и которые могут завершиться разрушением объекта исследования, что позволяет получить дополнительную информацию о состоянии объекта перед отказом и о ходе развития аварийной ситуации.

Объектами исследования в данной работе являлись модельный РДТТ Е-5-0 с торцевым зарядом из дымного пороха с диаметром критического сечения 3,4 мм и парциальная газовая турбина экспериментальной энергетической установки со средним диаметром лопаток 125 мм.

В качестве регистраторов и первичных измерительных преобразователей использовались три волоконно-оптических интерферометра Маха-Цендера и динамический микрофон Philips SBCMD650 (частотный диапазон 50 – 15000 Гц).

С помощью волоконно-оптических интерферометров Маха-Цендера измерена скорость перемещения торцевой поверхности горения (линейная скорость горения) твердого топлива, составляющая $u = 19,3$ мм/с. Из анализа интенсивности сигнала следует, что амплитуда колебаний увеличивается на всех интерферометрах с момента запуска двигателя и максимальное значение достигает в момент прохождения горячей поверхности твердого топлива зоны намотки чувствительного плеча интерферометра. Анализ спектрограмм позволил определить резонансные частоты продольных мод акустических колебаний в камере сгорания РДТТ в диапазоне от 3 до 20000 Гц и их гармоники, являющиеся наиболее вероятными.

Разработанная методика бесконтактной акустической диагностики с использованием динамического микрофона Philips SBCMD650 показала возможность её использования при огневых стендовых испытаниях РДТТ для определения характерных времен задержки воспламенения заряда и выхода РДТТ на расчетный режим работы (в диапазоне от 0,5 до 1,0 с). Получено распределение частотных характеристик записанного сигнала от времени работы модельного РДТТ, которое свидетельствует о сложной структуре спектра, включающего фоновые шумы, отфильтрованные в процессе вторичной обработки спектров.

Регистрация на динамический микрофон Philips SBCMD650 акустических шумов модельной газотурбинной установки и частотная обработка сигналов позволила выполнить диагностику отдельных этапов ее работы при изменении частоты вращения ротора от 628 до 1696 рад/с за счет изменения массового расхода воздушного потока, протекающего через сопловую (направляющую) и рабочую решетки турбины, а также установлены особенности появления и исчезновения характерных частотных полос акустических шумов, сопровождающих течение газа через сопловую и рабочую решётку при выходе на расчетный режим и при выбеге ротора. Выполненная диагностика позволила также выявить аномалии конструкции установленных на статоре турбины подшипников качения.

Работа выполнена при поддержке Госпрограммы фундаментальных исследований № 0705-2020-0044 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

**О ВЛИЯНИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА ПРИ
СВЕРХЗВУКОВОМ ИСТЕЧЕНИИ УДАРНО-СЖАТОГО ГАЗА В
СВАРОЧНОМ ЗАЗОРЕ НА ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ
СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ**

Бондаренко С.Ю.¹, Первухин Л.Б.², Шишкин Т.А.², Первухина О.Л.³

¹ *Алтайский государственный аграрный университет, г. Барнаул,
Россия, bonsu@yandex.ru*

² *ООО "Битруб Интернэшнл", г. Красноармейск, Московской обл.,
Россия, bitrub@mail.ru*

³ *Институт структурной макрокинетики и проблем
материаловедения, г. Черноголовка, Московской обл., Россия,
opervukhina@mail.ru*

В докладе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса образования соединения при сварке металлов взрывом. Расчётами показано, что одновременно с сжатием газа, находящегося в сварочном зазоре, и его нагрева до температуры порядка 3000⁰К в процессе метания происходит его вытеснение из сварочного зазора. При взаимодействии УСГ со свариваемыми поверхностями образуется пограничный слой, с температурой порядка 6500⁰К. Под воздействием этой температуры происходит быстрый разогрев, плавление, взрывное испарение микроучастков свариваемых поверхностей, диссоциация окислов и всех поверхностных загрязнений, ионизация их паров и возникновение ударной плазмы в пограничном слое.

Продукты очистки с оплавленными микронеровностями захватываются потоком УСГ при обтекании свариваемых поверхностей и выносятся из зоны сварки до соударения в точке контакта. На свариваемых поверхностях образуются активные центры вследствие разрыва связей поверхностных атомов с их соседями, нарушающими стабильные электронные конфигурации этих атомов. В зоне соударения атомы сближаются до расстояния, равного периоду решётки и образование связей между ними произойдёт мгновенно и с выделением энергии.

Представлены расчётные графики зависимости размеров УСГ от габаритов свариваемых листов и расположения точки инициирования процесса, определяемые из дискретного задания итоговой выведенной функции, состоящей из трех зависимостей, показывающих три механизма ее формирования на разных участках и в различные временные диапазоны:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 l(t_1) = g_k t_1 \left(\sqrt{1 + \frac{\rho_1}{\rho_2}} - 1 \right); (0 \leq t_1 \leq \frac{h}{2g_k}) \\
 l_F(t_2) = \frac{\rho_1 \cdot 2Vt \cdot \arcsin\left(\frac{h}{2Vt}\right) \cdot g_k \cdot t}{\rho_2 2Vt \cdot \arcsin\left(\frac{h}{2Vt}\right) + t \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \sqrt{\frac{8\gamma P_2 \rho_2}{(\gamma+1)}}} - h\sqrt{0.001}; (t_2 \geq \frac{h}{2g_k}) \\
 l_{\text{соединит}}(t_3, y) = \sqrt{\left[\frac{4 \cdot g_{\text{vcr}}^2 t_3^2 + h^2}{8 \cdot g_{\text{vcr}} t_3} \right]^2 - y^2} - \left(\frac{4 \cdot g_{\text{vcr}}^2 t_3^2 + h^2}{8 \cdot g_{\text{vcr}} t_3} - g_{\text{vcr}} t_3 \right); \left(\frac{h}{2g_k} \leq t_3 \leq \frac{h}{2g_k} + \frac{h}{2g_{\text{всп.}}} \right)
 \end{array} \right.$$

А также, рассматриваются графики нестационарного одномерного температурного поля для свариваемых поверхностей из стали, титана и алюминия, показывающие зависимости температуры на разной глубине от размеров УСГ и времени процесса.

Экспериментально показано, что процесс схватывания начинается на расстоянии 30-50мм, затем идёт зона стабилизации процесса сварки (примерно 150-250мм) до образования равнопрочного соединения. Приводятся графики зависимости длины волн и количества литых включений в соединении по длине листа размерами 30(26+4)х200х12900мм. На основании проведенных исследований сделаны выводы:

- форма УСГ, двигающегося впереди линии контакта, формируется на основе трех независимо действующих механизмов, каждый из которых действует в своем интервале времени;
- форма температурных полей внутри металла сильно зависит от двух параметров – теплопроводности металла и времени воздействия УСГ;
- при увеличении размеров свариваемых листов происходит рост области УСГ, что приводит к прогреву свариваемых поверхностей на большую глубину и как следствие, росту размеров волн и количества литых включений в соединении, в конечном счёте, образованию сплошного оплавленного слоя, то есть образованию соединения в жидкой фазе;
- в процессе сварки взрывом соединение образуется в твёрдой фазе между предварительно очищенными, активированными и нагретыми до температуры, близкой к температуре плавления поверхностями, в результате аэродинамического воздействия УСГ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИВОВ КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ, ОБРАЗОВАНИЯ И РАССЕЙВАНИЯ ПАРОВОЗДУШНЫХ ОБЛАКОВ В АТМОСФЕРЕ

Болодьян И.А., Вогман Л.П.

*ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Россия, г. Балашиха
3.5.2@vniipo.ru*

Рассмотрены процессы пролива, растекания, испарения криогенных топлив на различных поверхностях в зависимости от вида поверхности, ее влажности, проницаемости и температуры. Вытекающая криогенная жидкость будет находиться в равновесии со своими парами при давлении, равном атмосферному, или близком к нему. Это значит, что при подводе тепла начинается процесс кипения жидкости с интенсивностью, пропорциональной величине теплового потока. Полный тепловой поток складывается из нескольких составляющих: потока тепла, обусловленного излучением (солнце, пламя и т.п.), градиентом температуры окружающей среды и подстилающей поверхности, конвекцией паров над поверхностью жидкости и т.п. Величины составляющих потоков тепла могут существенно отличаться друг от друга, так что один из них может превалировать над другими и определять интенсивность процесса испарения. Разность температур между пролитой жидкостью и окружающей средой может составлять от 180 °С для СПГ до 270 °С для водорода. Поскольку температура поверхности в процессе испарения понижается, то и сам процесс носит нестационарный характер.

Экспериментальные исследования преследовали цель изучения процессов растекания, испарения криогенных жидкостей при их проливах, истечениях вида в зависимости от подстилающей поверхности, параметров состояния среды (температура, подвижность, влажность) и оценке пожаровзрывоопасности этих событий.

Проливы и испарение криогенных жидкостей осуществлялись на бетон, сталь, песчаную поверхность, поскольку эти поверхности являются наиболее распространенными материалами, на которые могут проливаться криогенные топлива, к тому же они отличаются по своим теплофизическим свойствам. В опытах с песчаной поверхностью изучались проникающая способность криогенной жидкости, а также влияние увлажнения песка на ее испарение. При исследовании проникающей способности часть экспериментов осуществлялась

непосредственно на песчаную поверхность, а часть на тонкую металлическую поверхность, исключаящую просачивание жидкости в песок. Отсутствие воздушного зазора между поверхностью песка и пластиной обеспечивалось минимальным искажением тепловых процессов, протекающих при испарении жидкости. В качестве криогенных топлив использовались жидкий водород и СПГ. В ряде экспериментов в качестве модельной жидкости применялся жидкий азот, обладающий близкими к криогенным топливам физическими свойствами.

Получена зависимость массовой скорости испарения метана с поверхности бетона от времени, которая является типичной для различных поверхностей испарения различных криогенных жидкостей. Для нее характерен резкий скачок нестационарного характера длительностью порядка 100 с. На данном участке скорость от максимальной падает в 5 – 6 раз и затем переходит в квазистационарное состояние. Для этого периода испарения криогенных жидкостей кривая удовлетворительно аппроксимируется соотношением:

$$Q_{\text{пов}} = \sqrt{c\lambda\rho} (T_0 - T_{\text{кип}}) / t\tau, \quad (1)$$

где c – теплоемкость жидкости; ρ – плотность жидкости; λ – теплопроводность жидкости; T_0 – температура окружающей среды; $T_{\text{кип}}$ – температура кипения жидкости; t – текущее время. При больших временах ($t > 100$ с) для оценок скорости испарения криогенных топлив можно пользоваться соотношением (1).

На процесс испарения криогенных жидкостей существенное влияние может оказывать проницаемость грунта.

Важным фактором, влияющим на интенсивность испарения криогенных жидкостей с поверхности разлива, является, помимо проницаемости, также и влажность грунта. В отличие от бетона он может быть насыщен большим количеством влаги, замерзание которой при проливе жидкости также способно существенно увеличить тепловой поток к жидкости.

Экспериментальные данные по массовой скорости испарения m криогенной жидкости, например, азота от времени t удовлетворительно описываются соотношениями:

$$\text{для сухого песка } m = 0,93 / \sqrt{t}; \quad (2)$$

$$\text{для влажного песка } m = 1,2 \sqrt{t}; \quad (3)$$

$$\text{для сухого песка с просачиванием } m = 2,5 \sqrt{t}. \quad (4)$$

Те же данные опытов по испарению СПГ с сухого песка без просачивания удовлетворительно описывается зависимостью (1) и с учетом теплофизических характеристик песка и СПГ принимает вид:

$$m = 0,305 \sqrt{t} \quad (5)$$

Различие в коэффициентах связано с изменением теплофизических характеристик песка при добавлении в него влаги.

Выявлены особенности аварийных ситуациях, связанные с выходом (выбросом) криогенных топлив на неограниченную и ограниченную поверхности

Проведенные экспериментально-аналитические исследования показали, что защитные преграды (обвалования), применяемые для ограничения площади пролива криогенных топлив из резервуара, могут быть недостаточно эффективны. До 30 % содержащейся в резервуаре жидкости может преодолеть преграду и привести к увеличению площади ее разлития. Эффективным средством борьбы с этим явлением является устройство внутри существующих границ обвалования устройство дополнительных преград.

Соответственно двум сценариям пролива криогенных жидкостей (мгновенное или длительное истечение) на ограниченную или на неограниченную поверхность разработаны физико-математические модели растекания при их утечке. Эти модели, в свою очередь, реализованы в виде методов оценки опасных факторов пожара при различных сценариях пожаров, взрывов на территории объекта и в селитебной зоне вблизи объекта.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПИРОЛИЗА ПЛАСТИКА И СЖИГАНИЯ ПИРОЛИЗНЫХ ГАЗОВ ДЛЯ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ

Трушляков В.И.¹, Русских Г.С.¹, Давыдович Д.Ю.¹

¹*Омский государственный технический университет, Омск, Россия*

@d-davydovich@mail.ru

Рассматривается процесс утилизации нефтепродуктовой тары из пластика на основе её измельчения и последующего пиролиза с дожиганием пиролизного газа в дожигательной установке. Использование полученной теплоты осуществляется в двух направлениях: на обеспечение процесса пиролиза и получения электрической энергии на основе использования, например, термоэлектрических способов. Известен ряд исследований по утилизации пластика на основе пиролиза и последующего дожигания пиролизного газа для получения теплоты, например, для систем теплоснабжения [1, 2], электроэнергии [3, 4]. Специфика предлагаемого исследования заключается в создании экспериментальной лабораторной установки (ЭЛУ) на основе теории подобия с целью выбора параметров производственной утилизационной установки на основе процесса пиролиза с рекуперацией теплоты в электрическую энергию, заданной производительностью по утилизации и эффективной мощности электрической энергии. Дополнительным ограничением является состав и содержание токсичных веществ в дымовых газах дожигательной установки. В качестве критерия потерь тепловой энергии принимается температура дымовых газов на выходе из дожигательной камеры. Математическое описание создаваемой ЭЛУ, помимо использования теории подобия, осуществляется численными методами с помощью специальных пакетов численного моделирования Ansys [5, 6], включающими в себя определение теплофизических характеристик измельченного полимерного материала в зависимости от степени измельчения и температуры нагрева, сравнение полученных результатов с результатами других исследований.

Полученные результаты для моделирования тепло-и массообмена в пиролизной и дожигательной камерах ЭЛУ являются исходными данными для проектирования системы утилизации, включающей в свой состав три установки: пиролиза, дожигания и прямого получения электричества, например, на основе эффекта Пельтье [7]. На первом этапе создания утилизационной установке рассматривается ЭЛУ, а на последующем этапе создание ряда

промышленных утилизационных установок с различной производительностью и габаритными размерами.

- [1] Raveh-Amit H., 2022, Catalysts. **12**. 140
- [2] Liu X., 2021, Appl. Energy. **289**. 116662
- [3] Bacskai I., 2019, Resources. **8**. 79
- [4] Salvador J., 2013, J. Electron Mater. **42**. 1389-1399
- [5] Rudniak L., 2017. Chem Eng Process. **38(3)**. 445-454
- [6] Simsek E., 2009. Powder Technol. **193(3)**. 266-273
- [7] Soto M.A., 2005. IEEE. 219-221

ПЛЕНОЧНЫЕ ПИРОЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Димухаметов Р.Р.®, Мельников Н.С., Кузнецова А.А., Шарова А.П.,
Кнутов А.А.

*ФГОУ ВО Казанский национальный исследовательский
технологический университет*

@dim_rus2000@mail.ru

Одним из известных способов модификации энергонасыщенных материалов (ЭНМ) является изменение размеров частиц методом осаждения их из растворов [1,2].

В работе проанализированы технологии изменения размеров частиц известных иницирующих взрывчатых веществ (ИВВ), применяемых в производстве средств иницирования: кристаллического стифната (тринитрорезорцината) свинца (ТНРС), стифната бария (СБ), стифната калия (СК), диазодинитрофенола (ДДФ), тетразена (Тн).

Применение, предложенных авторами, новых подходов модификации приводят к уменьшению размеров частиц получаемых ИВВ. Проанализированы свойства полученных ИВВ с уменьшенными размерами частиц, предложены новые области их применения. Выявленные подходы по снижению размеров частиц изученных ИВВ позволяют предложить применение их в виде водной суспензии или пасты [3].

С целью выявления характера протекания цепных экзотермических реакций рассматриваемых ЭНМ на основе модифицированных ИВВ были проведены исследования по визуальному анализу процессов, происходящих в данных системах при практическом применении.

Были изготовлены пироэлементы в виде пластин-подложек из древесной целлюлозы (картона) и стеклоткани с нанесенной на их поверхности тонким слоем (50 мкм) пленки ЭНМ на основе модифицированных ультрадисперсных ИВВ известным методом, применяемым в лакокрасочной промышленности [4].

При помощи высокоскоростной камеры марки Casio EX-ZR1000 был определен характер и скорость протекания

экзотермических реакций в пленочных изделиях на основе модифицированных ЭНМ.

Выявлено, что характер и скорость протекания экзотермических реакций носит не детонационный характер, а имеет вид послыного горения. Скорость протекания экзотермических реакции разработанных ультрадисперсных ИВВ в данных условиях составляет от 20 до 100 мм/с, при этом наблюдается интенсивное выделение дисперсных продуктов и пламени.

[1] Багал Л.И. Химия и технология инициирующих взрывчатых веществ. М., «Машиностроение», 1975, 456 с.

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

[3] Гельфман М.И. Коллоидная химия/ М.И. Гельфман СПб.:Издательство «Лань», 2004. 336 с.

[4] А.Д. Яковлев, В.Г. Евстигнеев, П.Г. Гисин Оборудование для получения лакокрасочных покрытий. Учебное пособие для вузов. – Л.: «Химия», 1982 – 192 с.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ УТИЛИЗАЦИИ ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ РАКЕТ ПУТЕМ ИХ СЖИГАНИЯ

Трушляков В.И.¹, Иордан Ю.В.^{1@}

¹*Омский государственный технический университет, Омск, Россия*

@ iordanyuliya@gmail.com

Рассматривается процесс сжигания элемента конструкции головного обтекателя (ГО) ракеты-носителя, изготовленного из полимерного композиционного материала (ПКМ). Концепция утилизации ГО, с целью сокращения площадей районов их падения, основана на замене применяемого в настоящее время ПКМ на основе углепластика на другой материал, отвечающий требованиям пожаровзрывобезопасности, эксплуатационным и другим требованиям [1, 2]. Проведенные исследования по утилизации элемента конструкции ГО с помощью пиротехнических составов [3], механически активированных составов [4], энергетических материалов [5] показали, что утилизировать существующую конструкцию возможно, но для этого требуется существенное увеличение массы энергетического материала и, соответственно, массы конструкции ГО.

Специфика дальнейшего исследования заключается в поиске ПКМ, исключая существующий ПКМ на основе углепластика, энергетического материала, конструкции размещения энергетического материала в ГО, отвечающих всем требованиям на этапах разработки, эксплуатации и утилизации (путем сжигания на траектории спуска ГО).

[1] Monogarov, K., 2018, Acta Astronautica. **150**. 49-55

[2] Trushlyakov V., 2019, Acta Astronautica. **157**. 1-8

[3] Trushlyakov V., 2017, Procedia Engineering. **174**. 4-10

[4] Korchagin M.A., 2017, Combustion, Explosion and Shock Waves. **53(6)**. 669-677

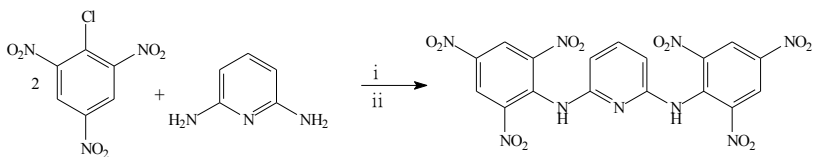
[5] Trushlyakov V.I., 2021, J. of Spacecraft and Rockets. **58(4)**. 1200-1206

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕРМОСТОЙКОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА РУХ

Путис С.М., Мершин А.Ю., Бармашова Д.В., Козлов А.С.®,
Семашкин Г.В., Котомин А.А., Душенюк С.А.
ФГУП «СКТБ «Технолог», г Санкт-Петербург
@TOOL999@narod.ru

В последнее время очень активно развивается химия перспективных термостойких энергонасыщенных соединений, содержащих в своей структуре различные гетероциклические заместители [1]. К таким соединениям можно отнести 2,6-бис(2,4,6-тринитрофениламино)-3,5-динитропиридин (РУХ). Несмотря на то, что данное соединение было впервые синтезировано и описано Кобурном М.Д. ещё в 1972 году [2], в России это соединение было впервые описано в 2016 г и получило название «Пирин» [3]. Интерес к нему проявился только в последнее время в связи с возможностью использования в космической области и нефте-газодобыче [4].

Синтез РУХ, известный к настоящему моменту, достаточно прост и заключается в алкилировании пикрилхлоридом 2,6-диаминопиридина по экзоциклическим атомам азота, в среде ДМФА, с последующим нитрованием. Однако суммарный выход не превышает 60-65 % и не позволяет его нарабатывать в больших количествах. В настоящей работе нами разработан метод, позволяющий получать РУХ с выходом до 85 %.



i = MgCO₃, ii = i-PrOH, reflux, 3 h

Схема 1.

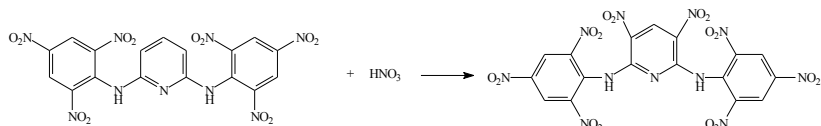


Схема 2

В качестве среды на стадии алкилирования использовали изопропиловый спирт, в котором исходные компоненты (пикрилхлорид и 2,6-диаминопиридин) хорошо растворимы, при этом конечное соединение (2,6-бис(пикриламино)пиридин) нерастворимо. Выход при алкилировании около 90 %, а чистота продукта более 98 %. Последующее нитрование концентрированной азотной кислотой (не содержащей окислы азота) позволяет получить РУХ с выходом 95 % и чистотой более 99 %.

Строение, индивидуальность и состав полученного соединения подтверждены методами ЯМР (^1H , ^{13}C и COSY (^1H , ^{13}C)), ИК- и УФ-спектроскопии, тонкослойной хроматографией, а также элементным (C,H,N) анализом.

[1] J. Sarlauskas, J. Vaitiekunas, J. Tamuliene, Proceedings of the 21st Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice, 2018, p.1080-1094.

[2] Coburn M.D., inventor; US Atomic Energy Com., assignee. 2,6-bis(picrylamino)-3,5-dinitropyridine and a method for its preparation. United States patent US 3,678,061. 1972 July 18.

[3] Н.И. Торуткина, И.Ф. Фаляхов, Р.З. Гильманов, А.С. Сальников, В.Я.Базотов. Термостойкий Энергонасыщенный состав на основе пирина. Весник технологического университета. – 2016, – Т.19, № 19. –С.34-36.

[4] В.Я. Базотов, А.А. Мокеев, А.В. Станкевич, Т.П. Евсева, А.П. Евдокимов. Изучение параметров функционирования коаксиально-слоевого кумулятивного заряда промышленного назначения. Взрывное дело. – 2015. – № 114-71. – С. 242-251.

КРИТИЧЕСКИЕ ДИАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ СУСПЕНЗИЙ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В НИТРОМЕТАНЕ

Котомин А.А. @, Душенок С.А., Козлов А.С.
ФГУП «СКТБ «Технолог», г Санкт-Петербург
@akotomin@mail.ru

Детонационная способность многих твердых индивидуальных ВВ с различными химическим строением и дисперсностью, ряда жидких ВВ и их растворов друг в друге и в инертных растворителях, а также смесей твердых ВВ разной дисперсности друг с другом и с различными органическими и неорганическими инертными веществами хорошо известна [1-3]. Однако, детонационная способность смесей твердых и жидких ВВ (суспензий ВВ) исследована мало, хотя они являются частью составов пластизольных и пастообразных взрывчатых композиций, широко используемых на практике [4-5].

В данной работе, начатой в 2011 году [6], экспериментально исследованы критические диаметры детонации суспензий ряда кристаллических ВВ (ТЭНа, гексогена, октогена, Fox-7) различной дисперсности (удельная поверхность 350 - 7000 см²/г) в нитрометане. Удельная поверхность ВВ определялась по их газопроницаемости на приборе ПСХ-12. Суспензии готовились вибро-вакуумным способом. Седиментационная устойчивость и однородность суспензий обеспечивалась загущением их небольшой добавкой аэросила (2,5% мас.). Заряды суспензий изготавливались в тонкостенных лавсановых трубках различного диаметра. Таким образом определялись критические диаметры детонации суспензий ВВ (d_k) практически без оболочки. Точность определения d_k составляла 0,5 мм. Для чистого нитрометана $d_k=18$ мм, загущенного $d_k=19,5$ мм. Объемная доля кристаллических ВВ в суспензиях составляла 0,02-0,49.

В результате исследований получен большой массив экспериментальных данных. Установлено, что зависимости критических диаметров детонации суспензий от объемной доли твердых ВВ имеют S – образный вид, отражающий, по видимому, изменение времени разложения компонентов в зоне химической реакции в детонационной волне. Показано влияние удельной поверхности ВВ на эти зависимости.

Полученные зависимости для суспензий твердых ВВ в нитрометане сопоставлены с аналогичными экспериментальными зависимостями для других взрывчатых систем: растворов жидких ВВ в

нитрометане; растворов твердого ВВ в нитрометане; бинарных смесей высокодисперсных твердых ВВ; бинарных смесей грубодисперсного и высокодисперсного ВВ; составов, содержащих смеси грубодисперсного и высокодисперсного ВВ и инертное связующее [1]. Показано, что такой же S – образный вид как для суспензий имеют зависимости для бинарных смесей твердых грубодисперсного и высокодисперсного ВВ (отчетливо выраженных гетерогенных систем).

[1] Котомин А. А. Эмпирические методы расчета взрывчатых веществ и композиций : монография / А. А. Котомин, С. А. Душенюк, А. С. Козлов. – Санкт-Петербург : Лань, 3-е издание, 2022. — 384 с.

[2] Котомин А.А., Душенюк С.А., Козлов А.С. Критические диаметры детонации гетерогенных взрывчатых систем. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2013. № 21 (47). С. 43-51.

[3] Воскобойников И.М., Душенюк С.А., Котомин А.А. Критические диаметры детонации растворов бис(фтординитроэтил)-формала // Химическая физика. Т. 17. № 11. 1998. С. 130-139.

[4] Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь // Под ред. Б.П. Жукова. Изд. Второе, М.: “Янус-К”. 2000. 595 с.

[5] Е.И. Ермолович, Е.М. Евстифеев, А.Б. Севастьянов, В.П. Ильин, В.Г. Кожевников. Детонационные параметры и уравнение состояния пластизольного ВС ОЛД-20. Труды межд. конф. XIII Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 14-18 марта 2011г., С. 64-66.

[6] Жёлтиков Ф.А., Котомин А.А., Козлов А.С., Лысов А.Н., Душенюк С.А. Исследование детонационной способности смесей твердых и жидких взрывчатых веществ. Сб. тезисов докл. науч.-техн. конф. молодых ученых “Неделя науки - 2011” Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), 30 марта- 1 апреля 2011 г, с. 75.

СТОЙКОСТЬ К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОКИСЛЕНИЮ ГАЗОПРОНИЦАЕМЫХ СВС-ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ

Мазной А.С.[@], Пичугин Н.С., Кирдяшкин А.И., Гушин А.Н.

Томский научный центр СО РАН

@maznoy_a@mail.ru

Продолжительность эксплуатации газопроницаемых металлических изделий в условиях окисления прямо пропорциональна квадрату характерного размера структурных элементов, формирующих пористый каркас, и обратно пропорциональна константе параболического закона окисления. Чтобы эксплуатировать изделие один год при температуре 1150 °С размер элементов каркаса из Fe-Ni-Cr стали должен быть от 5 мм, тогда как для Ni-Al интерметаллидов достаточно 200-500 микрометров. Перспективным методом получения крупнопористых изделий из Ni-Al интерметаллидов является самораспространяющийся высокотемпературный синтез. Если в методах классической порошковой металлургии размер пор в основном определяется размером используемых порошков, то структура СВС интерметаллидов определяется процессам взаимодействия расплавов порошкового вещества в зоне реакционных превращений. За счёт управления структурой волны СВС можно получать газопроницаемые материалы с размером элементов каркаса от сотен микрометров до единиц миллиметров при использовании одних и тех же реакционных порошков с размером частиц менее 50 мкм

В ТНЦ СО РАН разработана технология прямого СВ-синтеза крупнопористых интерметаллидных изделий [1], перспективных к применению в качестве тонкослойных цилиндрических излучателей радиационных горелок. Данный дизайн горелки позволяет использовать внутренний режим стабилизации пламени, за счёт которого могут достигаться максимально высокие величины радиационного КПД (эффективности преобразования тепла продуктов сгорания в инфракрасный поток) при сжигании широкой номенклатуры газообразных топлив: от высококалорийных синтезгазов до бедных биогазов [2–4].

Окислительная стойкость крупнопористых интерметаллидных материалов, полученных методом СВС из порошков металлов чистотой не выше 99.9%, остаётся малоизученной. Для успешного использования горелок на практике необходимо определить оптимальные состав и структуру сплава, которые способны обеспечить срок службы от 10000 часов и более, особенно в условиях циклической работы.

В докладе будут представлены результаты исследований циклической окислительной стойкости пористых Ni-Al-Cr СВС-сплавов в условиях контролируемой газовой среды при температуре 1150 °С, а также горелок на основе данных сплавов в условиях реальной эксплуатации при сжигании бедных смесей природного газа с воздухом. Будут обсуждаться влияние концентрации алюминия и хрома на окислительную стойкость сплавов, а также методики оценки продолжительности эксплуатации сплавов и горелок на их основе при высоких температурах.

Работа выполняется в рамках проекта РФФ № 21-79-10445

- [1] Maznoy A., Kiryashkin A., Kitler V., Pichugin N., Salamatov V., Tsoi K., 2019, J. Alloys Compd. **792**. 561–573
- [2] Мазной А., Кирдяшкин А., Гущин А., Пичугин Н., Китлер В., 2018, Горение и Взрыв. **11. №3**. 21–27
- [3] Мазной А., Кирдяшкин А., Пичугин Н., 2018, Горение и Взрыв. **11. №2**. 56–65
- [4] Мазной А., Яковлев И., Пичугин Н., Замбалов С., Цой К., 2021, Горение и Взрыв. **14. №3**. 35–42

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ НА ГОРЕНИЕ СМЕСЕВЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ

Нарыжный С.Ю., Фоменко В.В., Ахтырский М.В., Кузаков А.С., Десятов С.В., Путис С.М., Пущин О.Д., Душенок С.А., Котомин А.А., Козлов А.С.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Специальное конструкторско-техническое бюро «Технолог» (ФГУП «СКТБ «Технолог»), 192076, г. Санкт-Петербург, Советский пр., 33-а sergei.nar@bk.ru

В данной работе исследуется влияние дисперсности перхлората аммония на характеристики смесевых ракетных топлив (СРТ). В качестве модельных составов СРТ использовались пастообразные ракетные топлива (ПРТ) [1] на основе перхлората аммония (ПХА) и хлорноокислого энергонасыщенного самогорящего связующего, применяемого в работе [2]. В исследовании рассматривалось влияние следующих фракций ПХА: 110-180, 15-40, и <10 мкм. Предварительно были выполнены термодинамические расчеты характеристик модельных составов.

Экспериментальные работы по определению характеристик горения модельных составов проводились на манометрической установке высокого давления (УВД) при давлениях до 120 МПа и модельном ракетном двигателе (МРД) диаметром 30 мм при давлениях до 25 МПа. Отдельно были исследованы реологические характеристики модельных составов.

По результатам исследований выявлен характер влияния дисперсности ПХА на скорость горения и реологию модельных составов, определены параметры процесса горения.

1. Сорокин В.А., Яновский Л.С., Животов Н.П. и др. Ракетно-прямоточные двигатели на твердых и пастообразных топливах. М: Физматлит. 2010. 320с.

2. С. Ю. Нарыжный, А. С. Козлов, В. Ю. Долматов, В. В. Фоменко и др. Влияние модификации тетриловых детонационных наноалмазов на горение модельных пастообразных ракетных топлив. Физика горения и взрыва. 2021. Т. 57. №6. С. 48-55.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ДЕТОНАЦИОННЫХ НАНОАЛМАЗОВ (ДНА) НА ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ СМЕСЕВЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ

Нарыжный С.Ю., Долматов В.Ю., Козлов А.С., Фоменко В.В.,
Семашкин Г.В., Марчуков В.А., Десятов С.В., Кузаков А.С.
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог», г.
Санкт-Петербург
sergei.nar@bk.ru

В данной работе исследовалось влияние детонационных наноалмазов (ДНА) на характеристики горения смесевых ракетных топлив (СРТ). Основным объектом исследования являлись ДНА, которые являются уникальным материалом, сочетающим в себе свойства достаточно пассивного алмазного ядра с активной углеродной оболочкой. В качестве модельных составов использовалось пастообразное ракетное топливо (ПРТ) [1], которое является неотверждённым СРТ.

Использование ДНА для увеличения скорости горения СРТ показало свою актуальность в работе [2]. В данном исследовании более глубоко было изучено сравнительное влияние ДНА различных способов получения на скорость горения СРТ, проведены работы по сравнению эффективности способов введения добавки в состав. Предварительно были проведены термодинамические оценки данных модельных составов. В рецептурах модельных составов использовались активное горючее связующее на хлорно-кислой основе и перхлорат аммония в качестве окислителя. Наибольшая прибавка в скорости горения модельного состава с использованием ДНА составила 23% от скорости горения исходного модельного состава при давлении в камере сгорания 10 МПа.

По результатам исследований выявлены закономерности влияния добавления ДНА на СРТ с применением разных способов введения, в работе приведены сравнительные таблицы.

1. Сорокин В.А., Яновский Л.С., Животов Н.П. и др. Ракетно-прямоточные двигатели на твердых и пастообразных топливах. М: Физматлит. 2010. 320с.

2. С. Ю. Нарыжный, А. С. Козлов, В. Ю. Долматов, В. В. Фоменко и др. Влияние модификации тетриловых детонационных наноалмазов на горение модельных пастообразных ракетных топлив. Физика горения и взрыва. 2021. Т. 57. №6. С. 48-55.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СМЕСЕЙ ПОРИСТОЙ АММИАЧНОЙ СЕЛИТРЫ С ДИЗЕЛЬНЫМ ТОПЛИВОМ

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

¹ИСМАН, г.Черноголовка, Московская обл., Россия

²ООО "Битруб Интернэшнл", г. Красноармейск, Россия

@ opervukhina@mail.ru

Высокое качество крупногабаритных двухслойных листов и круглогодичность их производства методом сварки взрывом обеспечиваются в первую очередь энергоносителем – взрывчатым веществом (ВВ). При этом используются плоские заряды площадью до 30 м² и толщиной заряда близкой к толщине, соответствующей критическому диаметру ВВ. Для получения качественного биметалла необходимо сплечить распространение детонации по заряду с малой скоростью в пределах 2000...3500 м/с. Для обеспечения этих условий широко используются механические смеси аммиачной селитры с дизельным топливом (ДТ) — АСДТ (ANFO).

Применительно к сварке взрывом двухслойных листов проведено сравнение типов аммиачной селитры: молотой, гранулированной гладкой и пористых, изготовленных по различной технической документации (ТУ 113-03-00203789-16-93, ТУ 2143-036-00203789-2003 и ТУ 2143-073-05761643-2013). Выявлена возможность повышения стабильности детонации плоских крупногабаритных зарядов АСДТ за счет использования гранулированной пористой аммиачной селитры (ПАС) и слоя инертной засыпки из песка (забойки). Применение в качестве промышленных ВВ при сварке взрывом АСДТ из гранулированной ПАС позволяет механизировать процесс приготовления смеси, обеспечить высокое качество сварки за счёт стабильности состава и плотности заряда по всей его поверхности.

Исследовано влияние на процесс детонации пропитывающей способности аммиачной селитры, марки ДТ, температуры и влажности. Установлено, что при понижении температуры ниже 5°С в летнем ДТ (марка Л) происходит выпадение парафинов, что резко снижает пропитываемость гранул и как следствие ведёт к нестабильности детонации. В связи с этим, при снижении температуры воздуха ниже 10°С, рекомендуется использовать зимние марки ДТ или присадки для исключения выпадения парафинов.

При механизированном производстве смесей АСДТ равномерное распределение ДТ по объёму достигалось при использовании

ПАС, произведённой в ПАО «АКРОН» по ТУ 113-03-00203789-16-93 и ТУ 2143-036-00203789-2003. Вследствие высокой впитывающей способности ПАС, произведённой в компании ЕвроХим по ТУ 2143-073-05761643-2013 (не менее 12 % к ДТ) равномерного распределения 5,5% ДТ по объёму добиться невозможно, даже при увеличении времени смешивания.

Высокой стабильностью детонации обладает смесь АСДТ с применением ПАС, изготовленной по ТУ 2143-036-00203789-2003, даже при толщине заряда равного критическому диаметру и содержанием ДТ 4%. Смесь АСДТ с применением ПАС (ТУ 113-03-00203789-16-93) стабильно детонирует при содержании ДТ не менее 5,5%.

Неравномерное пропитывание дизельным топливом гранул ПАС изготовленной по ТУ 2143-073-05761643-2013 привело к увеличению критического диаметра АСДТ в 2 раза и нестабильной детонации, а в ряде экспериментов затуханию детонации на расстоянии 1 м от начала инициирования плоского заряда с забойкой.

Экспериментально исследовали влияние добавки воды в ПАС (изготовленную по ТУ 2143-073-05761643-2013) на впитывающую и удерживающую способность ДТ. В результате установлено, что смешивание ПАС с водой приводит к закупорке части микропор, что снижает её впитывающую способность, но не снижает удерживающую способность. При добавлении 2% воды по массе в ПАС (ТУ 2143-073-05761643-2013), впитывающая способность снижается примерно до 8...9 %, то есть становится близкой к АСДТ с применением ПАС, изготовленной по ТУ 2143-036-002-3789-2003. Критический диаметр смеси АСДТ с применением ПАС (ТУ 2143-073-05761643-2013) и с добавлением 2% воды и 5,5% ДТ, уменьшился в 2 раза. Эксперименты по измерению скорости детонации АСДТ показали, что добавление воды при содержании ДТ до 5,5% обеспечивает стабильную детонацию плоских крупногабаритных зарядов по всей поверхности с увеличением скорости детонации в 1,5 раза по сравнению с АСДТ без воды.

Результаты экспериментальных исследований подтверждены при промышленном производстве в ООО "Битруб Интернэшнл" методом сварки взрывом крупногабаритных двухслойных листов (площадью до 26 м²) с лакирующим слоем толщиной 3 - 6 мм из коррозионностойкой стали и титана. Двухслойные листы соответствовали требованиям ГОСТ 10885-85 и соответствующим техническим условиям: сплошность соединения слоёв 100%, прочность на отрыв и срез лакирующего слоя не менее 200 МПа, соединение имеет структуру, характерную для сварки взрывом.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУЕ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА В УСЛОВИЯХ ТОПОЧНОГО ПРОСТРАНСТВА

Садкин И.С.^{1,®}, Шадрин Е.Ю.¹, Мухина М.А.¹, Кошьев Е.П.¹

¹*Институт теплофизики СО РАН*

@ sadkinvanya@mail.ru

Авторами разработано новое горелочное устройство для сжигания широкого спектра жидких топлив (включая некондиционные жидкие углеводороды и отходы), основанное на принципе распыления и сжигания в высокоскоростной струе перегретого водяного пара [1,2], и адаптированное к использованию внутри топочного пространства, рисунок 1.

В работе проводится экспериментальное исследование характеристик работы устройства в условиях водогрейного котла при сжигании дизельного топлива с определением полноты сгорания топлива и вредных выбросов.

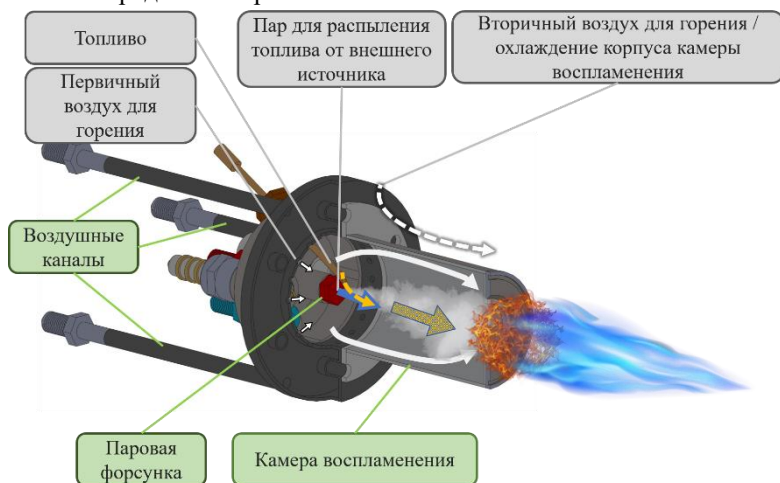


Рис. 1. Принципиальная схема горелочного устройства

Предложенная схема диспергирования топлива позволяет использовать различные жидкие горючие углеводороды (дизель, отработанное масло, мазут) обеспечивая длительный ресурс работы горелки без использования топливных форсунок и высокие экологические показатели благодаря физико-химическим эффектам

присутствия перегретого водяного пара даже в горелках небольшой мощности (15-40 кВт) [2-4].

Новизной настоящих исследований является комплексное управление определяющими режимными параметрами горелочного устройства (расход пара, коэффициент избытка воздуха внутри горелки, расход вторичного воздуха) в условиях топочного пространства.

Основным значимым результатом работы является успешное испытание разработанной горелки в закрытом пространстве в условиях типового водогрейного котла Viessmann Vitola 200.

Установлено, что полнота сгорания топлива в условиях котельной установки сохраняется на высоком уровне и составляет около 44,5-45 МДж/кг, что близко к высшей теплоте сгорания дизельного топлива (достигается за счет того, что в калориметре, через которых проходят уходящие газы, происходит конденсация влаги дымовых газов, и потери теплоты с уходящими газами минимальны. На установках не-конденсационного типа тепловыделения будут на уровне низшей теплоты сгорания).

Концентрации токсичных оксидов азота и монооксида углерода на выходе из калориметра соответствуют европейскому нормативу EN: 267: $CO < 60$ мг/кВт, $NO_x < 120$ мг/кВт, удовлетворяя самому строгому экологическому классу (третьему).

Таким образом, в ходе опытных испытаний подтверждена эффективность технологии низкоэмиссионного сжигания в струе водяного пара, а разработанное горелочное устройство является перспективным для решения задач по безопасной утилизации жидких горючих отходов с получением дешевой тепловой энергии.

Исследования были выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2020-806)

[1] Anufriev I.S., Kopyev E.P., 2019, Fuel Proces. Tech. **192**. 154-69

[2] Anufriev I.S., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Mukhina M.A. 2021, Fuel. **290**. 120100

[3] Anufriev I.S., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V., Butakov E.B., Vigrayanov M.S., Sadkin I.S., 2021, Thermal Science. **25 (1)**. 331-45

[4] Алексеев С.В., Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Копьев Е.П., Садкин И.С., Шарыпов О.В., 2020, Прикладная механика и техническая физика. **61 (3)**. 11-18

К разработке метода переработки отходов в условиях Крайнего севера

Тарасов Г.А.^{1,@}, Полианчик Е.В.¹, Яновский Л.С.^{1,2,3}, Сорокин В.А.⁴,
Гуревич О.С.³

¹ *Институт проблем химической физики Российской академии наук,
Черноголовка, МО*

² *Российская академия ракетных и артиллерийских наук, г. Москва*

³ *Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет), г. Москва*

⁴ *АО «Машиностроительное конструкторское бюро «Искра» имени
Ивана Ивановича Карпукова», г. Москва*
@ tarasovjora@yandex.ru

Общая для России проблема загрязнения территорий отходами человеческой жизнедеятельности в зоне вечной мерзлоты и прилегающих территорий приобретает особенно острый характер вследствие хрупкости арктических экосистем и крайне медленного протекания процессов естественного разложения отходов. Для районов Крайнего севера можно выделить и специфичную проблему – складирование бочек с остатками ГСМ рядом с пунктами их использования. Так по результатам исследования Минприроды РФ по состоянию на 2015 год только на Земле Франца-Иосифа накопилось 20 000 тонн черного лома [1].

С целью уменьшения объемов образования новых отходов предлагается всю допускающую это по ТУ не вывозимую металлическую тару заменить на пластиковую с целью ее последующей утилизации. С технико-экономической точки зрения бы рассмотрены различные способы обращения с пластиковыми отходами, которые будут образовываться в случае принятия такого решения.

В докладе будут представлены результаты технико-экономического исследования существующих вариантов обращения с отходами в условиях Крайнего севера и рассмотрены научные основы применения газификатора шахтного типа с движущимся слоем для утилизации отходов в условиях дальнего севера.

В технико-экономическом исследовании рассматривались следующие варианты обращения с отходами, дробление с последующим прессованием и вывозом до места утилизации, сжигание на месте, сжигание на месте при помощи передвижной установки и другие.

Технико-экономический анализ показал, что дробление с последующим прессованием и вывозом является нежелательным по причине больших рисков и скрытых операционных затрат в логистической цепи. Проблемой сжигания на месте является излишняя производительность существующих инсинераторных установок, что приведёт к ее малой загруженности и потери рентабельности. Для ее улучшения можно сжигать весь образующийся мусор, но потребуются более глубокая очистка продуктов сгорания из-за увеличения разнообразия морфологического состава. Данный вариант возможен к применению в местах с образованием отходов до 100-150 кг в сутки. Передвижная установка является хорошим решением для групп объектов, расположенных рядом и не обладающих большими объемами образования, и должна применяться совместно с баками накопителями. Применение газификатора шахтного типа с движущимся слоем и камерой дожигания [2] вместо инсинератора позволяет добиться необходимых экологических показателей без установки сложных систем очистки. Это приведет к упрощению в обслуживании и уменьшению операционных затрат. Ввиду этого экономически данный вариант оценивается не хуже выше изложенных и CAPEX ожидается до 10-20% дешевле. Масштабируемость технологии позволяет подстроить ее как под вариант переработки на месте, так и в передвижном виде. Вырабатываемое тепло можно использовать в теплообменниках, где не используется вода, а также в элементах Пельтье для выработки электрического тока.

[1] Шевчук Анатолий Васильевич, Шумихин Олег Вячеславович ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛИКВИДАЦИИ НАКОПЛЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА В АРКТИКЕ // Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика. 2019. №4.

[2] Способ газификации твёрдого топлива и устройство для его осуществления: пат. 2730063 Рос. Федерация: МПК F23G 5/027, F23B 80/02, F23C 9/00, C10J 3/22 / Баканов К. Д., Глазов С. В., Жирнов А. А., Зюбин Л. В., Полианчик Е. В.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Альтернативные тепловые технологии" (ООО АТТ), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики Российской академии наук (ИПХФ РАН). – № 2019111407; заявл. 16.04.2019; опубл. 17.08.2020, Бюл. № 23.

ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА В ИМПУЛЬСНОМ ГАЗОДЕТОНАЦИОННОМ АППАРАТЕ

Штерцер А.А.[®], Ульяницкий В.Ю., Рыбин Д.К., Батраев И.С.
*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия*
@ asterzer@mail.ru

Для снижения выброса парниковых газов промышленностью в большинстве стран планируется переход к водородной энергетике. При этом потребуются значительное увеличение производства водорода, 80-85% которого получают паровым риформингом метана. Характерно, что при доставке к потребителям до 70% стоимости водорода составляют затраты на его транспортировку и хранение, обусловленные различными причинами (водородное охрупчивание металлов, обеспечение мер безопасности и т.д.). В связи с этим интерес представляют технологии, которые позволяют получать водород как можно ближе к местам его использования из некоторого промежуточного продукта переработки метана, например, ацетилена, транспортировка и хранение которого давно налажены. При этом ацетилен можно получать разложением метана в низкотемпературной плазме по реакции $2\text{CH}_4 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + 3\text{H}_2 - 377 \text{ кДж}$ [1], так что уже на этапе получения C_2H_2 производится водород. Для получения H_2 из ацетилена наиболее предпочтителен детонационный способ разложения C_2H_2 , поскольку при этом производится еще один ценный продукт – наноразмерный детонационный углерод (НДУ) [2]. С точки зрения максимальной безопасности процесса желательно его проводить при начальном атмосферном давлении газа.

В настоящей работе детонационное разложение C_2H_2 проводилось на описанном в [3] импульсном газо-детонационном аппарате (ИГДА), схематически изображенном на Рис. 1. Поскольку добиться детонации чистого ацетилена при атмосферном давлении затруднительно, изучались условия возбуждения детонации смесей $\text{C}_2\text{H}_2 + k\text{O}_2$ с минимально возможным содержанием кислорода и с применением заряда-бустера из смеси $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2$, инициируемой от свечи зажигания. Максимальный диаметр ствола ИГДА в опытах был 104 мм. Результаты экспериментов представлены на Рис. 2.

Показано, что небольшие добавки кислорода позволяют добиться достаточно высокой эффективности работы ИГДА. Например, аппарат со стволом диаметром 46 мм и длиной 2 м при

работе на смеси $C_2H_2+0,06O_2$ с зарядом-бустером объемом 500 см^3 обеспечивает получение $1,7\text{ кг } H_2$ и $17,7\text{ кг } НДУ$ в час [4].

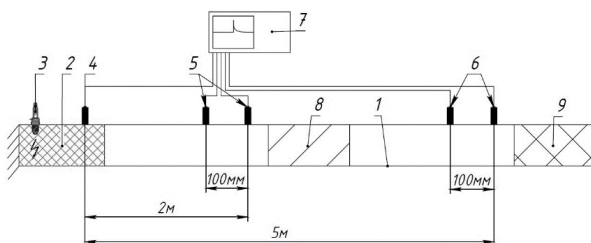


Рис. 1 Схема экспериментального стенда: 1- ствол, 2 – камера смешения-зажигания (заряд-бустер), 3 – свеча зажигания, 4 – датчик запуска осциллографа, 5, 6 – датчики давления ИСР 113b24, 7 – осциллограф Tektronix TDS 2004В, 8, 9 – съемные секции с заклепочной фольгой

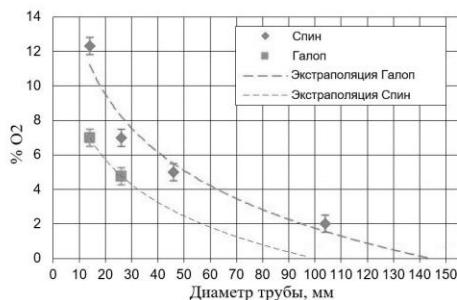


Рис. 2. Зависимость минимальной концентрация O_2 , при которой ацетиленокислородная смесь детонирует, от диаметра ствола

Предложенная технологическая цепочка метан \rightarrow ацетилен \rightarrow водород + НДУ \rightarrow сжигание водорода, в 7,2 раза снижает выброс углерода в атмосферу по сравнению с прямым сжиганием метана.

Исследования выполнялись при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-19-00390.

- [1] Dinh D.K., et al, 2019, RSC Adv. **9**. 32403-413
- [2] Shtertser A.A., et al, 2020, Diamond Relat. Mater. **101**. 107553
- [3] Штерцер А.А. и др., 2018, Письма в ЖТФ. **44(9)**. 65-72
- [4] Shtertser A.A., et al, 2022, Int. J. Hydrogen Energy. **47**.14039-43

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПОТУХАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

Bolodyan I.A.^a, Melikhov A.S.^a, Tanklevskiy L.T.^b

**^aФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, Московская область,
Россия, 143903, e-mail: vniipo@vniipo.ru.**

**^bСанкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого, ул. Политехническая д 29, Санкт-Петербург, 195251,
e-mail: tanklevskiy@gefest-spb.ru.**

При выполнении пилотируемых космических полётов обязательным условием является обеспечение пожарной безопасности в обитаемых гермоотсеках (ОбГО) космических летательных аппаратов (КЛА). Возгорания в ОбГО КЛА происходят в результате широкого применения в них для минимизации массы КЛА полимерных материалов, использования в ОбГО КЛА газовой атмосферы с повышенной до 40% (объёмных) концентрацией кислорода (C_{O_2}) в которой большая часть полимерных материалов является высокогорючей, а также большой насыщенностью ОбГО КЛА сильнотокоагрегуемым электрооборудованием. В частности, особенно часто возгорание элементов оборудования ОбГО КЛА из полимерных материалов возникает от электрических разрядов, образующиеся при аварийном нарушении контакта между токоагрегированными элементами даже в слаботочном электрооборудовании. Риск возникновения пожароопасных ситуаций в ОбГО КЛА вызвал необходимость их оснащение системой пожаротушения. В основу устройства и принципа действия системы легли результаты изучения процессов горения полимерных материалов с кардинально различными свойствами в условиях микрогравитации на космической станции «Мир». Достоверность этих результатов подтверждена широкой их публикацией в открытой печати. При изучении процессов горения полимерных материалов в условиях микрогравитации было установлено существование двух механизмов самопроизвольного потухания элементов из полимерных материалов, которые характеризуют технологию работы системы пожаротушения, в том числе её быстроедействие. Первый механизм реализуется за счёт снижения производительности средств вентиляции в ОбГО КЛА, по команде от системы пожаротушения. В этом случае, в результате вязкостного торможения движения атмосферы в ОбГО КЛА до скорости, меньшей значения V_{lim} для наиболее горючего материала, самопроизвольное

потухание происходит за счет интенсивной теплоотдачи из пламени излучением нагретыми частицами сажи, образующимися при горении полимерного материала. Здесь V_{lim} – скорость газового потока, ниже которой горение данного полимерного материала при данной концентрации кислорода не происходит. Данный механизм потухания в условиях микрогравитации иллюстрируется данными рис. 1.

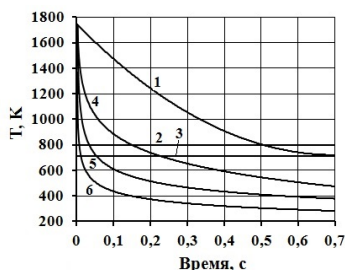


Рис. 1. Снижение температуры пламени и отдельных частиц сажи во времени, за счёт излучения после перехода горячей бумаги в условия микрогравитации, приводящее к потуханию пламени при $C_{ox}=30\%$.

Линии зависимостей на рис.1 характеризуют: 1 – снижение максимальной температуры в зоне пламени бумаги после перехода горящего образца в условия микрогравитации; 2 – температуру, равную 800 K, выше которой происходит свечение частиц сажи в видимом диапазоне спектра излучения, знание которой обеспечивает расчёт параметров теплопередачи нагретых частиц сажи с окружающей средой; 3 – температура самовоспламенения бумаги, равная 710 K при $C_{ox}=30\%$. Кривые 4-6 характеризует снижение температуры отдельно витающих в газовой среде частиц сажи, рассчитанные для частиц радиусом 30 мкм (кривая 4), 10 мкм (кривая 5) и 2,5 мкм (кривая 6) по закономерностям теплопередачи для нагретых частиц сажи. Вторым механизмом самопроизвольного потухания полимерных материалов в условиях микрогравитации реализуется при горении композиционных материалов. Он иллюстрируется данными рис.2, где показано самопроизвольное потухание образца стеклопластика ВПС-7В при наличии набегающего слева газового потока со скоростью, равной 20 см/с.

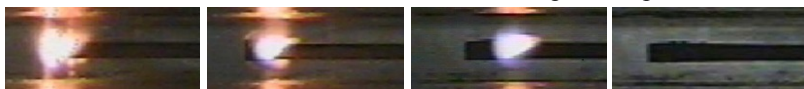


Рис. 2. Процесс самопроизвольного потухания образца стеклопластика ВПС-7В в условиях микрогравитации при $C_{ox}=23,0\%$.

Самопроизвольное потухание элементов из композитов при микрогравитации происходит вследствие отрыва пламени от поверхности материала при расширении пограничного слоя при продвижении пламени.

ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ВЕЩЕСТВ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ КИСЛОРОДНЫМ БАЛАНСОМ

EXPRESS ASSESSMENT OF CALORIFIC VALUE OF SUBSTANCES WITH NEGATIVE OXYGEN BALANCE

В.Ю. Долматов^{1,®}, А.Н. Озерин², Е.Д. Эйдельман³, А.О. Дорохов⁴,
В.А. Марчуков¹, А.С. Козлов¹, С.Ю. Нарыжный¹

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие “Специальное конструкторско-технологическое бюро “Технолог”, Санкт-Петербург, Российская Федерация

² ФГБУН Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, Москва, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴ АО “Завод “Пластмасс”, г. Копейск, Челябинская область, Российская Федерация

[®] diamondcentre@mail.ru

Д.И. Менделеев для всех видов природного топлива предложил свою эмпирическую формулу теплотворной способности топлива:

$$Q_n = 0,339[C] + 1,025[H] + 0,1085[S] - 0,1085[O] - 0,025[W] \quad (1),$$

где в скобках указано процентное (мас. %) содержание соответствующих элементов в составе топлива.

Проверка рассчитанных Q_n по Д.И. Менделееву для органических соединений (спирты, алифатические и ароматические соединения, сахара) в сравнении с экспериментально определенной Q_n дали разброс погрешности от 3 до 18%.

Ориентировочное значение Q горючего с меньшей погрешностью (не >5%) можно определить по кислородному балансу (КБ) вещества, определяемому для соединений $CaHbNcOd$, по широко известной формуле:

$$КБ = \frac{\left[d - \left(2 \cdot a + \frac{b}{2} \right) \right] \cdot 16}{M.m.} \cdot 100\% \quad (2),$$

где М.м. – молекулярная масса вещества.

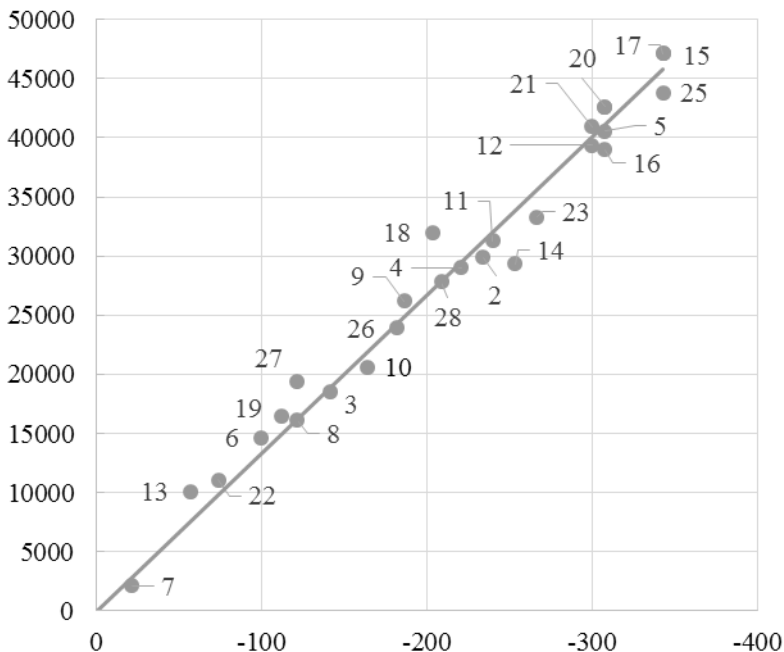


Рис. 1. Зависимость теплотворной способности топлив (y_i) от их кислородного баланса (x_i).

2 – амилацетат; 3 – аммиак; 4 – ацетон; 5 – бензол; 6- гидразин; 7 – гексоген; 8 – глицерин; 9 - димерилформамид (ДМФА); 10 - диметилсульфоксид (ДМСО); 11 – изопропанол; 12 – нафталин; 13 - оксид углерода; 14 – пиридин; 15 – полипропилен; 16 – полистирол; 17 – полиэтилен; 18 - ПЭПА, полиэтилен полиамин; 19 – сахар; 20 – стирол; 21 – толуол; 22 – тринитротолуол; 23 – углерод; 25 – циклогексан; 26 – этилацетат; 27 – этиленгликоль; 28 - этиловый спирт.

Данную прямую описывает уравнение

$$y = 0,1387x \quad (3),$$

где y – теплотворная способность вещества, МДж/кг;

x – абсолютная величина кислородного баланса, %.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ в рамках проекта № 18-29-19112

ВЛИЯНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ДОБАВОК К ВОДЕ НА ПРОЦЕСС ЛОКАЛИЗАЦИИ И ЛИКВИДАЦИИ ГОРЕНИЯ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Жданова А.О.^{1,@}, Свириденко А.С.¹, Стрижак П.А.¹, Копылов Н.П.²

¹Томский политехнический университет, город Томск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский
институт противопожарной обороны, город Балашиха, Россия
@zhdanovaa@tpu.ru

Перспективным направлением локализации и ликвидации возгораний лесного массива является распыление огнетушащих составов на основе воды [1]. Однако влияние дисперсности аэрозоля огнетушащих составов на эффективность подавления пламенного горения и термического разложения твердых горючих материалов не изучено в полной мере. Представляет интерес исследование закономерностей взаимодействия капель воды и составов на ее основе с высокотемпературными продуктами сгорания различных лесных горючих материалов.

Для проведения исследований по определению минимальных объемов огнетушащих составов, необходимых и достаточных для подавления горения лесных горючих материалов применен экспериментальный стенд, приведенный на рис. 1.

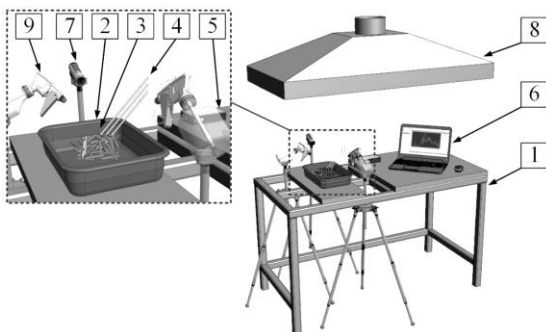


Рисунок 1 – Экспериментальный стенд: 1 – лабораторный стол; 2 – металлический поддон; 3 – горючий материал; 4 – терморпы; 5 – система сбора данных National Instruments; 6 – ноутбук; 7 – видеокамера; 8 – система вытяжки (вытяжной зонт); 9 – система орошения (пульверизаторы).

В таблице 1 представлены радиусы каплей жидкостных аэрозолей огнетушащих составов (R_d); количество впрысков (i), которое необходимо для подавления пламенного горения; времена подавления пламенного горения (τ_{fs}) последовательными впрысками ($i=i_1, i_2, \dots$); минимальные объемы огнетушащего состава (воды) (V_{fec}), необходимые на подавление горения горючих материалов (древесины); времена снижения температуры горючего материала (древесины) после впрыска огнетушащего состава (эмульсии пенообразователя) (τ_{dt}), роста температуры горючего материала (древесины) после ее снижения из-за впрыска огнетушащего состава (эмульсии пенообразователя) (τ_{it}) и достижения температуры навески твердого горючего материала (древесины) < 100 °С после последнего впрыска огнетушащего состава (эмульсии пенообразователя) (τ_{ab}).

Таблица 1 – Зарегистрированные характеристики процесса подавления горения древесины

R_d , мм	i	τ_{fs} , с	V_{fec} , мл	τ_{dt} , с	τ_{it} , с	τ_{ab} , с		
						$h=5$ мм	$h=15$ мм	$h=25$ мм
0.016-0.032	2	5	1.30	2.7	2.2	281.0	297.5	226.0
	2	10	1.30	1.9	1.7	214.8	171.8	97.0
0.016-0.032	2	5	1.30	2.3	2.2	417.2	385.8	318.3
	2	10	1.30	2.3	2.7	387.4	363.6	320.6
0.024-0.072	1	-	0.65	-	-	261.3	238.0	174.3

По результатам анализа таблицы 1 сделан вывод о том, что древесину эффективнее тушить эмульсией пенообразователя (5%) аэрозолем с размерами каплей $R_d=0.024-0.072$ мм.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 21-79-00030, <https://rscf.ru/project/21-79-00030/>).

[1] Kopylov N., Moskvilin E., Fedotkin D., Strizhak P., 2017, *Forestry Engineering Journal*. **6**, 4. 62–67.

ГОРЕНИЕ И ТУШЕНИЕ МЕТАНОЛА

Копылов Н.П.^{1@}, Копылов С.Н.^{1,2}, Федоткин Д.В.^{1,3}, Сушкина Е.Ю.¹,
Новикова В.И.¹

¹*ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, Московская область,
Россия*

²*НИЯУМИФИ, Москва, Россия*

³*НИТУ «МИСиС», Москва, Россия*

@np.nanpb@mail.ru

В различных отраслях промышленности широко используются полярные жидкости, к числу которых относится метанол. Он обладает уникальными физико-химическими свойствами: чрезвычайно пожароопасен, коррозионно-активен, очень токсичен [1].

Эти свойства определяют его характеристики горения и тушения.

Поскольку верхний предел воспламеняемости метанола составляет 35,5% об. (у бензина 6-7 %об.), то пары метанола могут воспламенятся и гореть внутри парового пространства резервуара, в котором он хранится.

Гальваническая коррозия и коррозия контактирующих разнородных материалов в метаноле может быть очень высокой.

Особенно это касается изделий из свинца, алюминия, магния, меди, цинка. Системы пожаротушения, содержащие эти металлы в результате коррозии выходят из строя. Предельно допустимая концентрация метанола в воздухе рабочей зоны составляет 5 мг/м³.

Для тушения пожара метанола может использоваться:

- огнетушащая пена, получаемая из спиртоустойчивых пенообразователей типа AFFF/AR, FFFP/AR, S/AR;

- порошковые, углекислотные огнетушители для небольших проливов метанола;

- распыленная вода, компактные струи.

До появления спиртоустойчивых пенообразователей тушение полярных жидкостей, к которым относится метанол, проводилось методом разбавления водой. [1,2]. При этом установлено, что температура вспышки зависит от содержания воды в метаноле. Экспериментально установлено, что водные растворы метанола воспламеняются примерно до 65% объемного состава воды при температуре 20°С. Теоретически показано, что 75% разбавление метанола водой повышает температуру вспышки до 35°С (температура вспышки метанола 6 °С). В связи с этим можно отметить, что метанол,

разбавленный на 75% водой легко воспламеняется от крупного источника зажигания, например небольшой горелки или неостывшего борта резервуара. Эти оценки следует учитывать при анализе экспериментальных данных по определению критической интенсивности при пенном тушении метанола.

Экспериментально показано, что определение критической интенсивности при пенном тушении метанола по отечественным гостированным методикам дают заниженные результаты. Площадь модельного очага $1,73 \text{ м}^2$ является недостаточной [3].

При выборе размеров модельного очага горения необходимо учитывать прежде всего теплофизические характеристики горючих жидкостей: тепловое излучение, скорость потери массы, скорость выделения тепла. Излучение от факела пламени влияет не только на возможность распространения пожара, но и на скорость выгорания (потери массы (испарения) топлива, и, следовательно, на скорость выделения тепла.

Метанол по сравнению с бензином, гептаном, этанолом имеет более низкую теплоту сгорания. Только 17 % тепла при горении метанола передается излучением, остальное конвекцией, то есть тепловой поток от факела пламени к поверхности горящего метанола меньше, чем для многих других жидкостей.

С ростом площади пожара тепловой поток к поверхности горючего увеличивается до некоторого предела. Также изменяется и скорость выгорания. Выполнена оценка для различных диаметров D модельных очагов горения изменения скорости выгорания m ($\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$): $0,015$ ($D < 0,6 \text{ м}$); $0,022$ ($0,6 < D < 3,0 \text{ м}$); $0,029$ ($D > 3,0 \text{ м}$).

При горении чистого метанола скорость выделения тепла составляет $400\text{-}500 \text{ кВт}/\text{м}^2$ для очагов горения площадью $1\text{-}7 \text{ м}^2$.

Результаты выполненных экспериментальных исследований показали, что при определении критической интенсивности тушения пожара метанола площадь модельного очага, изготовленного из стали должна быть более $3,0 \text{ м}^2$, а толщина его борта равна $6,0 \text{ мм}$ [3].

[1] Methanol Institute. Using Physical and Chemical Properties to Manage Flammable Liquid Hazards. Washington DC. (2011). Available at: <http://www.roberts-roberts.com/documents/Using%20Properties%20to%20Manage%20Flammable%20Liquid%20Hazards.pdf> (accessed 21 January 2022).

[2] Evergen F. proFLASH: Methanol fire detection and extinguishment: SP Rapport 2017:22. /RISE – Research Institutes of

Sweden, Safety and Transport, Safety. (Fire Research) (2017-2019). Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1094660/FULLTEXT02>.

[3] Копылов Н.П., Федоткин Д.В., Безбородов В.И., Кононов Б.В. Экспериментальное определение нормативной интенсивности тушения метанола самовспенивающейся газодисперсионной пеной // Пожарная безопасность. 2022. №1. С. 20-25.

МЕХАНИЗМ ДЕСТРУКЦИИ ГЕПТАФТОРПРОПАНА В ПЛАМЕНИ СМЕСЕЙ МЕТАНА С КИСЛОРОДОМ

Копылов С.Н.^{1,2,@}, Копылов П.С.³, Елтышев И.П.³, Бегишев И.Р.³

¹*Всероссийский НИИ противопожарной обороны МЧС России*

²*НИЯУ «Московский инженерно-физический институт»*

³*Академия государственной противопожарной службы МЧС России*
@firetest@mail.ru

Являющийся парниковым газом гептафторпропан широко применяется как одно из основных химически активных газовых огнетушащих веществ. В соответствии с международными соглашениями производство фторированных алканов поэтапно сократится на 85 % к 2036 году. Полный отказ от применения таких агентов в пожаротушении невозможен, и перспективным направлением снижения их потребления представляется увеличение их огнетушащей эффективности путем создания смесей с другими веществами. Реализация данного подхода возможна только при понимании механизма превращения C_3F_7H в пламени, при этом в настоящее время отсутствует единое мнение даже о его начальной стадии [1,2]. Настоящая работа посвящена получению большего объема информации о поведении гептафторпропана в пламени.

Механизм деструкции C_3F_7H в пламени рассматривался для стехиометрической, бедной (мольное соотношение горючее/окислитель 1:3) и богатой (мольное соотношение горючее/окислитель 3:1) смеси метана с кислородом. Был произведен расчет скоростей реакций в диапазоне температур 600-1200 К на основании профилей концентраций промежуточных веществ (H, O, OH, CFO, углеводородных и фторуглеродных радикалов), приведенных в [1]. При создании механизма превращения вещества в пламени были учтены только те реакции, для которых кинетические параметры известны. На каждой стадии расчета путем сравнения скоростей выделялись реакции, вносящие наибольший вклад в протекание процесса на данной стадии.

Показано, что начальная стадия превращения C_3F_7H в богатой и стехиометрической смесях – его взаимодействие с атомарным водородом, и первая стадия превращения гептафторпропана в пламени таких смесей является актом ингибирования реакции горения метана в кислороде. В бедной смеси преобладающие окислительные процессы взаимодействия C_3F_7H с O и OH обеспечивают дополнительное тепловыделение.

Выявлено, что определяющую роль в деструкции гептафторпропана в пламени метанокислородной смеси играют реакции распада промежуточных веществ (C_3F_7 , C_2F_5 , C_2F_4) с образованием радикалов CF_3 и CF_2 , большое тепловыделение которых обуславливает экспериментально наблюдаемые особенности самостоятельного горения гептафторпропана в кислороде при атмосферном давлении [3]. В богатой смеси дальнейшее превращение C_3F_7H в основном протекает за счет реакций CF_3 , CF_2 , COF_2 с атомарным водородом, обеспечивающих ингибирование горения метана в кислороде. В стехиометрической и особенно в бедной смеси роль реакций CF_3 и CF_2 с атомарным водородом уменьшается, а возрастает роль окислительных процессов с участием O и OH , то есть в бедной смеси эффект ингибирования слабеет, а тепловыделение окислительных процессов значительно усиливается, что наблюдается в эксперименте по увеличению максимального давления, сопровождающего горение. Этот эффект известен в литературе как эффект индуцированного окисления фторзамещенных углеводородов в пламени [4].

Из результатов расчета следует образование COF_2 и CFO в промежуточных продуктах, а также большого количества фтористого водорода в конечных продуктах реакции, что подтверждается экспериментальными данными [1].

Полученная схема деструкции C_3F_7H качественно описывает всю известную экспериментальную картину, наблюдаемую при горении смесей метан – кислород – гептафторпропан.

[1] Williams B.A., L'Esperance D.M., Fleming J.W., 2000, Comb. Flame. **120**. 160-72

[2] Choy W.M., Fong N.K., 2003, Int. J. on Eng. Performance-Based Fire Codes. **5**. 181-84

[3] Копылов С.Н., Губина Т.В., 2019, Химическая физика. **38**. 39-44

[4] Shebeko Yu.N., Azatyan V.V., Bolodian I.A., et al, 2000, Comb. Flame. **121**. 542-47

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ В ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ РЕСПИРАТОРАХ, ЗАЩИЩАЮЩИХ ОРГАНЫ ДЫХАНИЯ ОТ ОЖОГОВ

Луценко Н.А.^{1,2,®}, Фецов С.С.^{1,2}, Боровик К.Г.^{1,2}

¹*ИАПУ ДВО РАН, Владивосток, РФ*

²*ДВФУ, Владивосток, РФ*

® nickl@inbox.ru

При пожарах в помещениях существенный вклад в смертность и травматизм вносят тепловые ожоги органов дыхания [1-2]. Ингаляционный ожог получают 20–35% пострадавших при пожарах, среди которых наблюдаются повышенные заболеваемость пневмонией (38%) [1] и смертность (31%) [2]. Предотвратить ожоги органов дыхания и, таким образом, значительно снизить травматизм при пожарах можно при использовании персональных защитных устройств, способных охлаждать горячий воздух перед его попаданием в дыхательные пути. Такие средства индивидуальной защиты органов дыхания могут быть основаны на использовании различных материалов с фазовыми переходами (МФП) [3].

В настоящей работе для охлаждения вдыхаемого воздуха предлагается использовать теплозащитные респираторы на основе гранулированных МФП [4-5]. Охлаждающая часть предлагаемого теплозащитного респиратора внешне идентична фильтрующей коробке классических противогазов и респираторов, но внутри представляет из себя засыпку из мелких гранул специального МФП. Втекая в такой охлаждающий элемент при вдохе, горячий воздух снижает свою температуру до безопасного значения за счет теплообмена с плотной засыпкой из частиц МФП, а затем через клапан вдоха попадает в дыхательные пути. При нагреве гранул МФП до определенной температуры происходит либо твердотельный фазовый переход, либо плавление без нарушения целостности частиц, которое обеспечивается их капсулированием или использованием специальных адсорбирующих матриц. В результате фазового перехода МФП поглощает тепловую энергию воздуха не нагреваясь, что увеличивает время, в течение которого выходящий из респиратора газ будет иметь пригодную для дыхания температуру.

В настоящей работе с использованием оригинальной математической модели [6-7] и вычислительного алгоритма показана возможность создания теплозащитного респиратора на основе

существующих промышленно выпускаемых гранулированных МФП. Заметим, что подавляющее большинство известных МФП с допустимой температурой фазового перехода имеют относительно низкую максимальную рабочую температуру, что не позволяет использовать их в респираторах. Однако существуют плавящиеся материалы и материалы с твердотельным фазовым переходом, способные функционировать при температурах выше 177°C (450 К) и имеющие относительно низкие температуры фазового перехода (43-70°C). Вычислительные эксперименты показали, что для понижения температуры вдыхаемого воздуха со 177°C до менее 50°C в течение 10 минут масса охлаждающего элемента может быть около 130 г. Незначительная масса охлаждающего элемента теплозащитного респиратора на основе гранулированного МФП позволяет совмещать его с фильтрующим газодымозащитным элементом и создавать комбинированные респираторы, защищающие как от высоких температур, так и от токсичных продуктов горения.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант №№ 22-29-01129), <https://rscf.ru/project/22-29-01129/> Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Дальневосточный вычислительный ресурс» ИАПУ ДВО РАН.

- [1] Shirani K., Pruitt B., Mason A., 1987, *Ann. Surg.* **205** (1). 82-87.
- [2] Smith D., Cairns B., Ramadan F., et al., 1994, *J. Trauma.* **37** (4). 655-659.
- [3] Zhu Y., Xiao J., Chen T., Chen A., et al., 2019, *Appl. Therm. Eng.* **155**. 631-636.
- [4] Zalba B., Marin J. M., Cabeza L. F., et al., 2003, *Appl. Therm. Eng.* **23**. 251-283.
- [5] Peng H., Li R., Ling X., Dong H., 2015, *Appl. Energy.* **160**. 1-9.
- [6] Левин В.А., Луценко Н.А., Фецов С.С., 2018, *ДАН.* **479** (4). 386-389.
- [7] Lutsenko N.A., Fetsov S.S., 2020, *Int. J. Comp. Meth.* **17** (6). 1950010.

ОБ ОЦЕНКЕ ВЗРЫВООПАСНОСТИ АЭРОВЗВЕСИ

Полетаев Н.Л.

*ФГБУ ВНИИ противопожарной обороны МЧС России, Балашиха
nlrvniipo@mail.ru*

Из-за отсутствия теории турбулентного горения, проверку достоверности результатов тестирования взрывоопасности аэровзвеси разумно доверять эмпирическим правилам. Удивляет неиспользование этих правил при обосновании взрывоопасности пылей, опасность которых слабо выражена [1]. К таким пылям, помимо общеизвестных углей с низким содержанием летучих или сульфидных руд, можно отнести любые горючие материалы с достаточно крупными частицами.

В стандартах используют критерий взрывоопасности пыли в следующей формулировке. Если при тестировании аэровзвеси во взрывной камере объемом 20 л или 1 м³ прирост давления, вызванный продуктами горения, превысит некоторое значение ΔP_{cr} , то считается, что аэровзвесь взорвалась, а образовавшая ее пыль - взрывоопасна. Единого ответа на вопрос о величине ΔP_{cr} нет. В Европе, России, США и Китае величина ΔP_{cr} различна и составляет соответственно 20 ... 30 кПа, 50 кПа, 100 кПа и 150 кПа.

Различия ΔP_{cr} порождают сомнение в целесообразности использования данного параметра для решения упомянутой выше проблемы обоснования взрывоопасности дисперсного материала. Сомнение усиливается следующим выводом: нормативно введенная величина ΔP_{cr} допускает существование пыли, для аэровзвеси которой максимальное избыточное давление взрыва ΔP_{max} совпадает с ΔP_{cr} . То есть, ΔP_{max} в зависимости от происхождения стандарта может равняться, например, 20 кПа или 50 кПа, что неправдоподобно.

В данной работе критерий взрывоопасности пыли построим на основе эмпирического правила, сформулированного в [2]: значение адиабатической температуры горения аэровзвеси на нижнем пределе $T_{cr} \approx 1300$ К. Следовательно, температура продуктов горения будет не ниже T_{cr} , и условие взрывоопасности пыли примет вид

$$\Delta P_{max} \geq (T_{cr}/T_0 - 1)P_0 \approx 330 \text{ кПа}, \quad (1)$$

где $T_0 \approx 298$ К, $P_0 \approx 100$ кПа - температура и абсолютное давление, отвечающие начальным условиям стандартных огневых испытаний. Пример выполнения (1) приводится на рис.1. Переход от горючей аэровзвеси (кривая 4) к негорючей аэровзвеси (точка 5) производится путем малого изменения CO_2 . При этом значение ΔP_{max} скачкообразно снижается с 340 кПа до 10 кПа.

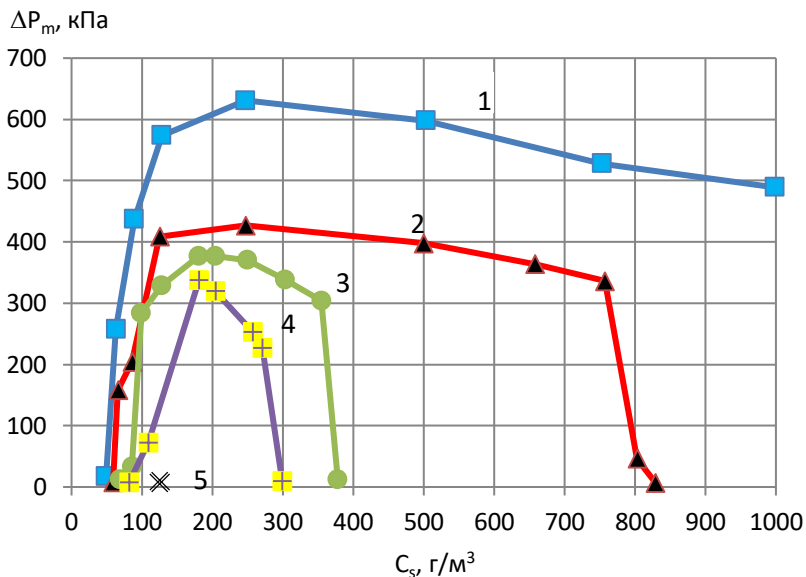


Рис.1. Зависимости избыточного давления взрыва бурого угля ΔP_m от концентрации пыли C_s (символы - эксперимент) и содержания кислорода C_{O_2} в воздухе, разбавленном азотом, в камере объемом 1 м³. Значения C_{O_2} , % об.: 1 – 20,6; 2 - 14; 3 - 12; 4 – 11,5; 5 - 11,0 [3].

Отметим случаи $\Delta P_m < 330$ кПа по левую и правую стороны от максимума ΔP_{max} для каждой из кривых на графике рис.1. Заметное снижение давления взрыва ΔP_m по отношению к порогу "330 кПа" вызвано неоднородностью аэровзвеси: пламя достигает стенок камеры, огибая негорючие участки взвеси с концентрацией пыли вне пределов горения. Чем выше неоднородность аэровзвеси (то есть, чем хуже качество распыления в испытательной камере), тем ниже может быть давление взрыва. Для однородной взрывоопасной взвеси, отвечающей условию (1), следует ожидать $\Delta P_m \geq 330$ кПа.

В заключение отметим, что рекомендуемый стандартами шаг по концентрации тестируемой взвеси (... 60, 125, 250, 500, ... г/м³) может пропустить максимум зависимости $\Delta P_m(C_s)$: см. кривую 4 на рис.1.

- [1] Полетаев Н.Л., 2017, Пожаровзрывобезопасность. №6. 5 - 20.
- [2] Полетаев Н.Л., 2014, Пожаровзрывобезопасность. №9. 15 - 6.
- [3] Wiemann W., 1987, ASTM STP 958, Philadelphia, 33-44.

ОЦЕНКА ОДНОРОДНОСТИ БОГАТОЙ АЭРОВЗВЕСИ

Полетаев Н.Л.

ФГБУ ВНИИ противопожарной обороны МЧС России, Балашиха
nlpvniipo@mail.ru

Внешнее сходство горения газо- и пылевоздушных смесей способствовало появлению для них общих по названию и единых по интерпретации показателей взрыва, в частности, концентрационных пределов распространения пламени - нижнего (LEL) и верхнего (UEL). Однако, качественное различие распределения горючего в упомянутых смесях (непрерывного для гомогенных смесей и дискретного для гетерогенных смесей) приводит к важным расхождениям.

Формальное применение терминов LEL и UEL к аэровзвесям должно учитывать, что, соответствующие им показатели взрыва имеют ограниченную (в отличие от случая газовоздушных смесей) область стандартного исследования [1]. Например,

- LEL не существует для стационарных аэровзвесей (отложенных пухообразных материалов) из-за способности отдельного волокна распространять пламя;

- UEL не принято исследовать для обычных (нестационарных) аэровзвесей из-за трудностей создания однородной взвеси высокой (до нескольких $\text{кг}/\text{м}^3$) концентрации в объеме стандартного (20 л или 1 м^3) реакционного сосуда в течении приемлемого для огневого опыта промежутка времени.

Последний пример предполагает возможность использовать UEL для качественной оценки однородности распределения горючего в богатой аэровзвеси, чему и посвящена эта работа. Для реализации упомянутой возможности заменим UEL безразмерным комплексом

$$R_s = \text{UEL}/C_{st} \quad (1)$$

где C_{st} - стехиометрическая концентрация горючего в воздухе нормального состава, под которым, для простоты, понимается смесь азота и кислорода в пропорции 79,3 : 20,7.

Примером высокой однородности распределения горючего в пространстве являются газо- и паровоздушные смеси, для которых комплекс (1) можно оценить с учетом соотношения $C_{st,g}$ (% об.) = $100/(4,84\beta + 1)$ и известной эмпирической закономерности [2]

$$\text{UEL}_g (\% \text{ об.}) = 100/(0,77\beta + 6,6); \quad (2)$$

где индекс "g" здесь и далее указывает на принадлежность параметра к газам и парам; β - стехиометрический коэффициент, для горючих газов и паров, молекула которых состоит из m_C , m_H , и m_O атомов углерода,

водорода и кислорода соответственно $\beta = m_C + m_H/4 - m_O/2$. Отсюда

$$R_g = UEL_g/C_{st,g} \approx 6,2, \quad (3)$$

где численное значение R_g относится к крупным молекулам газа и пара (высоким β), которые моделируют интересующий нас случай аэровзвеси очень мелких частиц.

Разумно предполагать, что отношение $\theta = R_s/R_g \geq 1$ является качественной оценкой однородности аэровзвеси: чем ближе θ к 1, тем выше однородность аэровзвеси. Сравним однородность стационарной и нестационарной аэровзвеси.

Рассмотрим стационарную аэровзвесь, созданную из отложения тополиного пуха (диаметр волокон ≈ 8 мкм). Состав тополиного пуха близок к целлюлозе ($C_6H_{10}O_5$)_n, $C_{st} = 0,18$ кг/м³. Минимальная плотность непрямтого тополиного пуха составляет $\rho_{min} = 0,3$ кг/м³. Плотность отложения можно увеличивать уплотнением волокон. В таблице представлена экспериментальная зависимость скорости пламени внутри отложения пуха от концентрации горючего [3].

Таблица. Зависимость скорости пламени V в отложении тополиного пуха от концентрации волокон C_s (в стехиометрических единицах C_{st})

C_s/C_{st}	1,7	3,3	5,0	6,6	7,5
V , см/с	31	31	25	18	0

Верхний предел находится в интервале $C_s/C_{st} \approx 7,1 \pm 0,4$. Отсюда $\theta \approx (7,1 \pm 0,4)/6,2 \approx 1,12 \pm 0,09$. Значение θ близко к 1,0 и свидетельствует о высокой однородности рассматриваемой стационарной аэровзвеси.

Значения θ для нестационарных аэровзвесей приводятся в [4] и составляют величины от 3 и выше. $\theta \gg 1$ свидетельствует о низкой однородности богатых нестационарных смесей пыли с воздухом нормального состава в стандартных установках и объясняет причины неиспользования показателя UEL при описании взрывоопасности нестационарных аэровзвесей.

[1] ГОСТ 12.1.044-2018.

[2] Монахов, В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. - М. : Химия, 1979. - 423 с.

[3] Полетаев Н.Л. (2010) Пожаровзрывобезопасность, № 6, 4-13.

[4] Eckhoff R.K. (2003) Dust explosions in the process industries. 3rd edition, 720 p Boston, 2003. - 720 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФТОРИРОВАННЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ГОРЕНИЕ СМЕСЕЙ ВОДОРОД-ЗАКИСЬ АЗОТА И МЕТАН-ЗАКИСЬ АЗОТА

Шебеко Ю. Н.^{1,*}, Шебеко А. Ю.¹, Зубань А. В.¹

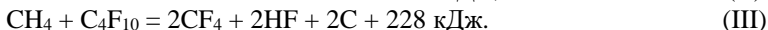
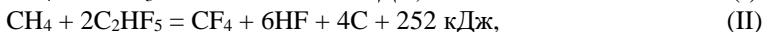
¹ФГБУ ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха Московской области
[@yn_shebeko@mail.ru](mailto:yn_shebeko@mail.ru)

Целью настоящей работы является экспериментальное и теоретическое исследование характеристик пожаровзрывоопасности газовых смесей сложного состава, содержащих в качестве окислителя закись азота.

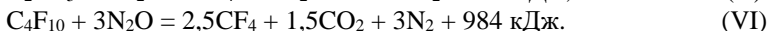
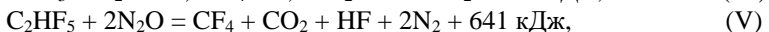
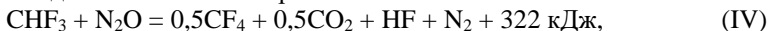
Проведено экспериментальное определение влияния трифторметана CHF_3 , пентафторэтана C_2HF_5 и перфторбутуна C_4F_{10} на концентрационные пределы распространения пламени смесей $\text{CH}_4 - \text{N}_2\text{O}$ и $\text{H}_2 - \text{N}_2\text{O}$, а также на максимальное давление взрыва ΔP_{\max} , максимальную скорость нарастания давления взрыва $(dp/dt)_{\max}$ и нормальную скорость горения S_u для околопредельных смесей метан – закись азота и водород – закись азота.

На рис.1 обращает на себя внимание низкие величины концентраций горючих газов на нижних ветвях кривых флегматизации. Одним из возможных механизмов для реализации данного эффекта является распространение пламени в смесях закись азота-фторированный углеводород при промотирующем влиянии водородсодержащих добавок. На рис.2, 3 приведены типичные результаты определения величин ΔP_{\max} и $(dp/dt)_{\max}$ для смесей метан-закись азота-фторированный углеводород и водород-закись азота-фторированный углеводород. Для качественного объяснения возможного промотирующего действия фторированных углеводородов на горение водорода и метана (рис.2-4) были оценены тепловые эффекты их химических превращений во фронте пламени.

При этом для богатых смесей фторированные углеводороды могут играть роль дополнительного окислителя:



Для бедных смесей фторированные углеводороды могут играть роль дополнительного горючего:



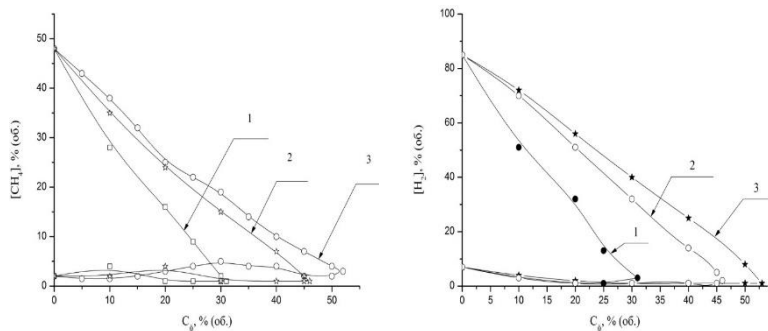


Рис. 1. Концентрационные пределы распространения пламени в смесях метан (а), водород (б) – закись азота – фторированный углеводород: 1 – C_4F_{10} , 2 – C_2HF_5 , 3 – CHF_3 . C_ϕ – концентрация флегматизатора.

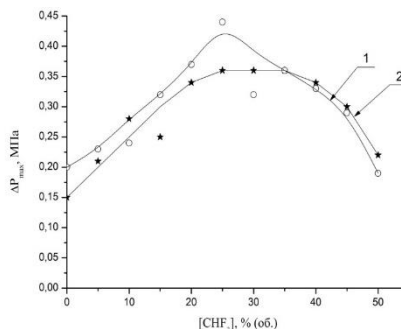


Рис. 2. Зависимость максимального давления взрыва ΔP_{max} для околопредельных смесей, соответствующих нижней (1) и верхней (2) ветвям кривой флегматизации, от содержания трифторметана в смеси $CH_4 - N_2O - CHF_3$.

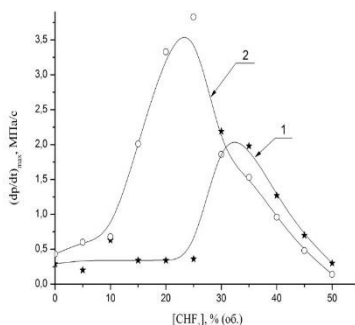


Рис. 3. Зависимость максимальной скорости нарастания давления взрыва $(dp/dt)_{max}$ для околопредельных смесей, соответствующих нижней (1) и верхней (2) ветвям кривой флегматизации, от содержания трифторметана

Реакции (IV) - (VI) аналогичны соответствующим процессам с участием кислорода, однако характеризуются более высокой экзотермичностью, обусловленной положительным значением энтальпии образования закиси азота.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДРОБЯЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА ВВ РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ

Ефремовцев Н.Н.^{1@}, Лавров В.В.^{2,3}, Савченко А.В.²

¹*Институт проблем комплексного освоения недр РАН г. Москва*

²*Институт проблем химической физики РАН г. Черноголовка*

³*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН г. Москва*
[@noon@mail.ru](mailto:noon@mail.ru)

Актуальность проведенных исследований обусловлена необходимостью расширения возможностей управления действием взрыва для получения рациональной фрагментации горного массива, а также необходимостью поиска снижения потерь полезных ископаемых и устранения негативных экологических факторов от взрывных работ.

В ИПКОН РАН разработана конструкция испытательного стенда (взрывной камеры) с применением усовершенствованной автором работы [1] методики, обеспечивающей возможность многократных взрывов зарядов весом до 60 г любых взрывчатых веществ, которые могут использоваться в промышленности. Особенностью конструкции компактной взрывной камеры является наличие элементов разгрузки, обеспечивающих снижение избыточного давления и удержание разрушенных взрывом фрагментов исследуемых сред. В полной комплектации испытательный стенд содержит блок устройств, позволяющих осуществлять отбор пылегазового облака (продуктов взрыва) для дальнейшего исследования. Методология проведения экспериментов в полном объеме предусматривает замеры и сравнительную оценку параметров сейсмического действия взрыва и воздушной ударной волны.

На испытательном стенде проведены экспериментальные взрывы имитационных бетонных моделей с зарядной камерой диаметром 28 мм, в которых различным цветом выделены 6 зон действия взрыва, а также размещены на различном расстоянии от заряда образцы горных пород и ценного кристаллосырья. Исследовалось разрушающее действия от трех зарядов различной мощности: аммонита 6ЖВ диаметром 17 мм с воздушным промежутком 5,5 мм, низкоплотной смеси аммиачной селитры с дизельным топливом и флегматизированного гексогена. Масса заряда составляла 20 г, инициирование осуществлялось электродетонатором № 8. В отдельных опытах были измерены скорости детонации этих составов в условиях, имитирующих камерные испытания.

Испытания взрывной камеры показали возможность полной локализации фрагментов взорванной модели внутри стенда, которые на последующих стадиях работ отсортировывались по цветам (зонам действия взрыва) и размерам, а также типам пород и образцов кристаллосырья, размещенных в средней части модели. На рис.1 приведены фотографии модели до взрыва и фрагментов разрушенной взрывом ее донной части. Фрагменты модели были разобраны по цветам в соответствии с расстоянием от оси заряда, что позволило



Рис. 1. Композиционная модель внутри испытательного стенда (слева) и фрагменты разрушенной части имитационной модели (справа).

выделить три характерных зоны действия взрыва по размерам, образовавшихся кусков, путем сортировки и последующей численной оценке гранулометрического состава фрагментов.

Применение разработанной конструкции испытательного стенда и композиционной модели с зонами действия взрыва, выделенными цветом, позволяют оценить выход мелких и крупных фракций, степень и характер трещиноватости в горных породах и кристаллосырье в зависимости от расстояния до заряда, его конструкции и взрывчатых характеристик промышленных ВВ различной мощности. Эти данные, в частности, необходимы для калибровки цифровых моделей и исследования закономерностей дробления горных пород. Они позволят выработать рекомендации по корректировке конструкции зарядов и подбору характеристик ВВ для обеспечения необходимой фрагментации породы и оптимального решения задач, возникающих при добыче полезных ископаемых взрывным способом.

[1] Ефремовцев Н. Н. Взрывное дело. 2015. № 113 (70). С. 96-106.