

Всероссийская конференция

ФИЗИКА ВЗРЫВА

теория, эксперимент, приложения

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ



18 – 21 сентября, 2023
Новосибирск, Россия



Всероссийская конференция «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения» проводится с целью анализа актуальных проблем физики высокоэнергетических процессов и обсуждения путей их решения, расширения круга промышленных партнеров и решения технологических задач применения взрыва. Конференция является продолжением серии Всероссийских конференций, проводимых Институтом гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН в 2013 и 2018 гг.



Всероссийская конференция «Взрыв в физическом эксперименте», 16 – 20 сентября 2013 г.



Всероссийская конференция «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения», 18 – 21 сентября 2018 г.



Учитель и ученик

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РАН
ИНСТИТУТ ГИДРОДИНАМИКИ
ИМ. М. А. ЛАВРЕНТЬЕВА

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**Физика взрыва:
теория, эксперимент, приложения**

18 – 21 сентября 2023 г.

Новосибирск, Россия

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Новосибирск
2023

УДК 53:544.45
ББК 22.3:24.54
В85

Программный комитет:

д.ф.-м.н. Э. Р. Прууэл, председатель	д.т.н. Д. В. Дудина (Новосибирск)
д.ф.-м.н. А. А. Васильев, сопредседатель	д.т.н. С. А. Душенок (Санкт-Петербург)
к.ф.-м.н. А. С. Юношев, сопредседатель	д.ф.-м.н. А. П. Ершов (Новосибирск)
к.ф.-м.н. И. А. Рубцов, ученый секретарь	д.ф.-м.н. С. А. Ждан (Новосибирск)
академик РАН С. В. Алексеенко (Новосибирск)	д.ф.-м.н. В. Е. Зарко (Новосибирск)
академик РАН Б. Д. Аннин (Новосибирск)	д.ф.-м.н. С. А. Зелепугин (Томск)
академик РАН З. Р. Исмагилов (Кемерово)	д.ф.-м.н. Я. В. Зубавичус (Новосибирск)
академик РАН В. А. Левин (Москва)	д.ф.-м.н. В. К. Кедринский (Новосибирск)
академик РАН В. И. Лысак (Волгоград)	к.ф.-м.н. В. И. Копченков (Москва)
академик РАН Н. А. Ратахин (Томск)	д.ф.-м.н. С. Н. Коробейников (Новосибирск)
академик РАН М. П. Федорук (Новосибирск)	д.ф.-м.н. А. Ю. Крайнов (Томск)
академик РАН В. М. Фомин (Новосибирск)	д.т.н. А. Е. Курепин (Дзержинск)
чл.-корр. РАН Е. В. Карпов (Новосибирск)	к.т.н. С. В. Ладов (Москва)
чл.-корр. РАН С. В. Кузьмин (Волгоград)	д.ф.-м.н. Н. А. Луценко (Владивосток)
чл.-корр. РАН И. В. Ломоносов (Москва)	д.ф.-м.н. И. С. Мануйлович (Москва)
чл.-корр. РАН Д. В. Петров (Снежинск)	д.т.н. А. Л. Михайлов (Саров)
чл.-корр. В. М. Садовский (Красноярск)	к.т.н. А. К. Музыря (Снежинск)
чл.-корр. РАН В. Д. Селемир (Саров)	д.ф.-м.н. В. В. Пай (Новосибирск)
чл.-корр. РАН С. В. Сысолятин (Бийск)	к.т.н. Б. В. Певченко (Бийск)
д.ф.-м.н. Г. В. Алексеев (Владивосток)	нач. лаб. А. С. Пирозерский (Москва)
д.ф.-м.н. В. К. Андреев (Красноярск)	д.ф.-м.н. С. В. Разоренов (Черноголовка)
д.х.н. Н. В. Баранова (Казань)	к.ф.-м.н. В. В. Романов (Новосибирск)
д.т.н. А. А. Батаев (Новосибирск)	к.т.н. Е. Б. Смирнов (Снежинск)
к.ф.-м.н. А. Н. Богданов (Москва)	д.т.н. В. И. Терехов (Новосибирск)
к.ф.-м.н. Е. А. Бондарь (Новосибирск)	д.х.н. Б. П. Толочко (Новосибирск)
д.ф.-м.н. А. Я. Вуль (Санкт-Петербург)	к.ф.-м.н. А. В. Уткин (Черноголовка)
д.ф.-м.н. С. Д. Гилев (Новосибирск)	д.ф.-м.н. С. М. Фролов (Москва)
д.т.н. Е. Ф. Грязнов (Москва)	д.ф.-м.н. А. П. Чупахин (Новосибирск)
д.т.н. А. В. Гуськов (Новосибирск)	д.ф.-м.н. О. В. Шарыпов (Новосибирск)
д.ф.-м.н. А. Ю. Долгобородов (Москва)	д.х.н. А. Г. Шмаков (Новосибирск)

В85 Всероссийская конференция «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения» : тезисы докладов, 18–21 сентября 2023 г., г. Новосибирск, Россия / Сиб. отд-ние РАН, Ин-т гидродинамики им. М.А. Лаврентьева. – Новосибирск: СО РАН, 2023. – 237 с.

ISBN 978-5-6049900-2-5

В сборнике представлены тезисы докладов Всероссийской конференции «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения», приуроченной к 90-летию со дня рождения академика РАН Владимира Михайловича Титова (18–21 сентября 2023 г., г. Новосибирск).

Издается в авторской редакции

ISBN 978-5-6049900-2-5

© Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН

Содержание

1 Кумулятивные явления, в том числе магнитная кумуляция	13
СВИРСКИЙ О. В., ВЛАСОВА М. А. <i>Проблемные вопросы исследования кумулятивных зарядов</i>	14
СВИРСКИЙ О. В., ВЛАСОВА М. А., ГАЛКИН Е. А., АРТЕМЯН А. К., ТКАЧЕНКО М. И., ПОДУРЕЦ А. М. <i>Пластическое и объёмное разрушение кумулятивных струй из порошкового молибдена</i>	15
ВЛАСОВА М. А., СВИРСКИЙ О. В. <i>Особенности применения модели распада медных кумулятивных струй</i>	16
ГРЯЗНОВ Е. Ф. <i>Механизм зарождения и развития фрагментообразующих трещин в стальных цилиндрических оболочках при их взрывном нагружении</i>	17
БУРАВОВА С. Н. <i>Модель цилиндрической кумуляции</i>	18
БАБКИН А. В., НОВОСЕЛЬЦЕВ А. С., ЛАДОВ С. В. <i>Влияние неустойчивости на схлопывание металлических оболочек</i>	20
ЛУКЪЯНОВ Я. Л., ПАЙ В. В. <i>Формирования кумулятивной струи при взрывном обжатии составной конической облицовки</i>	21
БАБАЕВА Г. С., РАССОХА С. С. <i>Численное моделирование функционирования двухстадийных кумулятивных зарядов в условиях начального вращения</i>	22
СМЕЛИКОВ В. Г., ПИРОЗЕРСКИЙ А. С., ПОРХАЧЕВ Н. В., ЛОШКАРЕВ А. Н., ПЛОТНИКОВ А. А. <i>Молотковый, пружинный и кондукторный эффекты в кумулятивных струях. Обеспечение устойчивости ограниченной кумуляции</i>	23
НОГИН В. Н. <i>К задаче о схлопывании пузырька в идеальном газе: автомоделное решение с бесконечной энтропией</i>	25
КРАСИЛЬНИКОВ А. В., НОГИН В. Н., КОВАЛЕВ А. Е., ОЛЬХОВСКИЙ А. В., ВАРФОЛОМЕЕВ Д. А., ЖИЛЯЕВА Н. С. <i>О влиянии зазоров на динамику разгона двухслойной пластины</i>	26
ПОТАНИНА Е. Ю., ГУСЬКОВ А. В. <i>Кумулятивное струеобразование при взрывном обжатии цилиндрических оболочек</i>	27
ПОТАНИНА Е. Ю., ГУСЬКОВ А. В. <i>Пробитие многослойной преграды кумулятивным скважинным перфоратором с комбинированной облицовкой</i>	29
БРАГУНЦОВ Е. Я. <i>Исследование особенностей поведения кумулятивных струй и пестов от облицовок из беспестовых материалов</i>	31
БРАГУНЦОВ Е. Я. <i>Неидеальная кумуляция</i>	32
БРАГУНЦОВ Е. Я. <i>Исследование «краевого эффекта» в цилиндрической кумуляции</i>	34
БРАГУНЦОВ Е. Я., НАЗАРОВ С. С., ЦЫБРИЙ А. И. <i>Волновая теория кумуляции</i>	35
БРАГУНЦОВ Е. Я., ЦЫБРИЙ А. И., НАЗАРОВ С. С. <i>Исследование причин фрагментации кумулятивной струи</i>	37
2 Ударно-волновые явления, высокоскоростной удар и динамические многофазные течения	38
ЛОМОНОСОВ И. В., МИНЦЕВ В. Б., НИКОЛАЕВ Д. Н. <i>Исследование ударно-волновых свойств конденсированного вещества и газов при терапаскальных давлениях</i>	39
КРАУС Е. И., ШАБАЛИН И. И. <i>Численное моделирование ударного взаимодействия гетерогенных материалов и конструкций</i>	40
ПЕТРОВ Д. В., ГАРМАШЕВ А. Ю., ПАВЛЕНКО А. В., СМИРНОВ Е. Б., КУЧКО Д. П. <i>Динамические свойства конструкционных материалов</i>	42
МИХАЙЛОВ А. Л. <i>Ударно-волновое пыление. Механизмы, диагностика, результаты</i>	43
САВВАТИМСКИЙ А. И., ОНУФРИЕВ С. В., ЛЕБЕДЕВ В. С. <i>Что такое электрический взрыв?</i>	44

САВВАТИМСКИЙ А. И., ОНУФРИЕВ С. В., ХИЩЕНКО К. В. <i>Физические свойства жидкого высокоэнтропийного карбида (HfTaTiNbZr)C₅ до 5500 К и жидкого углерода – до 9000 К при быстром нагреве импульсом электрического тока</i>	46
НИКОЛАЕВ Д. Н., ОСТРИК А. В. <i>Ударно-волновые свойства и плавление периклаза при ударном сжатии до давления 1 терапаскаль</i>	48
НАЙМАРК О. Б. <i>Экспериментальное исследование и широкодиапазонное моделирование поведения конденсированных сред при интенсивных воздействиях</i>	50
ХИЩЕНКО К. В. <i>Уравнения состояния тугоплавких материалов в задачах физики взрыва</i>	51
БОЯРСКИХ К. А., ХИЩЕНКО К. В. <i>Малопараметрическое уравнение состояния вольфрама вблизи области фазового перехода жидкость—пар</i>	52
СЕРЕДКИН Н. Н., ХИЩЕНКО К. В. <i>Моделирование ударной сжимаемости сплава титан—цирконий в широком диапазоне давлений и температур</i>	53
ГИЛЕВ С. Д., ПЕТРОВ Л. Е. <i>Сера: переход диэлектрик-металл при ударном сжатии</i>	54
АНИСИЧКИН В. Ф., ПРУУЭЛ Э. Р. <i>Модель ударного сжатия конденсированной среды</i>	55
ТЕН К. А., ПРУУЭЛ Э. Р., КАШКАРОВ А. О., РУБЦОВ И. А., СТУДЕННИКОВ А. А., ХАЛЕМЕНЧУК В. П., ТОЛОЧКО Б. П., ПЕТРОВ Д. В., ГАРМАШЕВ А. Ю., СМЕРНОВ Е. Б., МИХАЙЛОВ А. Л., АНТИПОВ М. В., СПИРИН И. А. <i>Синхротронная диагностика процессов пыления</i>	58
АНТИПОВ М. В., ГЕОРГИЕВСКАЯ А. Б., ОГОРОДНИКОВ В. А., МИХАЙЛОВ А. Л., СПИРИН И. А., КАЛАШНИКОВ Д. А., УТЕНКОВ А. А., ЮРТОВ И. В., ФЕДОСЕЕВ А. В., СОГРИНА О. Б., ТЕН К. А., ПРУУЭЛ Э. Р., КАШКАРОВ А. О., РУБЦОВ И. А. <i>Исследование движения ударно-индуцированных пылевых потоков методом синхротронного излучения</i>	59
ХАЛЕМЕНЧУК В. П., ТЕН К. А., РУБЦОВ И. А., ПРУУЭЛ Э. Р., КАШКАРОВ А. О., СТУДЕННИКОВ А. А., ШЕХТМАН Л. И., ТОЛОЧКО Б. П., СМЕРНОВ Е. Б., СТОЛБИКОВ М. Ю. <i>Регистрация пылевого потока при ударном нагружении ступенчатых конструкционных стыков</i>	60
АСЫЛКАЕВ А. М., ТЕН К. А., ПРУУЭЛ Э. Р., РУБЦОВ И. А., КАШКАРОВ А. О., ХАЛЕМЕНЧУК В. П., СТУДЕННИКОВ А. А., СМЕРНОВ Е. Б., МУЗЫРЯ А. К., ПРОСВИРНИН К. М., ГАЛИУЛИН И. Г. <i>Восстановление распределения плотности за фронтом сильной ударной волны в пористой среде</i>	61
ШЕСТАКОВСКАЯ Е. С., БИРЮКОВА М. А., КЛИНАЧЕВА Н. Л., СМЕРНОВ Е. Б., СТАРИКОВ Я. Е., ЯЛОВЕЦ А. П. <i>Определение параметров уравнения состояния полимерных материалов по результатам экспериментов с применением синхротронной диагностики</i>	62
КРАСИЛЬНИКОВ А. В., НОГИН В. Н., ЮСУПОВ Д. Т., ДЕГТЯРЕВ А. А., КАДОЧНИКОВ Д. Ю. <i>О точности определения величины откольной прочности по данным измерений на контактной поверхности</i>	64
РАДЧЕНКО П. А., РАДЧЕНКО А. В., БАТУЕВ С. П. <i>Влияние вращения ударника на его проникание в преграду при высокоскоростном ударе</i>	65
ПЕТЮКОВ А. В., БОБРОВА А. И., ГРИШИН И. Р., ИВАНОВ Д. А., СОТСКИЙ М. Ю. <i>Физико-математическое моделирование проникания ударников в мягкие текстильные преграды</i>	66
ПЕТЮКОВ А. В., БОБРОВА А. И., ГРИШИН И. Р., ИВАНОВ Д. А., СОТСКИЙ М. Ю. <i>Численное моделирование разрушения керамики при воздействии высокоскоростных ударников</i>	67

БОГДАНОВ А. Н. Ударно-волновые конфигурации в канализированной нагретой среде	68
ЗАБУСОВ П. В., КАРПЕНКО Г. Я., КИРЮХИНА М. Н., КОВАЛДОВ В. В., НЕФЕДОВ А. В., ПАНОВ К. Н., САПРЫКИНА Е. В., ШИРШОВА М. О. Моделирование поведения сферических оболочек из карбида бора при взрывном обжатии	70
КАБИРОВ К. Р., МАРСОВ А. А., МОКЕЕВ А. А., БАДРЕТДИНОВА Л. Х. Исследование деформационного движения сегментной облицовки под воздействием динамических нагрузок	71
ГРАЧЁВА Н. А., ФОМИН Е. В., МАЙЕР А. Е. Моделирование сжатия твердого раствора Al-Cu с учетом фазовых переходов и дислокационной пластичности	72
УТКИН А. В., ФОМИН В. М. Определение динамической твердости материала при помощи метода молекулярной динамики	73
ПОПОВ Ю. В., МАРКОВ В. А., СЕЛИВАНОВ В. В. Высокоскоростное взаимодействие составных ударников с тонкими преградами	74
ГОЛЫШЕВ А. А., МОЛОДЕЦ А. М. Генератор ступенчато-циклического ударного сжатия для исследования электрофизических свойств металлов при высоких давлениях и температурах	76
КЛЁНОВ А. И., ПЕТРОВА А. Н., БРОДОВА И. Г., СМИРНОВ Е. Б., ГАРМАШЕВ А. Ю., КУЧКО Д. П. Структура и динамические свойства алюминиевого сплава АК6, синтезированного селективным лазерным плавлением	78
АДУЕВ Б. П., НУРМУХАМЕТОВ Д. Р., НЕЛЮБИНА Н. В., БЕЛОКУРОВ Г. М., КРАФТ Я. В., ИСМАГИЛОВ З. Р. Ударно-волновые явления при воздействии импульсного лазерного излучения на алюмоводную суспензию с целью получения водорода	79
3 Энергетические материалы, горение, детонация	80
СОСНИН В. А. Состояние и перспективы развития промышленных ВВ	81
КОЗЛОВ А. С., ДУШЕНОК С. А., КОТОМИН А. А. Детонационная способность взрывчатых веществ и материалов. Экспериментальные исследования	82
ГЛОТОВ О. Г. Скрининг металлических горючих для использования в смешанных топливах для прямоточных воздушно-реактивных двигателей	84
БУТЕНКО Е. А., КУЗНЕЦОВ И. А., КУРЕПИН А. Е., МАЛАНЧЕВА Л. В., МАЛКИН А. И., ПОПОВ Д. А., РЯЗАНЦЕВА А. А., ШИШОВ Н. И., ЯШИН В. Б. Борсодержащие композиционные наполнители «Al-nB» для смешанных взрывчатых составов: свойства, совместимость со связующими, применение	85
ЕРШОВ А. П. О росте углеродных частиц в волне детонации	86
НАРЫЖНЫЙ С. Ю., ДОЛМАТОВ В. Ю., КОЗЛОВ А. С., ФОМЕНКО В. В., СЕМАШКИН Г. В., МАРЧУКОВ В. А., ДЕСЯТОВ С. В. Влияние модифицированных аллотропий углерода на процесс горения модельных смешанных ракетных топлив	88
АНИСИЧКИН В. Ф. Механизм детонационного разложения органических веществ	89
ПЛАСТИНИН А. В., ЮНОШЕВ А. С. Скорость детонации эмульсионного взрывчатого вещества с добавлением алюминиевого порошка	91
КИСЕЛЕВ В. Г., МУРАВЬЕВ Н. В., МОНОГАРОВ К. А., ПИВКИНА А. Н. Современные количественные квантовохимические расчеты термодинамики и кинетики разложения энергетических соединений	93
ДОЛГОВОРОДОВ А. Ю., КИРИЛЕНКО В. Г., БРАЖНИКОВ М. А., ЯНКОВСКИЙ Б. Д., БОРОДИНА Т. И., ВАЛЬЯНО Г. Е. Взрывное горение наноразмерной смеси Al + SiO ₂	94

ГОРДЕЕВ В. В., КАЗУТИН М. В., КОЗЫРЕВ Н. В. <i>Исследование влияния азодикарбонамида на свойства нанотермитных систем CuO/Al и $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$</i>	95
УТКИН А. В., МОЧАЛОВА В. М., РАПОТА Д. Ю., СОСИКОВ В. А., ТОРУНОВ С. И. <i>Структура неустойчивого детонационного фронта в жидких ВВ</i>	96
МОЧАЛОВА В. М., УТКИН А. В., ШАКУЛА М. Ю., ЛАВРОВ В. В., СОСИКОВ В. А., ТОРУНОВ С. И., РАПОТА Д. Ю. <i>Влияние полиметилметакрилата на устойчивость детонационных волн и критические параметры нитрометана</i>	97
СУРНАЧЁВ И. Н., ПЕВЧЕНКО Б. В., КУРБАТОВ А. В., ПЕТРОВ Е. А., ПУШКИН Д. В., ЧЕКАНОВ М. А., РОМАНОВА Е. А. <i>Зависимость скорости детонации взрывчатых составов от дисперсности алюминиевого порошка</i>	98
ЯГОДНИКОВ Д. А., ПАПЫРИН П. В., ГАЦА М. Ю., ХУДЯКОВ М. А. <i>Экспериментальное определение параметров воспламенения и горения конгломератов частиц боридов алюминия в условиях высокотемпературной среды</i>	99
ГУВИН А. С., ТЕРЕЩЕНКО М. Н., ЧЕРНАВКИН П. С. <i>О модели процессов, протекающих при контакте продуктов детонации алюминизированных ВВ с воздухом</i>	100
КУЗНЕЦОВ И. А., КУРЕПИН А. Е., МАЛКИН А. И., ПОПОВ Д. А., РЯЗАНЦЕВА А. А. <i>Управление структурой, физико-химическими характеристиками и реакционной способностью механоактивированных композиционных борсодержащих наполнителей взрывчатых составов</i>	101
РУБЦОВ И. А., ТЕН К. А., КАШКАРОВ А. О., КУРЕПИН А. Е., РЯЗАНЦЕВА А. А. <i>Исследование окисления алюминиевой добавки при детонации конденсированных взрывчатых составов с применением синхротронного излучения</i>	102
СОРОКИН И. В., ГЛОТОВ О. Г., СУРОДИН Г. С., БЕЛОУСОВА Н. С. <i>Влияние добавки-модификатора на параметры горения и агломерацию смесевых модельных топлив с алюминием</i>	103
БЕЛОУСОВА Н. С., ГЛОТОВ О. Г., КОРЧЕМКИНА П. Г. <i>Исследование горения алюминизированных топлив с добавками-модификаторами</i>	104
КРАЙНОВ А. Ю., РОГАЕВ К. С. <i>Моделирование горения в замкнутом объеме зерненого заряда с добавлением нанопорошка алюминия</i>	105
ШЕВЧЕНКО В. Г., ЕСЕЛЕВИЧ Д. А., КРАСИЛЬНИКОВ В. Н., КОНЮКОВА А. В. <i>Влияние V_2O_5 на процесс окисления аморфного бора</i>	106
ТИТОВА В. Б., ВОЛОДИНА Н. А., ШИРШОВА М. О., КИРЮХИНА М. Н., БОГДАНОВ Е. Н., СТАНОВОВ А. А. <i>Калибровка уравнения состояния продуктов взрыва пластифицированного октогена на результатах опытов по разгону лайнеров</i>	107
ТИТОВА В. Б., ВОЛОДИНА Н. А., ШИРШОВА М. О. <i>Особенности распространения детонации в каналах малого сечения для состава на основе тэна</i>	108
ШИХОВА Ю. А., ТИТОВА В. Б., ОСИПЦОВ А. П., ЯКОВЕНКО Р. В. <i>Численное моделирование работы миллидетонационного устройства «Нивелирующая накладка» в Методике Д на адаптивно-встраиваемых сетках</i>	109
ВИШНЯКОВ А. Ю., ГЛАЗУНОВ В. А., ЖБАНОВА Н. Н., ИГНАТОВ О. Л., КАБАЕВ А. А., КАБАЕВ С. А., ТКАЧ Е. О. <i>Модель воспламенения ВВ на основе тэна в пакете программ Логос, учитывающая влияние температуры и давления на скорость газофазных химических реакций</i>	110
ГЛУЩЕНКО А. Г., СУРОВ М. С., БАКИРОВ А. Р., СДОВНОВ В. И., СТАНКЕВИЧ А. В., ГАРМАШЕВ А. Ю., ФРОЛОВ Д. В., ГРИБАНОВ Д. А., ДОЛГИХ С. М., ПЕТРОВ Д. В. <i>Лазерное иницирование низкоплотных смесей тэна с нанодисперсным алюминием импульсами наносекундной длительности</i>	111
ВАРЛАМОВ Е. С., КОЛЕСОВ В. И., КОСТИН Н. А., ЮДИН Н. В. <i>Зажигание сокристаллов на основе CL-20 лазерным излучением</i>	112

АДУЕВ Б. П., НУРМУХАМЕТОВ Д. Р., ВОЛКОВ В. Д., КРАФТ Я. В., Исмагилов З. Р. <i>Лазерное зажигание угля</i>	113
КАШКАРОВ А. О., ПРУУЭЛ Э. Р., РУБЦОВ И. А., САТОНКИНА Н. П., ХЛЕБАНОВСКИЙ Н. А., ГЕРАСИМОВ Е. Ю. <i>Продукты детонации смесевых взрывчатых составов на основе БТФ</i>	114
САТОНКИНА Н. П., ЕРШОВ А. П., КАШКАРОВ А. О., КУЗЬМИНЫХ А. А., ХЛЕБАНОВСКИЙ Н. А. <i>Электропроводность при детонации заряда гексогена с бензотрифуроксаном</i>	115
ТУМАНИК А. С., КАШКАРОВ А. О., САТОНКИНА Н. П., СТУДЕННИКОВ А. А. <i>Исследование методом ЛГМ влияния способа изготовления заряда тротила на профиль массовой скорости</i>	116
СТУДЕННИКОВ А. А., РУБЦОВ И. А., ПРУУЭЛ Э. Р., ТЕН К. А., КАШКАРОВ А. О., ПРОСВИРНИН К. М., ГАЛИУЛЛИН И. Г., ЕГАНОВ К. В., ГРЕМИТСКИХ А. С. <i>О переходе ударной волны в детонационную в прессованных зарядах ТАТБ малых и средних диаметров</i>	117
ТЕН К. А., ПРУУЭЛ Э. Р., КАШКАРОВ А. О., РУБЦОВ И. А., СТУДЕННИКОВ А. А., ХАЛЕМЕНЧУК В. П., ТОЛОЧКО Б. П., ПРОСВИРНИН К. М., МУЗЫРЯ А. К. <i>Распределение плотности на фронте детонации ТАТБ</i>	118
КОТОМИН А. А., КОЗЛОВ А. С., ДУШЕНОК С. А., БУКОВСКИЙ П. Г., БАРМАШОВА Д. В. <i>Экспериментально-расчётный метод определения критического диаметра детонации высокоплотных зарядов ВВ</i>	119
АСТАХОВ А. М., ТАМАШКОВ В. О., АНТИШИН Д. В., ЧУМАКОВ И. В., ВОЛЬФ В. А. <i>Исследование детонационной способности гидразиниевой соли 5-аминотетразола</i>	121
ГЛУЩЕНКО А. Г., СЫРЦОВ А. Б., ГОРОПАШНЫЙ Я. М., ЛОБАЧЕВ А. С., МУХИН Д. В., АВЕРИН А. Н., ГРИБАНОВ Д. А., ДОЛГИХ С. М., ФРОЛОВ Д. В., ГАРМАШЕВ А. Ю. <i>Развитие и распространение детонации в ВВ на основе октогена при кольцевом иницировании</i>	122
СТОЛЯРОВ П. Н., МИСЮРИН Ю. А., ПЕРМЕНОВ Д. Г. <i>Особенности построения моделей кинетики тепловыделения энергоёмких соединений</i>	123
КЛИНАЧЕВА Н. Л., ШЕСТАКОВСКАЯ Е. С., ЯЛОВЕЦ А. П. <i>Численное моделирование разлёта металлической трубки под действием продуктов детонации</i>	124
БАЛАГАНСКИЙ И. А., ВИНОГРАДОВ А. В. <i>Численное моделирование процесса огибания детонационной волной линзы из высокомодульной керамики</i>	125
КАРПОВА А. А., ФРЕЙМАН В. М., ШАШКОВ Е. В., ЗЕГРЯ А. Г., ВОРОБЬЕВ Н. С., САВЕНКОВ Г. Г., ПОВЕРЕЖНАЯ У. М., БАЙДАКОВА М. В., НАЩЕКИН А. В., КИРИЛЕНКО Д. А., УЛИН В. П., ЗЕГРЯ Г. Г. <i>Диспергирование пористого кремния, насыщенного окислителем</i>	126
КОЛЕСОВ В. И., МАНАХОВА Е. С., ГУБИН А. С., ТЕРЕЩЕНКО М. Н., ЧЕРНАВКИН П. С. <i>Оптимизация взрывчатых составов на основе перхлората тетраметиламмония</i>	127
ЛЕВШЕНКОВ А. И. <i>Заряды ВВ пониженной плотности: особенности возбуждения и распространения детонации</i>	128
БИРЮКОВА М. А., ПЕТРОВ Д. В., КОВАЛЕВ Ю. М., СМИРНОВ Е. Б., ШЕСТАКОВ М. А. <i>Уравнения состояния для построения ударных адиабат энергетических материалов на основе экспериментальных данных по изотермическому сжатию</i>	130
ЛАЧУГИН А. А., ПЕТРОВ А. С., МОКЕЕВ А. А., МАРСОВ А. А. <i>Исследование функциональных характеристик энергонасыщенного материала предназначенного для газодинамического разрыва нефтяного пласта</i>	132

СТАНКЕВИЧ А. В., РУДИНА А. Х., СОБОЛЕВСКАЯ А. В., ЧЕМАГИНА И. В. <i>Состав продуктов газовой фазы, механизм и кинетика термического разложения перхлората аммония и пентаэритриттетранитрата</i>	133
ГОЛЩИНА С. Г., КОРОТИНА А. В., ИШМЕТОВА Р. И., СТАНКЕВИЧ А. В., ЧЕМАГИНА И. В., РУСИНОВ Г. Л., ЧАРУШИН В. Н. <i>Синтез и термическая стабильность некоторых полиазотсодержащих производных [1,2,4]триазоло[4,3-<i>b</i>][1,2,4,5]тетразина</i>	134
СТАНКЕВИЧ А. В., ПЕТРОВ Д. В. <i>Численное моделирование газодинамических процессов в коаксиально-слоистых комбинированных изделиях из различных типов энергетических материалов</i>	135
СТАНКЕВИЧ А. В., БАКИРОВ А. Р., ЧЕМАГИНА И. В. <i>Химическая совместимость и механизм взаимодействия компонентов смесей светочувствительных ВВ на основе тэна при термическом воздействии</i>	136
СТАНКЕВИЧ А. В., СТРЕЛЬЦОВА М. С., РУДИНА А. Х., ГОЛОЧКО Б. П. <i>Фотолиз сверхчистого триаминотринитробензола в условиях низкоэнергетического облучения ультрафиолетом</i>	137
СТАНКЕВИЧ А. В. <i>Вопросы устойчивости продуктов быстропротекающих реакций фторирования бора, кремния и углерода</i>	139
4 Динамические течения с химическими реакциями	140
ФРОЛОВ С. М. <i>Диффузионное горение в невесомости: результаты космических экспериментов «Зарево» и «Адамант»</i>	141
ВАСИЛЬЕВ А. А., ВАСИЛЬЕВ В. А. <i>Горючие смеси без «углеродного следа»</i>	142
ВАСИЛЬЕВ А. А., БОРИСКИН А. А., ВАСИЛЬЕВ В. А. <i>Двумерная дифракция волн горения и детонации</i>	143
БЫКОВСКИЙ Ф. А., ЖДАН С. А., ВЕДЕРНИКОВ Е. Ф. <i>Пределы непрерывной детонации двухфазных смесей керосин/вода – нагретый воздух</i>	144
ПИНАЕВ А. В., ПИНАЕВ П. А. <i>Параметры пламен, взрывных и детонационных волн в газоугольных смесях</i>	146
ШТЕРЦЕР А. А., БАТРАЕВ И. С., РЫБИН Д. К., УЛЬЯНИЦКИЙ В. Ю. <i>Детонационное разложение газообразных углеводородных топлив с получением водорода</i>	147
ПАЙ В. В., РЫБИН Д. К., УЛЬЯНИЦКИЙ В. Ю., ХАУСТОВ С. В. <i>Термопарные измерения теплового потока в импульсном газодетонационном аппарате</i>	149
НИКУЛИН В. В., ЧАШНИКОВ Е. А. <i>Формирование вихря после подрыва ВВ в стволе</i>	150
ЯНОВСКИЙ Л. С., ЕЖОВ В. М., ЧЕРВОННАЯ Н. А., ИЛЬИНА М. А., НОВАКОВСКИЙ Д. В. <i>Исследование периода индукции воспламенения альтернативных топлив на ударной трубе</i>	152
ВАСЕЦКИЙ В. А., ГРИЩЕНКО В. М., ЛЕЩЕВИЧ В. В., ПЕНЯЗЬКОВ О. Г. <i>Режимы сверхзвукового горения, инициируемого в канале при пролете в нем тела со скоростью 5–10 М</i>	153
СЫЧЕВ А. И. <i>Взаимодействие ударных волн с границей раздела пузырьковых сред</i>	155
АСТАХОВ Д. С., ЯКОВЛЕВ И. А. <i>Динамика и механизмы пульсаций пламени в пористых средах</i>	157
ПРОХОРОВ Е. С. <i>Расчет детонации переобогащенных топливом газовых смесей</i>	158
ЗАМУРАЕВ В. П., КАЛИНИНА А. П. <i>Горение в сверхзвуковом потоке в двухсекционном канале при боковой подаче сжатого воздуха и водорода</i>	159
СЫРОВАТЕНЬ А. А., БЕДАРЕВ И. А., ТРОПИН Д. А. <i>Математическое моделирование гибридной детонации в водородно-воздушной смеси с частицами бора</i>	160

Фомин П. А., Троцюк А. В., Тетервова И. В. <i>Моделирование кинетики и расчет структуры детонационных волн в двухтопливных газовых смесях</i>	161
Берников В. В., Ягодников Д. А., Федотова К. В. <i>Численное исследование дожигания многофазных полидисперсных смесей продуктов разложения энергетических конденсированных систем в воздушном потоке</i>	162
Крайнов А. Ю., Моисеева К. М., Митрофанов А. А. <i>Влияние геометрических характеристик камеры сгорания на горение порошка алюминия в закрученном потоке</i>	164
Мартюшов С. Н. <i>Расчет инициации горения в осесимметричных каналах на основе кинетической модели многостадийной реакции водородо-воздушной смеси</i>	165

5 Обработка и синтез материалов при динамическом воздействии, сварка взрывом **166**

Лысак В. И., Кузьмин С. В. <i>Новые подходы к созданию металлических и металлокерамических материалов энергией взрыва</i>	167
Вуль А. Я., Дидейкин А. Т., Алексенский А. Е., Швидченко А. В. <i>Наноалмазы динамического синтеза в технологиях настоящего и будущего</i>	168
Долматов В. Ю. <i>Теория и практика детонационного синтеза наноалмаза, применение детонационных наноалмазов</i>	169
Курепин С. А., Ухабин О. А., Смирнов А. С., Вуль А. Я. <i>Промышленное получение детонационных алмазов и исследование их свойств</i>	170
Петров Е. А. <i>Эволюция формирования кристаллитов и зерна в процессе детонационного получения наноалмазов</i>	171
Станкевич А. В., Петров Е. А., Соболевская А. В., Бакиров А. Р., Ветрова А. А. <i>Сравнительный анализ химического состава и структуры ультрадисперсных алмазов, полученных в различных условиях детонационного синтеза и очистки</i>	173
Станкевич А. В., Толщина С. Г., Коротина А. В., Русинов Г. Л. <i>Механизм образования различных форм нитрида углерода в волне горения и детонации</i>	175
Хлебановский Н. А., Кашкаров А. О., Тен К. А., Герасимов Е. Ю., Мороз Б. Л. <i>Изучение морфологии наночастиц металлов, образованных методом детонационного синтеза</i>	177
Ондар А. А., Дудина Д. В., Ухина А. В., Ульяницкий В. Ю., Есиков М. А., Анисимов А. Г. <i>Получение сплавов $Cu - 10 \text{ мас. } \% Al$ с неравновесной структурой и исследование их свойств</i>	178
Ульяницкий В. Ю., Рыбин Д. К., Ларичкин А. Ю. <i>Остаточные напряжения в детонационных покрытиях, обусловленные наклепом</i>	179
Киселев С. П., Киселев В. П. <i>Соударение микро и нано-частиц с преградой и образование интерметаллидного покрытия</i>	181
Князева А. Г., Крюкова О. Н., Анисимова М. А., Чумаков Ю. А. <i>Иницирование реакций подвижным источником энергии</i>	182
Злобин Б. С., Киселев В. В., Штерцер А. А., Батраев И. С. <i>Сварка взрывом малопластичных сталей</i>	183
Королев М. П., Кузьмин С. В., Лысак В. И., Кузьмин Е. В. <i>Сварка взрывом титана с алюминиево-магниевыми сплавами и особенности разрушения соединений</i>	184
Хаустов С. В., Пай В. В., Кузьмин С. В., Лысак В. И., Кочкалов А. Д. <i>Определение теплового потока от ударно сжатого газа перед точкой контакта к поверхности пластин при сварке взрывом</i>	185

НИЁЗБЕКОВ Н. Н., МАЛАХОВ А. Ю., ДЕНИСОВ И. В., САЙКОВ И. В., ШАХРАЙ Д. В., СОСИКОВ В. А. <i>Исследование параметров ударно-сжатого газа, образующегося в зазоре между соударяемыми пластинами в процессе сварки взрывом</i>	186
КУЗЬМИН Е. В., КОРОЛЕВ М. П., ЛЫСАК В. И., КУЗЬМИН С. В. <i>Особенности формирования структуры и свойств создаваемых высокоэнергетическими методами композиционных материалов сталь+алюминий</i>	188
ЛАЗУРЕНКО Д. В., АНИСИМОВ А. Г., ИВАННИКОВ А. А., ПОПОВ Н. С. <i>Особенности структурообразования границ раздела кристаллических и аморфных пластин при магнитно-импульсной сварке</i>	189
ХАРЛАМОВ В. О., КРОХАЛЕВ А. В., ЧЕРНИКОВ Д. Р., ЛЫСАК В. И., КУЗЬМИН С. В. <i>Получение неравновесных твердых сплавов взрывным прессованием смесей порошков без спекания</i>	190
КРОХАЛЕВ А. В., ХАРЛАМОВ В. О., ЧЕРНИКОВ Д. Р., ТУЖИКОВ О. О., ЛЫСАК В. И., КУЗЬМИН С. В. <i>Получение метастабильных водород-сорбционных материалов системы Ti-Fe с помощью взрывного прессования и спекания</i>	191
МАКАРЕНКО А. Е., КУЛЬБАКИН И. С. КВЕГЛИС Л. И., АНИСИМОВ А. Г. ТОЛОЧКО Б. П., РАЗУМОВ Н. И. <i>Изменения структуры алюминия в зоне соударения со стальным шариком, движущимся со сверхзвуковой скоростью</i>	192
ЗЕЛЬДОВИЧ В. И., ХЕЙФЕЦ А. Э., ХОМСКАЯ И. В., АБДУЛЛИНА Д. Н., БАЛУШКИН С. В., СИМОНОВ А. Ю., КУЛИКОВ Г. В. <i>Схождение медных толстостенных оболочек под действием взрыва</i>	194
6 Экспериментальные методики и научное оборудование	196
ГАРМАШЕВ А. Ю., ПЕТРОВ Д. В., КОЗЛОВ Е. А., ПАВЛЕНКО А. В., ТАРЖАНОВ В. И., КУЧКО Д. П., РАЛЬНИКОВ М. А., СМИРНОВ Е. Б., БОЧКОВ А. В. <i>Лазерно-интерферометрическая диагностика быстропотекающих процессов</i>	197
ПРУУЭЛ Э. Р. <i>Методики исследования детонационных свойств энергетических материалов ИГиЛ СО РАН</i>	198
РУБЦОВ И. А., БУХТИЯРОВ А. В., ЗУБАВИЧУС Я. В., КАЗАНЦЕВ С. Р., КАШКАРОВ А. О., КУПЕР К. Э., ПРУУЭЛ Э. Р., СТУДЕННИКОВ А. А., ТЕН К. А., ТОЛОЧКО Б. П., ХАЛЕМЕНЧУК В. П., ШЕХТМАН Л. И. <i>Станция исследования быстропотекающих процессов на источнике синхротронного излучения ЦКП «СКИФ»</i>	199
АУЛЬЧЕНКО В. М., ГЛУШАК А. А., ЖУЛАНОВ В. В., ЖУРАВЛЕВ А. Н., КИСЕЛЕВ В. А., КУДРЯВЦЕВ В. Н., ПИМИНОВ П. А., ТИТОВ В. М., ШЕХТМАН Л. И. <i>Разработка детектора для изучения быстропотекающих процессов на пучке синхротронного излучения</i>	200
АУЛЬЧЕНКО В. М., ГЛУШАК А. А., ЖУЛАНОВ В. В., ТИТОВ В. М., ШЕХТМАН Л. И. <i>Текущее состояние разработки однокоординатного твердотельного микрополоскового детектора рентгеновского излучения</i>	201
ЯГОДНИКОВ Д. А., ЗАЙЦЕВ В. Н., ЛОХАНОВ И. В., НОВИКОВ А. О., ЛАРИОНОВ И. А., ГРЯЗНОВ А. Ю., ПОТРАХОВ Н. Н. <i>Экспериментальные исследования внутрибаллистических характеристик модельного ракетного двигателя твердого топлива методом рентгенографии</i>	202
ПАЛЬЧИКОВ Е. И., РЯБЧУН А. М., ПАРАСКУН А. Г. <i>Спиральный генератор высоковольтных импульсов с разделённой в пространстве индуктивной и ёмкостной частью</i>	203

ГРЕБЁНКИН Г. А., СМЕРНОВ Е. Б., САРАФАННИКОВ А. В., ПРОСВИРНИН К. М., ГАЛИУЛЛИН И. Г., АХЛЮСТИН И. А., ЕГАНОВ К. В., МИРОШКИН К. М., ГРЕМИТСКИХ А. С. <i>Применение радиоволнового метода регистрации для определения относительной метательной способности бризантных взрывчатых веществ</i>	205
ГАЛИУЛЛИН И. Г., ГАРМАШЕВ А. Ю., СМЕРНОВ Е. Б., САРАФАННИКОВ А. В., КУЧКО Д. П., ПРОСВИРНИН К. М., ПАНКРАТОВ Д. Г., ЕГАНОВ К. В., ВОРОБЬЕВ А. В., ГРЕМИТСКИХ А. С. <i>Регистрация откольных явлений в медном лайнере, метаемом при взрыве бризантного взрывчатого вещества на основе октогена</i>	206
СТАНКЕВИЧ А. В. <i>Регистрация массовой скорости перемещения молекулярных пучков продуктов разложения вещества</i>	207
ГЛЫБИН А. М., ГУСЬКОВ П. Н., ЕГОРЫЧЕВ Б. Т., ИВАНОВСКИЙ А. В., КЛИМУШКИН К. Н., КУДЕЛЬКИН В. Б., МАМЫШЕВ В. И., МАТЦЕВ Ю. И., ПАВЛИЙ В. В., ПОЛЮШКО С. М., СИТНИКОВА Н. И., ТОРОПОВ К. С., ЦИБИКОВ З. С., ШАПОВАЛОВ Е. В. <i>Три режима работы малогабаритного дискового взрывомагнитного генератора с плоскими модулями для исследований в области высоких плотностей энергии</i>	208
ИВАНОВСКИЙ А. В., МАМЫШЕВ В. И. <i>Возможность достижения термоядерного зажигания при магнитном обжатии высокотемпературной замагниченной плазмы током дискового взрывомагнитного генератора</i>	209
БАРАНОВ В. К., БУЙКО А. М., ГАРАНИН С. Ф., ГЛЫБИН А. М., ГОЛУВИНСКИЙ А. Г., ЕГОРОВ Н. В., ЕРОФЕЕВ А. Н., ИВАНОВСКИЙ А. В., ИРИНИЧЕВ Д. А., КАРЕПОВ В. А., КЛИМУШКИН К. Н., КУДЕЛЬКИН В. Б., КУЗНЕЦОВ С. Д., МАМЫШЕВ В. И., МАТЦЕВ Ю. И., ПОЛЮШКО С. М., СИТНИКОВА Н. И., ТОРОПОВ К. С., ЦИБИКОВ З. С., ШАПОВАЛОВ Е. В., ЯНЕНКО В. А. <i>Применение дисковых взрывомагнитных генераторов для исследования ударной сжимаемости веществ</i>	210
БУЙКО А. М. <i>Расчёты безударного сжатия металлов до 40 Мбар при магнитной имплозии лайнеров от дисковых взрывомагнитных генераторов</i>	211
КОЛЕСОВ В. И., МАНАХОВА Е. С., ГУБИН А. С., ТЕРЕЩЕНКО М. Н., ЧЕРНАВКИН П. С., БАЗУРОВ И. А., АНИСИМОВ М. С. <i>Анализ гидридов титана до и после ударноволнового нагружения</i>	212
ГЛИБЕНКО О. В. <i>Применение методики динамических испытаний как способа оценки сопротивляемости материалов и их сварных соединений внештатным нагрузкам</i>	213
7 Задачи промышленности и безопасность	215
КРАЙНОВ А. Ю., МОИСЕЕВА К. М. <i>Моделирование распространения ударной волны от взрыва углеметановоздушной смеси в канале с разветвлениями</i>	216
КАСЫМОВ Д. П., ПЕРМИНОВ В. В., ГОЛУБНИЧИЙ Е. Г., ЯКИМОВ А. С. <i>Моделирование процесса тепломассопереноса в композиционных материалах при зажигании частицами, нагретыми до высокой температуры</i>	217
ЗАЛОЗНЫЙ В. А., ЗАПОРОЖЧЕНКО Я. И. <i>Методика определения норм загрузок ВМ для стальных кабин</i>	219
ГАЕНКО О. И., КОНЮХОВ И. Е., МУРАВЛЕВ Е. В., КУДРЯШОВА О. Б., ТИТОВ С. С. <i>Распыление дезактивирующих аэрозолей с помощью энергии ВЭМ</i>	221
КОЗЛОВ В. А., КАЗУТИН М. В., КОЗЫРЕВ Н. В. <i>Воспламенительные композиции на основе малотоксичных компонентов</i>	222

КУЗАВОВ В. Т. <i>Модель разрушения крепежных шпилек гидроагрегата №2 Саяно-Шушенской ГЭС</i>	224
ЯНОВСКИЙ Л. С., ЕЖОВ В. М., ИЛЬИНА М. А. <i>Исследования в обеспечение разра-ботки метода оценки ресурса авиационных масел</i>	226
АНИСИЧКИН В. Ф. <i>О влиянии ядра земли на климат</i>	227
КОПТЕВ М. Ю., САЗОНОВ М. С. <i>Пожаровзрывоопасность полимерных материалов</i>	230
Авторский указатель	232

Секция 1

Кумулятивные явления, в том числе магнитная кумуляция

Проблемные вопросы исследования кумулятивных зарядов

О. В. Свирский, М. А. Власова

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

В текущем году исполняется 100 лет проведению первых в России систематических исследований кумулятивных зарядов, выполненных профессором М. Сухаревским в 1923 – 1926 годах. Он также, вероятно, впервые применил термин «кумуляция» к исследованию зарядов с полостью («hollow charge») [1].

В настоящем докладе приводится краткий обзор наиболее интересных, по мнению авторов, работ, выполненных в Институте Физики Взрыва РФЯЦ–ВНИИЭФ в последние годы. Направления работ охватывают все этапы функционирования кумулятивных зарядов от формирования струи до взаимодействия с высокопрочными стальными преградами.

Рассмотрены вопросы формирования когерентного лидирующего участка струи, а также «аппендикса» [2] – промежуточного состояния течения между струей и пестом. Представлены результаты практического применения базовых моделей пластического [3] и объёмного разрушения кумулятивных струй из металлов и порошковых композиций. Показывается, каким образом различие механизмов разрушения влияет на критические условия проникания этих струй [4]. Построен рейтинг металлов по перспективности применения в облицовках кумулятивных зарядов. Показано, что место металла в рейтинге существенно зависит от уровня технологии снаряжения зарядов [5]. Анализируется механизм влияния мощности используемого ВВ на пробивную способность зарядов [6].

Список литературы

1. *М. Сухаревский* Исследование вопроса о возможности увеличения бризантного действия взрывчатых веществ методом кумуляционной волны. Война и техника. – 1926.
2. *M. Mayselles, E. Hirsch* «The Appendix.» Proceedings of the 24th International Ballistics Symposium, New Orleans, Louisiana, USA. – 2008. – V. 1. – P. 49–57.
3. *Бабкин А. В., Ладов С. В., Маринин В. М., Федоров С. В.* Закономерности растяжения и пластического разрушения металлических кумулятивных струй. Прикладная механика и техническая физика. – 1999. – Т. 40, № 4. – С. 25–35.
4. *Власова М. А., Свирский О. В.* Причины прекращения проникания кумулятивной струи // XXIII Международная конференция «Харитоновские тематические научные чтения». – Саров. – 2022.
5. *Свирский О. В., Власова М. А.* Рейтинговая оценка металлов по перспективности их применения в облицовках кумулятивных зарядов. Известия РАН. – Москва. – 2006. – № 3(48). – С. 83–88.
6. *Власова М. А., Свирский О. В.* Влияние мощности ВВ на оптимальные параметры облицовки кумулятивного заряда. 16 Международная конференция «Забабахинские научные чтения». – Снежинск. – 2023.

Пластическое и объёмное разрушение кумулятивных струй из порошкового молибдена

О. В. Свирский, М. А. Власова, Е. А. Галжин, А. К. Артемьян, М. И. Ткаченко, А. М. Подурец

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

Молибден и вольфрам теоретически признаются наиболее перспективными металлами для практического применения в кумулятивных зарядах [1, 2]. Однако, высокая температура плавления затрудняет изготовление облицовок из них традиционными для меди способами раскатки иковки [3]. Эффективным решением вопроса является применение технологий порошковой металлургии и селективного лазерного плавления (СЛП).

Целью работы является непосредственное сравнение результатов применения этих двух технологий путём рентгенографической съёмки молибденовых кумулятивных струй. Наблюдалось два качественно различных вида разрушения – пластическое (при использовании порошковой металлургии) и объёмное (при технологии СЛП). При обработке полученных снимков определялись параметры струи, характеризующие её состояние на несколько моментов регистрации.

Предельные параметры пластического разрушения молибденовой струи (полная длина, время разрыва) несколько уступают соответствующим параметрам для медных струй, однако, по оценке авторов являются достаточными для получения большей пробивной способности за счёт повышения скорости струи и плотности материала.

При объёмном разрушении струи наблюдается её существенное разуплотнение, особенно характерное для лидирующего участка, и нарушается необходимое условие сохранения высокой пробивной способности для струй из порошковых композиций – отсутствие радиального расширения до завершения проникания [4].

Список литературы

1. *M. Held*. Liners for shaped charges, *Journal of battlefield technology*. *Journal of Battlefield Technology*. – 2001. – V. 4, № 3. – P. 1–6.
2. *О. В. Свирский, М. А. Власова* Рейтинговая оценка металлов по перспективности их применения в облицовках кумулятивных зарядов. *Известия РАН*. – 2006. – Т. 48, № 3. – С. 83–88.
3. *A. Lichtenberger, N. Verstraete, D. Salignon, M. T. Daumas, and J. Collard* Shaped Charges with Molybdenum Liner. *Proceedings of the 16th International Ballistics Symposium*. – 1996. – V. 1. – P. 49–57.
4. *C. Voumard, H.-P. Roduner, W. Santschi and H. Wisler* Performances and Behaviour of WCu-Pseudo-Alloy Shaped Charges With a Simple Model for Calculating the Stand-Off Curve. *19th International Symposium on Ballistics*. – 2001. – P. 1479–1485.

Особенности применения модели распада медных кумулятивных струй

М. А. Власова, О. В. Свирский

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

Наиболее распространённая (базовая) модель пластического разрушения представленная в работах исследователей России [1] и США [2] определяет параметры пластического распада кумулятивных струй (КС) тремя основными параметрами A , B (безразмерные константы модели) и C – скорость пластического разрушения (управляющий параметр материала). Начальные условия растяжения ограничиваются заданием производной зависимости объёма материала от скорости dV/dv .

Целью настоящей работы является определение возможности расчётного описания в рамках базовой модели экспериментальных параметров разрыва кумулятивных струй для зарядов различного (от 40 до 150 мм) диаметра, а также определение влияния на эти параметры микроструктуры (размера зерна) медных облицовок. Экспериментальные значения параметров определялись путём обработки снимков КС, полученных методами рентгенографической и синхробаллистической регистрации.

Особенности полученных экспериментальных зависимостей параметров разрыва от микроструктуры и диаметра заряда (в частности, наличие масштабного эффекта) указывают на необходимость доработки рассматриваемой расчётной модели. Одним из необходимых дополнений, по мнению авторов, является введение дополнительного параметра, учитывающего форму элементов фрагментированной струи.

Список литературы

1. *Бабкин А. В., Ладов С. В., Маринин В. М., Федоров С. В.* Закономерности растяжения и пластического разрушения металлических кумулятивных струй. Прикладная механика и техническая физика. – 1999. – Т. 40, № 4. – С. 25–35.
2. *P. C Chou, M. Grudza, Y. F. Liu and Z. Ritman.* Shaped Charge Jet Breakup Formula with Metal Anisotropy. Proceedings of the 13th International Symposium on Ballistics, Stockholm. – 1992.

Механизм зарождения и развития фрагментообразующих трещин в стальных цилиндрических оболочках при их взрывном нагружении

Е. Ф. Грязнов

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва

Взрывное нагружение металлических оболочек приводит к их фрагментации и высокоскоростному метанию фрагментов. Исследованию процессов, происходящих в оболочках под действием взрывной нагрузки посвящен целый ряд отечественных и зарубежных публикаций, в которых рассматриваются различные, во многом противоречивые физические модели разрушения оболочек.

В настоящей работе предпринята попытка построения физической модели, описывающей процессы зарождения и развития фрагментообразующих трещин. За основу при построении модели взяты результаты экспериментальных исследований, выполненных методами останковки, лазерной интерферометрии, высокоскоростной оптической регистрации процесса расширения оболочек, металлографического и фрактографического изучения фрагментов, измерения макродеформаций фрагментов и микродеформаций в теле фрагментов (метод Г.А. Смирнова-Аляева).

Комплексный анализ полученных результатов позволил построить $r-t$ диаграммы процессов зарождения и развития фрагментообразующих трещин в стальных оболочках. Показано влияние исходных свойств сталей на эти процессы. Проведена оценка скорости роста трещин. Показано, что процессы развития трещин в оболочках из малоуглеродистых и среднеуглеродистых сталей заметно отличаются. Проведена оценка скорости распространения радиальных трещин отрыва и сдвиговых трещин во внешней зоне стенки оболочки.

Модель цилиндрической кумуляции

С. Н. Буравова

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мер-жанова РАН, Черноголовка

Кумуляция – явление, которое описывается двумя взаимосвязанными процессами: движением ударной волны к оси образца и перемещением возмущений по его фронту. Возмущения (неоднородности) в виде тройных ударных конфигураций являются следствием сужения потока в цилиндрических образцах. Такие возмущения генерируются ударной волной постоянно в течение всего движения ударной волны к оси. Усиление конфигураций происходит при их столкновениях и путем слияния с более мелкими возмущениями. Усиленные конфигурации (выступы) локализуются, что проявляется в разделении фронта ударной волны на отдельные сектора, где они совершают колебательные движения от столкновения до столкновения с соседними конфигурациями. Рисунок демонстрирует рельеф поверхности внутренней полости образца, который отследил форму фронта ударной волны [1]. Образование выступов на фронте – явление общее и не зависит от материала образца. Медь и фторопласт, имеющие качественно различные структуры, образуют схожую систему трещин [2]. Процесс локализации был замечен в [2], где его назвали «некристаллографическим механизмом деформации».

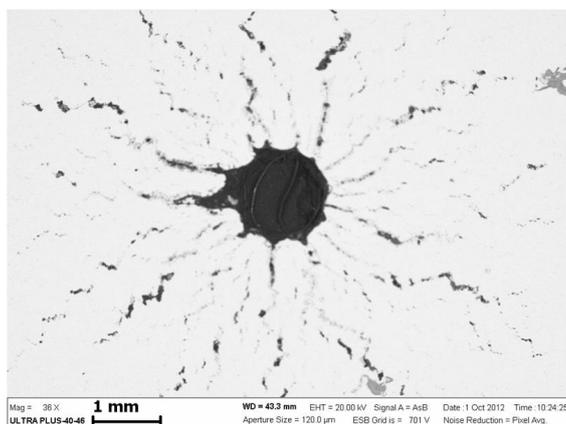


Рис. 1: Поперечный шлиф сечения толстостенной стальной трубы после всестороннего обжата детонационной волной.

Столкновения продольных волн встречных конфигураций образуют под фронтом ударной волны области, где материал подвергается тройному сжатию. Выход сжатого до высокого давления материала на поверхность фронта ударной волны сопровождается локальным его усилением, обновлением тройных конфигураций и инициированием стоячих волн, колебательное движение которых совершается под фронтом, в ударно сжатом материале. Процесс кумуляции завершается, когда высота выступов становится равной расстоянию ударной волны до оси симметрии. Ударная волна подходит к своему критическому расстоянию, а околоосевое пространство уже занято ее собственными выступами. Лобовое столкновение выступов приводит к росту давления, а возникшая отраженная волна останавливает набегающий поток.

Пример. Для определения высоты выступов на фронте ударной волны δ рассматривался цилиндрический образец, с диаметр 20 мм, а начальная скорость динамического нагружения

– 0,3 км/с. Предполагается, что одномерный поток, обладающий осевой симметрией, имеет гладкий фронт ударной волны. Массовая скорость его U зависит от соотношения радиусов r и r_0 , $U = U_0\sqrt{r_0/r}$. Для оценки давления возмущенной волны p_i , начальный радиус разделен на 10 интервалов, и для каждого интервала давление находилось по формуле $p_i = 0,5[P_{(i-1)} + P_i]/2$, где P_i – давление за фронтом гладкой ударной волны. Фронт возмущенной волны из-за наличия выступов гофрирован, и его общая площадь превышает площадь сечения $2\pi r_i$. Решение уравнения $U_i^2 + \frac{c_0}{b}U_i - \frac{p_i}{\rho_0 b} = 0$, позволяет получить массовую скорость расправленной возмущенной ударной волны.

Высота выступов зависит от числа сформировавшихся выступов n , и равна $\delta_i = 2\sum_1^i (R_i - r_i)/n$. Критический радиус оказался равным $r^* = \delta = 1,03$ мм, а давление возмущенной волны – 42,8 ГПа (начальное давление – 11,8 ГПа).

Список литературы

1. Буравова С. Н., Петров Е. В., Щукин А. С. Особенности перехода откольных трещин в полосы локализованной деформации. ФГВ. – Т. 52, № 5. – С. 131–139.
2. Нестеренко В. Ф., Бондарь М. П. Локализация деформации при схлопывании толстостенного цилиндра. ФГВ. – 1994. – Т. 36, № 2. – С. 99–111.

Влияние неустойчивости на схлопывание металлических оболочек

А. В. Бабкин, А. С. Новосельцев, С. В. Ладов

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва

В докладе представлены результаты исследования неустойчивости, возникающей при схлопывании оболочек, в частности, облицовок кумулятивных зарядов. Изначально такая неустойчивость инициировалась гармоническими поверхностными возмущениями или же возмущениями параметров нагрузки. Неустойчивость проявлялась в форме развития с течением времени этих возмущений. Отсутствие или же ограниченный рост поверхностных возмущений рассматривались как проявление устойчивости процесса деформирования оболочки. В работе приняты во внимание результаты, полученные как с помощью численного моделирования, так и с опорой на известные экспериментальные данные. Представлены результаты численного моделирования и проведённого параметрического анализа. Сформулированы выводы о причинах и возможных формах проявления неустойчивости деформирования схлопывающихся металлических оболочек, а также об определяющих параметрах этого процесса, о его особенностях и закономерностях.

Список литературы

1. Физика взрыва. Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – В 2 т. – Т. 2. – М.: Физматлит. – 2004. – 656 с.
2. *Пай В. В., Титов В. М., Лукьянов Я. Л., Пластинин А. В.* Исследование неустойчивости конической облицовки в процессе формирования кумулятивной струи. ФГВ. – 2018. – Т. 54, № 4. – С. 69–73.
3. *Зельдович В. И., Фролова Н. Ю., Хейфец А. Э., Шорохов Е. В.* Деформационные явления при сжатии металлических цилиндрических оболочек. Потеря устойчивости. ФГВ. – 2019. – Т. 55, № 4. – С. 92–102.
4. *Михайлов А. Л., Невмержуцкий Н. В., Раевский В. А.* Деформационные явления при сжатии металлических цилиндрических оболочек. Потеря устойчивости. УФН. – 2011. – Т. 181, № 4. – С. 410–416.
5. *Новосельцев А. С., Бабкин А. В.* Математическая модель схлопывания упругопластической оболочки с учетом возможного развития неустойчивости процесса. Инженерный журнал: наука и инновации. – 2019. – № 5.
6. *Новосельцев А. С., Бабкин А. В.* Численный анализ схлопывания упругопластической оболочки с учетом развития неустойчивости процесса. Инженерный журнал: наука и инновации. – 2020. – № 3.

Формирование кумулятивной струи при взрывном обжатии составной конической облицовки

Я. Л. Лукьянов, В. В. Пай

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

В работах [1–3] показано, что в процессе обжатия конической облицовки продуктами детонации взрывчатых веществ, происходит потеря устойчивости, выражающаяся в образовании складок, ориентированных вдоль ее образующей. При нанесении на внутреннюю сторону облицовки рисунок вдоль ее образующей, они являются источниками потери устойчивости изначально осесимметричного течения металла [3], и при надлежащем выборе их количества n , зависящем от числа Рейнольдса, реализуется течение близкое к симметричному n - го порядка. Образующаяся из такой облицовки струя на рентгенограмме не имеет визуальных отличий от сформированной из гладкой конической облицовки таких же размеров и формы.

В данной работе производилось взрывное обжатие медной конической оболочки, состоящей из трех одинаковых фрагментов. На первом этапе из медного прутка на станке с ЧПУ вытачивался конус с толщиной стенки 2,5 мм, высотой 40 мм и углом раствора 45°. Далее он разрезался на электроискровом станке на три одинаковых фрагмента. Конфигурация разрезов представляла собой ступеньку и была выбрана таким образом, чтобы затруднить радиальное смещение фрагментов облицовки относительно друг друга и предотвратить прорыв газообразных продуктов детонации во внутреннюю полость. Обжатие осуществлялось продуктами детонации заряда гексогена толщиной 20 мм при скорости детонации 6,0 км/с. Изображение кумулятивной струи было получено методом импульсной рентгенографии с использованием установки Арион-600. При этом пест распадался на три фрагмента, а кумулятивная струя на снимках не отличалась от струи, полученной из сплошной конической облицовки.

Таким образом, показана возможность изготовления кумулятивных облицовок путем штамповки ее фрагментов из листа, что позволяет упростить и ускорить их производство в сравнении с используемой в настоящее время технологией ротационной раскатки. К тому же, как показано в работе [4], сохраняющаяся даже после отжига при температуре 4200°С текстура, образовавшаяся в процессе раскатки, негативно влияет на глубину пробивания кумулятивной струи. Тогда как при штамповке элементов облицовки есть возможность избежать неоднородности структуры и с помощью предварительной термообработки получить оптимальный размер зерна.

Список литературы

1. В. В. Пай, В. М. Титов, Я. Л. Лукьянов, А. В. Пластинин Исследование неустойчивости конической облицовки в процессе формирования кумулятивной струи. ФГВ. – 2019. – Т. 55, № 4. – С. 69–73.
2. В. В. Пай, В. М. Титов, Я. Л. Лукьянов, К. М. Зубашевский. Измерение температуры кумулятивной струи из конической облицовки. ФГВ. – 2020. – Т. 56, № 3. – С. 123–126.
3. Я. Л. Лукьянов, В. В. Пай Влияние контролируемых возмущений на процесс потери устойчивости конической облицовки при формировании кумулятивной струи. ФГВ. – 2021. – Т. 57, № 6. – С. 127–130.
4. В. Г. Смеликов Устойчивость ограниченной кумуляции. Сборник научно-технических статей. Изд. 2-е исправленное и дополненное. – 2021. ISBN 978-5-6045476-8-7, 200 с.

Численное моделирование функционирования двухстадийных кумулятивных зарядов в условиях начального вращения

Г. С. Бабаева¹, С. С. Рассоха²

¹Научно–производственное объединение «Прибор» им. С. С. Голембиовского», Москва

²Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва

Вращение кумулятивного заряда (КЗ) является одним из факторов, которые влияют на его функционирование и приводят к уменьшению глубины формируемого в преграде отверстия [1]. Одним из возможных способов противодействия этому эффекту является применение двухстадийных (полилайнерных) КЗ [2, 3]. Такие заряды состоят из двух облицовок, внешняя из которых, большего диаметра, ударяется о внутреннюю, меньшего диаметра, формируя из последней кумулятивную струю (КС). Эффект увеличения глубины проникания в условиях вращения достигается за счет меньшего начального радиуса внутренней облицовки по сравнению с классическим зарядом с одной облицовкой. В работе проведено численное моделирование функционирования классических и двухстадийных зарядов двух диаметров (40 мм и 125 мм), вращающихся с различными начальными угловыми скоростями с помощью модифицированной инженерной методики В.М. Маринина [4] и метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH). Показано, что КС, формируемая из двухстадийного КЗ, имеет меньшую угловую скорость вращения по сравнению с классическим КЗ, следовательно, формирует каверну большей глубины. Также проанализировано влияние конструктивных параметров двухстадийного заряда на массовые и кинематические характеристики КС, ее глубину проникания в стальную гомогенную полубесконечную преграду.

Список литературы

1. *Рассоха С. С., Ладов С. В., Бабкин А. В.* Исследование вращательного движения оребренных кумулятивных облицовок. ПМТФ. – 2019. – Т. 60, № 4. – С. 608–611.
2. *Grace F. I., Golski S. K., Scott B. R.* Hydrocode Computations and Experimental Investigations of Explosive Staged Shaped Charge Devices. Technical Report ARBRL-TR-02382. – 1981. – P. 32.
3. *Минин И. В., Минин О. В.* Перспективы развития кумулятивных снарядов, стабилизируемых вращением. Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т. 5, № 2. – С. 152–157.
4. *Бабкин А. В., Рассоха С. С., Ладов С. В.* Методика расчета параметров функционирования вращающихся кумулятивных зарядов. Оборонная техника. – 2010. – № 1–2. – С. 23–30.

Молотковый, пружинный и кондукторный эффекты в кумулятивных струях. Обеспечение устойчивости ограниченной кумуляции

В. Г. Смеликов, А. С. Пирозерский, Н. В. Порхачев, А. Н. Лошкарев, А. А. Плотников

Научно-производственное объединение «Базальт», Москва

Явление компенсации потерь бронепробиваемости кумулятивных зарядов при их вращении [1] является прямым свидетельством твердотельности кумулятивных струй (КС), обладающих, как и кумулятивные облицовки, текстурой деформации и, следовательно, анизотропией свойств [2]. В этой же работе установлено явление пульсации кольцевых очагов деформации при ротационной вытяжке и ударноволновом нагружении кумулятивной облицовки (рис. 1). Эта пульсация происходит при известной в кузнечной науке задержке пластического течения нагруженного материала от момента приложения нагрузки на миллисекундные времена. В результате синергизма баротермического действия взрыва материал разных частей КС (за «время ее жизни» ~ 1 мс) успевает побывать в предплавильном, трансплавильном и сверхплавильном, т.е. перегретом твердотельном состоянии, из-за конкуренции скоротечной (до ~ 300 нс) термобарической ионизации КС и еще более скоротечной (до ~ 10 нс) инерционной атомизации струи и песта. Процесс термобарической диссоциации меди, скоротечность которого оценивается пикосекундным диапазоном (10^{-12} с), успевает завершиться в пределах толщины ударного фронта. При переходе производной давления по объему через нуль $\frac{dP}{dV} = 0$, ударно нагруженный материал «переживает» метастабильное неустойчивое состояние с образованием пучностей и шеек в виде волн на рентгенограммах, в движущейся КС вследствие «молоткового эффекта» (рис. 2). Этот эффект проявляется в стальной преграде в виде периодических расширений и сужений пробитого канала с длинами волн $\sim 5...25$ мм (рис. 3).

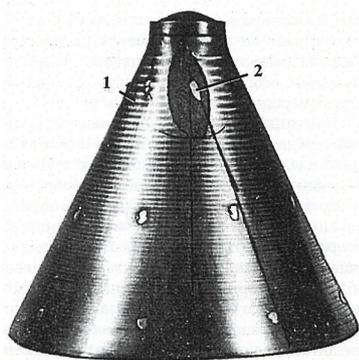


Рис. 1: Пульсация кольцевого очага пластической деформации (1), а также вид пластически деформированного штифта (2).

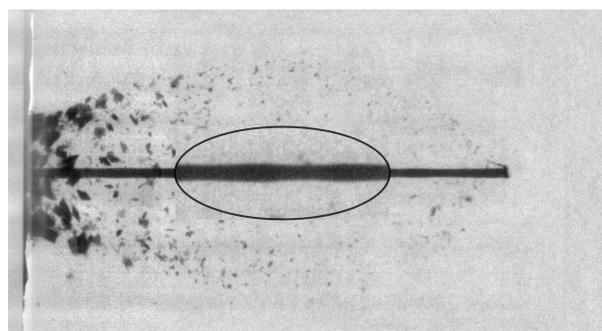


Рис. 2: Рентгенограмма КС после пробития преграды 310 мм (в овале масштаб 2:1).

В статье также рассматривается эффект значительного повышения скорости КС за преградой по сравнению со средней скоростью пробития преграды (в авторской терминологии это третий эффект – «пружинный»), а также эффект увеличения глубины пробития разнесенной преграды – «кондукторный эффект» [3]. В авторских терминах молотковый, пружинный и кондукторный эффекты представлены в Предисловии, а также Послесловии сборника научно-технических статей [4].

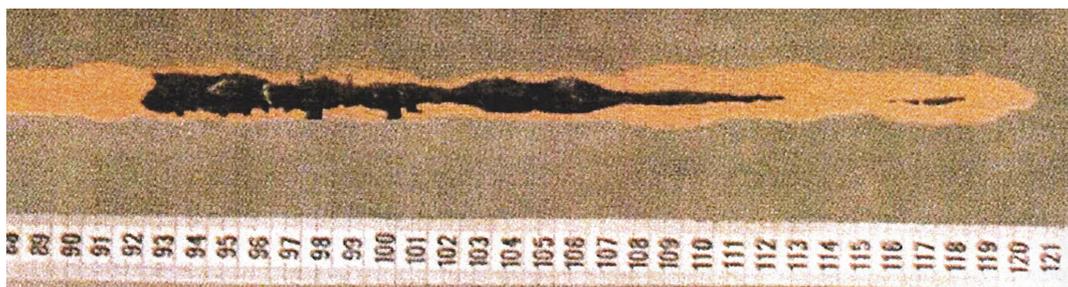


Рис. 3: Упруго-пластические волны в непробитой преграде.

Список литературы

1. *Смеликов В. Г., Кузьмин С. М., Дзядух О. Ф., Зайцев В. П.* Влияние направления раскатки воронки на кумулятивный эффект. Вопросы специального машиностроения. Сер. 1. – 1984. – № 3(118).
2. *Смеликов В. Г.* Передовой производственный опыт. ЦНИИНТИ. – 1987. – № 5.
3. *Свирский О. В., Власова М. А., Крутяков В. А., Нечаев А. И., Петров Е. И.* Парадоксы прямого и обратного эффектов разнесенной преграды. Сб. докл. VIII научн. конф. РАН «Современные методы проектирования. . . » в 2-х томах. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. – 2014. –Т. 1. – С. 309.
4. *Смеликов В. Г.* Устойчивость ограниченной кумуляции. Издание 2-е. – Студия «Этника». – 2021. – 200 с.

К задаче о схлопывании пузырька в идеальном газе: автомодельное решение с бесконечной энтропией

В. Н. Ногин

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

Течения, возникающие при схлопывании сферической полости в идеальном газе, изучались в классических работах [1–3] в предположении изэнтропичности течения. Было показано, что существует автомодельное решение второго рода, для которого показатель автомодельности k определяется из условия прохождения интегральной кривой через особую точку, причем при любом показателе адиабаты $\gamma > 1$ имеет место неограниченная кумуляция, скорость границы полости $\dot{R} \sim R^{-(k-1)} \rightarrow \infty$.

Численные расчеты задачи о схлопывании полости с начальным радиусом R_0 показали, что для значений $\gamma = 3$ и $\gamma = 7$ вблизи фокусировки на расстояниях $r \ll R_0$ полное решение уравнений газодинамики стремиться к автомодельному [1, 2]. В то же время известно [4, 5], что при $\gamma \leq \frac{5}{3}$ до момента фокусировки граница полости движется с постоянной скоростью. При $\gamma > \frac{5}{3}$ граница полости движется некоторое время с постоянной скоростью, однако, после достижения некоторого радиуса изэнтропичность течения нарушается, при этом граница полости начинает ускоряться. В данной работе показано, что для найденных в [1–3] решениях предположение об изэнтропичности течения не выполняется, а автомодельные решения задачи необходимо искать в более широком классе адиабатических течений. Найденны значения показателя автомодельности для различных значений γ . Особенность полученного решения состоит в том, что на границе полости энтропия стремится к бесконечности. Показано, что решения [1–3] соответствуют течению, возникающему при выдвигании поршня на границе с газом к центру по степенному закону.

Список литературы

1. *Hunter. C.* On the collapse of an empty cavity in water. *Journ. Fluid Mechan.* – 1960. – V. 8, № 2. – P. 241–263.
2. *Брушлинский К. В., Каждан Я. М.* Об автомодельных решениях газовой динамики. *Успехи мат. наук.* – 1963. – Т. 18, № 2. – С. 3–23.
3. *Забабахин Е. И., Забабахин И. Е.* Явления неограниченной кумуляции. *Наука.* – 1988.
4. *Каждан Я. М.* Сферический разлет газа к центру. Препринт ИПМ АН СССР, М. – 1969. – № 2.
5. *Баутин С. П.* Схлопывание одномерной полости. *ПММ.* – 1982. – Т. 46, № 1. – С. 50–59.

О влиянии зазоров на динамику разгона двухслойной пластины

*А. В. Красильников, В. Н. Ногин, А. Е. Ковалев, А. В. Ольховский, Д. А. Варфоломеев,
Н. С. Жильева*

*Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина,
Снежинск*

Проведён анализ процесса разгона двухслойной пластины с зазором. Для простой модельной системы получены приближенные формулы для расчёта скорости движения свободной поверхности на начальной стадии разгона пластины. Показано, что наличие зазора приводит к дополнительному скачку скорости по сравнению с ситуацией без зазора. Проведены одномерные и двумерные расчёты метания двухслойной пластины по программам «ВОЛНА» [1] и «СПРУТ» [2], соответственно, подтвердившие приближённые формулы. С использованием методики PDV проведены эксперименты с многоканальной регистрацией скорости свободной поверхности двухслойной пластины, подтвердившие значимое влияние зазора.

Список литературы

1. Комплекс программ «ВОЛНА» и неоднородный разностный метод для расчета неустановившихся движений сжимаемых сплошных сред / В. Ф. Куропатенко, Г. В. Коваленко, В. И. Кузнецова, Г. И. Михайлова, Г. Н. Сапожникова // *Вопр. атомной науки и техники. Сер. «Математическое моделирование физических процессов»*. – 1989. – № 2. – С. 9–17.
2. *Быченко В. А, Гаджиева В. В.* Метод СПРУТ расчета одномерных неустановившихся течений разрушаемых сред // *ВАНТ, сер. «Методики и программы численного решения задач математической физики»*. – 1978. – В. 2(2).

Кумулятивное струеобразование при взрывном обжатии цилиндрических оболочек

Е. Ю. Потанина, А. В. Гуськов

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

Цилиндрическая кумуляция имеет ряд преимуществ перед конической: низкий градиент скорости получаемой струи, снижение влияния фокусного расстояния, высокая скорость кумулятивной струи. Однако, образование струи в цилиндрической кумуляции – это процесс, сопровождаемый рядом проблем: термический взрыв при обжатии, малая толщина получаемой кумулятивной струи и т.д. При этом существует ряд известных критериев и способов достижения кумулятивного струеобразования при обжатии цилиндрических оболочек [1–3].

В настоящей работе исследовано кумулятивное струеобразование при обжатии цилиндрических оболочек при помощи гидродинамической модели [4] и численного моделирования. Предложен и обоснован способ улучшения струеобразования в цилиндрической кумуляции – увеличение радиальной скорости схождения оболочки. Обозначен критический фактор в зоне струеобразования – высокая температура. Предложен способ нормализации температуры в зоне струеобразования – использование трубки малого диаметра из тугоплавкого ниобия внутри основной облицовки.

Для увеличения скорости метания предложена двухкаскадная схема цилиндрического кумулятивного заряда: составлена математическая модель режимов ее функционирования, проведено численное моделирование в ПО Ansys Autodyn.

Предложена конструкция двухкаскадного цилиндрического заряда с конусным внешним каскадом как прототип экспериментальной установки (рисунок 1).

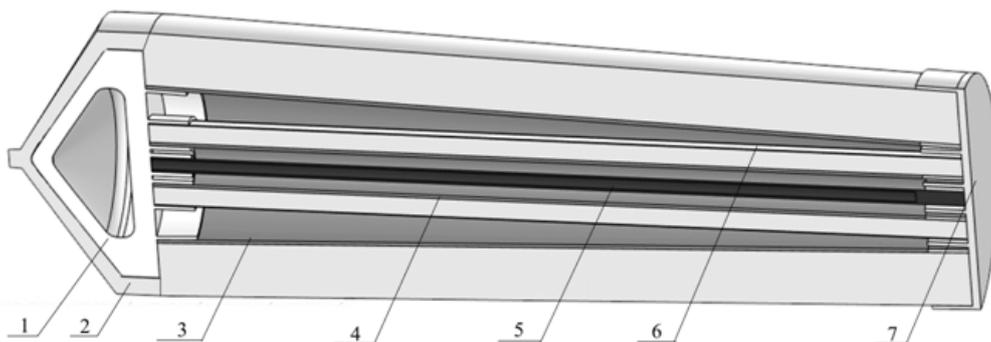


Рис. 1: Схема экспериментальной сборки. 1 – инертная линза с направляющими; 2 – иницирующий заряд; 3 – внешний конусный заряд ВВ с оболочкой; 4 – внутренний цилиндрический заряд с оболочкой; 5 – «холодный» лайнер; 6 – фольга; 7 – диафрагма.

Проведено численное моделирование процесса функционирования предложенного устройства. Численный эксперимент определил следующее:

- образуется кумулятивная струя из материала «холодного» лайнера диаметром 3 мм;
- температура в зоне струеобразования и струе не превышает температуру кипения;
- скорость головного участка кумулятивной струи около 18,8 км/с.

Список литературы

1. *Тришин Ю. А.* Физика кумулятивных процессов: Монография. – Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН. – 2005. – 324 с.
2. *И. А. Балаганский, Л. А. Мерзиевский, В. Ю. Ульяницкий, И. А. Батаев, А. А. Батаев, А. Д. Матросов, И. А. Стадниченко, И. С. Батраев, А. В. Виноградов.* Генерация гиперскоростных потоков частиц при взрывном обжати керамиических трубок. ФГВ. – 2018. – Т. 54, № 1. – С. 132–138.
3. *Титов В. М.* Возможные режимы гидродинамической кумуляции при схлопывании облицовок. Докл. АН СССР. – 1979. – Т. 247, №5. – С. 1082–1084.
4. *Лаврентьев М. А.* Кумулятивный заряд и принципы его работы. Успехи математических наук. – 1957. – Т. 12, № 4(76). – С. 41–56.
5. *Литвинов В. Л., Потанина Е. Ю., Гуськов А. В., Милевский К. Е.* Разгон трубки в задаче цилиндрической кумуляции. В сборнике: Наука Промышленность Оборона. труды XXIII Всероссийской научно-технической конференции: в 4 т. Новосибирск. – 2022. – С. 189–194.

Пробитие многослойной преграды кумулятивным скважинным перфоратором с комбинированной облицовкой

Е. Ю. Потанина, А. В. Гуськов

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

При скважинной перфорации кумулятивной струей необходимо пробить сложную многослойную преграду, состоящую из слоя скважинной жидкости (10...15 мм), стенки обсадной колонны (6...12 мм стали) и слоя цементного камня (20...50 мм), а затем углубиться в породу. Глубина проникания кумулятивной струи в такую сложную преграду для разных кумулятивных перфораторов колеблется в пределах 150...300 мм [1].

В работе предложено одно из наиболее перспективных направлений совершенствования кумулятивных облицовок, позволяющих сочетать глубину и диаметр пробития, основанного на принципе геометрической комбинации конического и коническо-кольцевого элементов (назовем такой заряд комбинированным). Комбинированный заряд позволяет формировать кумулятивные струи как в центральной, так и в кольцевой периферийной части кумулятивного заряда [2].

Для оценки эффективности функционирования кумулятивного заряда перфоратора такой геометрии проведено численное моделирование пробития многослойной преграды, описанной выше, в программном комплексе Ansys Autodyn (рис. 1).

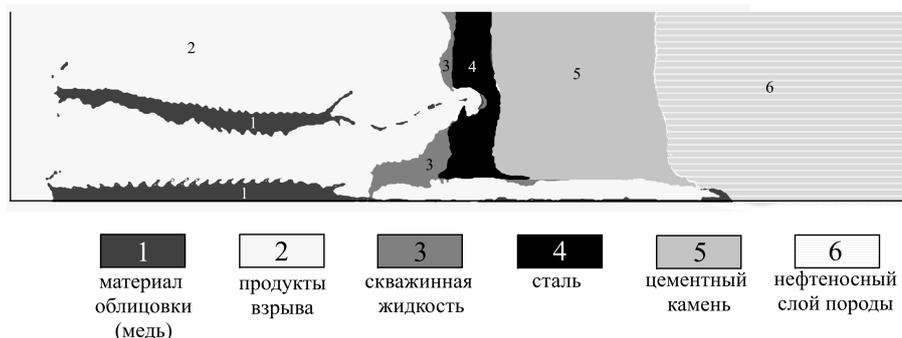


Рис. 1: Расчетные области для двух постановок задач.

При моделировании функционирования комбинированного скважинного перфоратора диаметр перфорационного канала равен 32 мм. При этом, расчет показал, что коническо-кольцевой элемент такой облицовки пробивает только часть многослойной конструкции, а центральный конический элемент облицовки формирует малый диаметр отверстия в преграде и незначительную глубину проникания в нефтеносный слой породы.

Однако, предложенная комбинированная конструкция является гибкой и позволяет регулировать в широком диапазоне геометрические параметры облицовок и зарядов, тем самым управлять распределением энергии ВВ относительно центральной конической облицовки, формирующей центральную кумулятивную струю, и коническо-кольцевого элемента облицовки, формирующий кольцевой кумулятивный нож.

Список литературы

1. В. В. Селиванов, И. Ф. Кобылкин, С. А. Новиков Взрывные технологии. - М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана.- 2008. - 645 с.

2. Патент № 2717853 Российская Федерация МПК E21B 43/117 (2006.01) F42B 1/028 (2006.01). Кумулятивный заряд перфоратора : № 2019112145 : заявл. 22.04.2019 : опубл. 26.03.2020 / Гриф Е.М., Гуськов А.В., Милевский К.Е. – 9 с.

Исследование особенностей поведения кумулятивных струй и пестов от облицовок из беспестовых материалов

Е. Я. Брагунцов

Институт прикладной физики, Новосибирск

Стремление увеличить дебет нефтяных скважин путем их перфорации кумулятивными зарядами с облицовками, обеспечивающими отсутствие закупорки отверстий в скважинах пестами, являлось одной из причин исследований поведения кумулятивных струй и пестов из различных беспестовых металлов. Беспестовые материалы необходимы также и для изготовления облицовок тандемных конструкций кумулятивных боеприпасов.

Известен способ изготовления кумулятивных облицовок для перфорации кумулятивными зарядами с этими облицовками нефтяных скважин, который заключается в прессовании конической облицовки из порошков меди и её спекание (подпекание) с целью получения некоторой невысокой технологической прочности. Наличие или отсутствие пестов в кратере мишени определялось разрезанием мишени. Пест в кратере мишени не обнаруживался. В то же время рентгеновские снимки показывают образование кумулятивной струи и песта, а также их наличие в процессе движения к мишени. Пест рассыпается при ударе о преграду, в результате чего обеспечивается отсутствие закупорки отверстий. Однако этот способ не годится для осуществления разлета пестов в процессе полета до их взаимодействия с мишенью.

В данной работе приводятся результаты исследований особенностей поведения кумулятивных струй и пестов от облицовок из беспестовых материалов, полученных методом порошковой металлургии.

Облицовки изготавливались следующим способом:

- прессование цилиндрических заготовок из металлических порошков пористостью не менее 25% (порометалл);
- спекание и токарное точение облицовок;
- пропитка пор раствором нитролака в ацетоне;
- сушка.

Поведение кумулятивных струй и пестов от облицовок из беспестовых материалов в различные моменты времени исследовалось с помощью рентгеноимпульсной съемки.

Показано, что кумулятивная струя в полете не разрушается на фрагменты, а состоит из отдельно летящих сфокусированных вдоль оси струи порошинок металла. Пест также состоит из отдельных порошинок металла, но разлетается в перпендикулярном от оси облицовки направлении за время $50 \div 200$ мкс практически до нулевых значений плотности за счет энергии выделяющихся газов.

Исследование пробивного действия кумулятивных зарядов с облицовками из беспестовых материалов показало, что их действие составляет $80\% \div 90\%$ от пробивного действия кумулятивных зарядов с облицовками из аналогичного монолитного материала.

Проведенные на модельных конструкциях тандемных кумулятивных зарядов головной схемы исследования характера взаимодействия струи основного заряда с пестами различных предзарядов показали отсутствие влияния предзарядов с облицовками из беспестовых материалов на пробивное действие основного заряда.

Неидеальная кумуляция

Е. Я. Брагунов

Институт прикладной физики, Новосибирск

Процесс формирования кумулятивной струй при косом соударении пластин, метаемых продуктами детонации, или при взрывном обжатии осесимметричных металлических облицовок, впервые объяснила гидродинамическая теория кумуляции, основанная на модели идеальной несжимаемой жидкости. В целом гидродинамическая теория кумулятивного эффекта остается простым и универсальным приближением. Однако некоторые факты, наблюдаемые экспериментально, в частности, наличие предельного угла струеобразования, особенности поведение металла в условиях формирования и растяжения кумулятивной струи, а также при ее проникании в преграду послужили причиной уточнения гидродинамической теории. Получено большое количество экспериментальных и теоретических результатов, обобщение которых можно найти, например, в [1]. Тем не менее, остаются вопросы, которые требуют объяснения [1–8]:

1. В экспериментах проявляется зависимость предельного удлинения струи от структурно-механических характеристик металла (величины зерна, наклепа, текстуры и анизотропии свойств), а также наблюдается наличие вязкого и хрупкого разрушения кумулятивных струй, несмотря на то, что гидродинамическая модель поведения металла в условиях кумулятивной струи таких зависимостей не предсказывает;
2. Наблюдается зависимость предельного удлинения и характера разрушения струи от химического (фазового) состава и степени чистоты металла;
3. Неизвестны причины возможного аномального удлинения материала кумулятивной струи перед разрушением на $1000\% \div 2000\%$;
4. Нет объяснения обнаруженной зависимости предельного удлинения струи от её начального диаметра и плотности;
5. Неизвестны причины появления начальных возмущений, вызывающих разрушение струи на множество фрагментов;

В данной работе продолжается развитие нового подхода к объяснению особенностей деформации металла в процессе кумуляции сформулированного в работе [3]. Подход основан на использовании дислокационных механизмов пластической деформации металлов. При этом учитывается влияние на состояние металла в струе ударно-волновых процессов, происходящих на стадии обжатия облицовки.

Установлены закономерности, более адекватно отражающие и объясняющие физические явления, происходящие при деформировании металла в процессе кумуляции.

Список литературы

1. Физика взрыва. Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, переработанное. – В 2 т. – Т. 2. – М.: Физматлит. – 2002. – 656 с.
2. Смеликов В. Г. Устойчивость ограниченной кумуляции. Известия РАН. – М.: Студия "Этника". – 2016. – 120 с.

3. *В. М. Фомин, В. И. Звезгинцев, Е. Я. Брагунцов.* Особенности растяжения и разрушения кумулятивных струй. ПМТФ. – 2020. – Т. 61, № 2. – С. 19–30.
4. *Свирский О. В., Власова М. А., Клопов Б. А. и др.* Аналитический метод расчета проникания струй кумулятивных зарядов. Труды международного семинара «Гидродинамика высоких плотностей энергии». – Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН. – 2004. – С. 461–472.
5. *Бабкин А. В., Ладов С. В., Федоров С. В., Маринин В. М.* Физические аспекты растяжения и разрушения кумулятивных струй в свободном полете. Труды международного семинара «Гидродинамика высоких плотностей энергии». – Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН. – 2004. – С. 473–490.
6. *Фомин В. М., Гулидов А. И., Сапожников Г. А. и др.* Высокоскоростное взаимодействие тел. – Новосибирск: Издательство СО РАН. – 1999. – 600 с.
7. *Колмаков А. И., Ладов С. В., Силаева В. И.* Влияние технологии изготовления, структуры и механических свойств облицовок на эффективность работы перфораторов. Труды МВТУ №340. Вопросы физики взрыва и удара. Вып. 2. – М.: МВТУ им. Баумана. – 1980. – С. 27–35.
8. *Баранов В. Г., Брагунцов Е. Я., Сотенко А. В.* Влияние фазового состава и степени чистоты металла облицовки на пробивное действие кумулятивных зарядов. Труды международного семинара «Гидродинамика высоких плотностей энергии». – Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН. – 2004. – С. 520–545.

Исследование «краевого эффекта» в цилиндрической кумуляции

Е. Я. Брагунов

Институт прикладной физики, Новосибирск

Эффект и условия образования кумулятивной струи из цилиндрической облицовки в научно-технической литературе достаточно хорошо описаны. Однако на сегодняшний день его использование затруднено. Дело в том, что среди металлических материалов (кроме бериллия) нет имеющих скорость звука близкую к скорости детонации штатных взрывчатых веществ (ВВ), а необходимым условием образования кумулятивной струи является условие $D = K \times C_0$, где D – скорость детонации ВВ; C_0 – скорость звука в материале облицовки; $K \approx 0,9$, экспериментальный коэффициент (поправка на пульсационный характер обжата цилиндрической облицовки вследствие ударно-волновых процессов при обжате облицовки).

Возможность практической реализации открывается при использовании ВВ со скоростью детонации близкой к скорости звука материала облицовки. Кроме того, возможность практической реализации открывается и при использовании «краевого эффекта». «Краевой эффект» возникает при использовании коротких кумулятивных зарядов с цилиндрическими облицовками. С переднего торца заряда идет волна разгрузки, уменьшающая на этом участке скорость обжата облицовки. В этом случае если длина заряда составляет не более $2 \div 2,5$ диаметров заряда, то струя образуется по всей длине внутренней цилиндрической поверхности. Наличие струеобразования ошибочно принимается за процесс стационарной цилиндрической кумуляции, каковым не является. Формируется кумулятивная струя с градиентом скоростей. «Краевым эффектом» а, следовательно, и градиентом скоростей легко управлять, изменяя условия разгрузки на торце заряда. Предложена методика оценки наличия или отсутствия цилиндрической кумуляции.

Предлагается оценку проводить путем отработки двух кумулятивных зарядов с одинаковым ВВ и материалом облицовки, но с разной длиной цилиндрических облицовок и заряда, а именно, облицовок длиной $2 \div 2,5$ диаметров заряда и $4 \div 5$. В данных экспериментах длина цилиндрических облицовок составляла 100 мм и 200 мм, использовалось штатное ВВ со скоростью детонации 7900 м/с. Облицовки изготавливались из алюминия, хрома, меди, чистого железа и керамики (на основе диоксида алюминия). Пробивное действие на расстояниях от торца заряда до мишени 300 мм для алюминиевых облицовок и облицовок из керамики длиной 100 мм составило $60 \div 70$ мм, входное отверстие диаметром 30 мм. В этих же условиях пробивное действие облицовок из хрома $80 \div 100$ мм. Входные отверстия 15 мм. Пробивное действие цилиндрических облицовок из меди и железа отсутствует. Определенная с помощью рентгеноимпульсной съемки скорость головной части алюминиевой струи равнялась 11 км/с, хромовой – 11,6 км/с. Струя из керамики не была монолитной. При увеличении длины облицовки до 200 мм у зарядов с облицовками на основе керамики пробивное действие увеличилось незначительно до 80 мм. Пробивное действие других зарядов не изменилось с увеличением длины в 2 раза. Это свидетельствует о том, что эффект цилиндрической кумуляции на штатном ВВ обеспечивает только материал на основе керамики из диоксида алюминия, при этом струя из нее не является монолитной. Облицовки из хрома и алюминия обеспечивают пробивное действие за счет краевого эффекта. На основании проведенных исследований разработан композиционный материал состава 75% диоксида алюминия и 25% хрома для изготовления цилиндрических облицовок. Экспериментально показано образование монолитной кумулятивной струи из этого материала.

Волновая теория кумуляции

Е. Я. Брагунцов, С. С. Назаров, А. И. Цыбрищ

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

Гидродинамическая теория кумуляции М.М. Лаврентьева не учитывает некоторые эффекты, имеющие место при кумуляции. В частности, при малых углах соударения согласно теории кумуляции М.М. Лаврентьева скорость струи равняется бесконечности, и не предсказывается наличие предельных углов струеобразования.

В данной работе предлагается рассматривать процесс струеобразования с учетом ударно-волновых явлений. Для определения соотношений между параметрами обжатия облицовки (скорость обжатия v_0 , угол соударения α) и скоростью струи v_c предлагается использовать принцип Гюйгенса. В работе рассмотрено обжатие конической облицовки с углом раствора 2α со скоростью v_0 . В соответствии с принципом Гюйгенса принимается, что точка соударения является источником вторичных сферических ударных волн. При перемещении точки соударения (контакта) вдоль оси перемещается и источник сферических ударных волн. Применение принципа Гюйгенса позволяет рассматривать фронт ударной волны, как огибающую к этим вторичным сферическим ударным волнам. Его положение определяется следующим соотношением:

$$\operatorname{tg}(\varphi) = D/v_\phi, \quad (1)$$

где φ – угол между огибающей фронта ударных волн и осью соударения; v_ϕ – скорость распространения точки контакта; D – скорость ударной волны. Из геометрии процесса соударения следует:

$$v_\phi = v_\perp / \operatorname{tg}(\alpha), \quad (2)$$

где v_\perp – компонента скорости соударения, перпендикулярная оси соударения.

Скорость ударной волны D можно определить из условия, что после соударения v_\perp полностью гасится массовой скоростью частиц u за фронтом ударной волны, т.е. $u = v_\perp$ и $D = c_0 + \lambda v_\perp$. Для осевой симметрии процесса обжатия это правомочно.

Если параметры возникающих ударных волн такие, что скорости ударных волн меньше чем скорость соударения $D < v_\phi$, то картина течения в точке соударения стационарная: огибающая фронта ударных волн «привязана» к точке контакта и перемещается с ней вдоль оси соударения. Струеобразование в этом случае отсутствует.

Если скорость фронта ударных волн выше чем скорость точки контакта, то ударные волны опережают её, выходят на внутреннюю поверхность облицовки и происходит явление разгрузки. Скорость распространения начального ударного фронта вдоль образующей, в системе координат связанной с точкой соударения, будет равна:

$$w = D - v_\perp / \sin(\alpha) \quad (3)$$

Скорость струи в этой системе координат можно рассматривать как скорость приобретаемую металлом в результате разгрузки $u = v_\perp$ на внутренней поверхности облицовки относительно ударного фронта:

$$v_c = w \cdot \cos(\alpha) + v_\perp;$$

Тогда в неподвижной системе координат можно записать:

$$v_c = v_\phi + w \cdot \cos(\alpha) + v_\perp, \quad (4)$$

Учитывая выражения (2) и (3) получим

$$v_c = D \cdot \cos(\alpha) + v_{\perp} = (c_0 + \alpha v_{\perp}) \cdot \cos(\alpha) + v_{\perp} \quad (5)$$

Полученные выражения показывают, что скорость струи зависит не только от геометрических и кинематических параметров соударения, но и от ударно-волновых свойств материала облицовки. Необходимо напомнить, что выражения (4), (5), справедливы только при выполнении условия $w > 0$, которое является условием струеобразования и определяет предельный угол струеобразования

$$\alpha_{\text{пр}} = \arcsin(v_{\perp}/D) = \arcsin(v_{\perp}/(c_0 + \lambda v_{\perp})).$$

Исследование причин фрагментации кумулятивной струи

Е. Я. Брагунцов, А. И. Цыбрый, С. С. Назаров

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

Явление кумуляции хорошо описано в рамках гидродинамической теории кумуляции, однако ряд явлений, происходящих в процессе кумуляции в рамках гидродинамической теории, не имеют объяснений [1, 2]. В частности, неизвестны причины появления пульсационных возмущений, вызывающие распад струи на множество фрагментов.

Данная работа посвящена более подробному исследованию причин фрагментации кумулятивной струи с помощью программной среды ANSYS Autodyn. Численным методом исследовались процессы обжатия облицовки и растяжения кумулятивной струи кумулятивного заряда.

Исходя из результатов численного моделирования модельного кумулятивного заряда, сделан вывод о том, что вследствие скачкообразного поведения скорости обжатия облицовки скорости вдоль струи также имеет скачкообразный (немонотонный) характер. Следовательно, периодически возникают области больших скоростей деформаций и более высоких растягивающих напряжений, что является причиной множественной фрагментации.

Список литературы

1. *В. М. Фомин, В. И. Звягинцев, Е. Я. Брагунцов.* Особенности растяжения и разрушения кумулятивных струй. Прикладная механика и теоретическая физика. – 2020. – Т. 61, № 2. – С. 19–30.
2. Физика взрыва. Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, переработанное. – В 2 т. – Т. 2. – М.: Физматлит. – 2002. – 656 с.

Секция 2

Ударно-волновые явления,
высокоскоростной удар и
динамические многофазные
течения

Исследование ударно-волновых свойств конденсированного вещества и газов при терапаскальных давлениях

И. В. Ломоносов, В. Б. Минцев, Д. Н. Николаев

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка

В докладе представлены результаты экспериментов, в которых давление терапаскального уровня генерируется при помощи Маховского кумулятивного генератора. В первой части доклада рассматриваются методы исследования свойств конденсированного вещества при однократном ударном сжатии. Для непрозрачных материалов, таких, как металлы, представлены результаты измерения ударной сжимаемости. Для монокристаллического прозрачного сапфира и оксида магния, кроме данных по ударной сжимаемости, представлены результаты измерения температуры фронта ударной волны оптическими методами, что позволило сделать выводы о полиморфных фазовых переходах и о положении линии плавления при высоком давлении.

Во второй части доклада обсуждаются методы исследования молекулярных газов при высоких давлениях (водород и дейтерий). Для достижения высокой степени сжатия используется многократное ударное или квазиизоэнтропическое сжатие в плоской геометрии при помощи Маховского кумулятивного генератора. В качестве образца используется предварительно сжатый до десятков МПа и охлажденный до 80 К газ. Для диагностики применяется одновременная регистрация яркостной температуры и электрического сопротивления сжатого слоя. Давление и степень сжатия слоя газа в данных экспериментах рассчитываются при помощи компьютерного моделирования (3-D и 1-D) процесса реверберации волн сжатия в образце. Было показано, что электрическая проводимость водорода увеличивается в малой области плотности в соответствии с предположением о существовании плазменного фазового перехода в исследуемой области состояний.

Численное моделирование ударного взаимодействия гетерогенных материалов и конструкций

Е. И. Краус, И. И. Шабалин

*Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск*

Для моделирования процессов деформирования и разрушения сложных технических объектов (СТО) при ударных нагрузках необходим численный инструмент, позволяющий рассмотреть в реальном времени возможные сценарии их развития. В ИТПМ СО РАН развит программный комплекс Reactor 3D [1, 2], который позволяет решать нестационарные задачи деформирования и разрушения СТО и включает следующие этапы: математическая формулировка уравнений баланса массы, импульса и энергии; задание начальных данных и постановку граничных условий на всех входящих в СТО элементов; выбор уравнений состояния и уравнений процесса для всех материалов СТО; построение прямым методом гетерогенных и градиентных сред, раздавая распределение свойств материалов по ячейкам счетной области по заданной функции; определение необходимых критериев разрушения материалов, охватывающих различные механизмы разрушения; построение геометрических образов всех элементов СТО и заполнение их разностной сетки; задание конечно-разностных соотношений уравнений баланса на этой сетки; моделирование фрагментов разрушенного материала дискретными частицами конечного размера; построение симметричного алгоритма расчета контактных границ, как для сплошного материала, дискретная частица – граница сплошного материала, так и частица – частица; прямое численное моделирование структурно неоднородных сред; проведение кодирования, перечисленных выше, алгоритмов и выполнение верификации построенного кода.

При построении модельных гетерогенных и градиентных сред показано, что аддитивная модель смеси применима только, когда имеется надежная точность ударной адиабаты в низкоскоростной области, «правило смесей», основанное на обработке многочисленных экспериментальных данных, хорошо подходит на вычисления упругих модулей, а для прогнозирования предела текучести металлокерамического композита лучше подходит аппроксимация по массовой концентрации [3].

Проведено численное моделирование процессов распространения волн сжатия в слоистых и гетерогенных материалах. Одномерные расчеты проведены методом конечных разностей и методом распада разрыва в акустическом приближении. Проведено сравнение волновых полей для слоистых систем и аддитивного подхода при той же объемной концентрации материалов, а так же прямого моделирования гетерогенных материалов, полученного случайным распределением одного из материалов по объему другого. Показано, что системы с крупными слоями не дают стационарных волновых профилей давления, уменьшение толщин слоев сглаживает волновые профили, а в аддитивном подходе получаем классический профиль волны сжатия.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00777, <https://rscf.ru/project/23-29-00777/>.

Список литературы

1. *Kraus E. I., Shabalin I. I.* Reactor2D: A tool for simulation of shock deformation. AIP Conf. Proc. – 2016. – Т. 1770. – P. 030092.

2. *Kraus A. E., Kraus E. I., Shabalin I. I.* Reactor 3D Software Performance on Penetration and Perforation Problems. – Behavior of Materials under Impact, Explosion, High Pressures and Dynamic Strain Rates – Editors: M. Yu. Orlov, P. M. Visakh – Springer International Publishing. – 2023. – P. 83–101.
3. *Kraus E. I., Shabalin I. I., Shabalin T. I.* Numerical analysis of wave propagation in a cermet composite. AIP Conference Proceedings. – 2017. – Т. 1893. – P. 030130.

Динамические свойства конструкционных материалов

Д. В. Петров, А. Ю. Гармашев, А. В. Павленко, Е. Б. Смирнов, Д. П. Кучко

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

Эксперименты со сжатием вещества в ударных волнах были начаты в середине XX века, когда для проектирования атомной бомбы понадобились сведения об уравнениях состояния материалов конструкции. Динамические методы экспериментального изучения вещества, основанные на его сжатии и необратимом разогреве в ударных волнах, позволяют получать в лабораторных условиях экстремально высокие давления. Для этих целей в распоряжении исследователей имеется хорошо разработанный набор методов генерации, диагностики и интерпретации ударно-волновых явлений в конденсированных средах, с помощью которых получена обширная экспериментальная информация об упругопластических и прочностных свойствах конструкционных материалов при предельно малых длительностях ударной нагрузки.

В докладе приведен обзор методов диагностики быстропротекающих процессов, включая методы нагружения вещества и методы регистрации ударно-волновых процессов, применяющиеся в РФЯЦ–ВНИИТФ в интересах изучения динамических свойств конструкционных материалов. Для генерации ударных волн применяются взрывные измерительные устройства и нагружающие устройства пушечного типа. Для регистрации экстремальных состояний конструкционных материалов используются современные динамические методы измерения кинематических и термодинамических параметров вещества, построенные на различных физических явлениях и принципах.

Ударноволновое пыление. Механизмы, диагностика, результаты

А. Л. Михайлов

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

В докладе в обзорном ключе излагается история и современное состояние исследований явления выброса (эжектирования, пыления) мелкодисперсных частиц со свободной поверхности материалов после выхода на неё ударных волн в диапазоне давлений $1,0 \div 50,0$ ГПа и длительностей $0,1 \div 1,0$ мкс. Рассматриваются причины и механизмы явления, методы диагностики и моделирования, способы подавления или уменьшения «пыления», некоторые полученные результаты.

Что такое электрический взрыв?

А. И. Савватимский^{1,2}, С. В. Онуфриев², В. С. Лебедев¹

¹Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

В 1954 году С. В. Лебедев обнаружил повышенную электронную эмиссию металлов (еще до их плавления) при микросекундном нагреве током [1]. Позже была обнаружена повышенная теплоемкость металлов, при быстром нагреве током, также перед началом плавления. Повышение теплоемкости перед плавлением быстро нагреваемых проводников было подтверждено при исследовании свойств карбидов и углерода. Причины связаны с образованием в объеме неравновесных парных дефектов Френкеля, поскольку медленная диффузия равновесных вакансий не может обеспечить начало плавления. Появление аномально высоких (электронной эмиссии и теплоемкости) в один и тот же момент времени – говорит об общих причинах этих аномалий при быстром нагреве веществ.

Проводник в виде проволоки плавится и расширяется в жидком состоянии, в частности, потому, что пинчевое давление собственного тока в центре – максимально, а на поверхности – нулевое. Жидкий расширяющийся проводник в результате флуктуаций плотности (по Френкелю) разбивается на мелкие частички, размеры которых близки длине пробега электрона в жидком металле (порядка 100 ангстрем). В этот момент теряется проводимость жидкого металла и круто растет его сопротивление. Можно сказать, что взрыв проводника – это потеря проводимости, что всегда являлось препятствием к вводу значительной энергии в вещество.

Дальнейший ввод энергии в такой расширяющийся жидкий стержень приводит к возникновению поперечных страт. Причина появления страт – результат нагрева образца, жестко закрепленного в торцах. При быстром нагреве образец испытывает два синхронных удара по торцам. Последнее порождает две одинаковые гидродинамические волны, распространяющиеся навстречу друг другу. Это приводит к возникновению стоячей волны вдоль проводника. Мелкие частички металла, в которые уже превратился жидкий образец, выстраиваются в соответствии с гидродинамикой – как пучности с частицами металла и провалами между ними. Очевидно, что чем быстрее производится нагрев, тем более высокая частота стратообразования регистрируется. Приведены примеры регистрации страт в наносекундных экспериментах, выполненных в ФИАНе. Потеря проводимости свободно расширяющегося (уже не металла) приводит к тому, что в дальнейшем энергия уже не вводится в образец, а происходит разряд на поверхности.

Способ предотвращения потери проводимости при быстром нагреве – это ограничение объема: например, нагрев проволоки в капиллярной трубке. В этом случае потери проводимости не происходит, и можно ввести в проводник значительно больше энергии. Новое состояние соответствует высокому давлению. Возникает новая область экспериментального исследования веществ: металлов, карбидов, а также жидкого углерода – при высоких температурах (до 8000 К) и высоких давлениях [2, 3].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (продолжение проекта 19-79-30086).

Список литературы

1. Лебедев С. В. Явления в вольфрамовых проволоках перед их взрывом под действием электрического тока высокой плотности. ЖЭТФ. – 1954. – Т. 27, № 2. – С. 136–146.
2. Савватимский А. И., Онуфриев С. В. Исследование физических свойств углерода при высоких температурах (по материалам экспериментальных работ). УФН. – 2020. – Т. 190, № 10. – С. 1085–1108.

3. Савватимский А. И., Онуфриев С. В., Седегов А. С., Юдин С. Н., Московских Д. О. Теплофизические свойства высокоэнтропийного карбида $(HfTaTiNbZr)C$ при температурах от 2500 до 5500 К. ТВТ. – 2022. – Т. 60, № 5. – С. 672–675.

Физические свойства жидкого высокоэнтропийного карбида (HfTaTiNbZr) C_5 до 5500 К и жидкого углерода – до 9000 К при быстром нагреве импульсом электрического тока

А. И. Савватимский^{1,2}, С. В. Онуфриев², К. В. Хищенко²

¹Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Высокоэнтропийные карбиды содержат значительное количество элементов (от 5 до 12,...,15), вводимых в равных или близких к равным долям. В этих соединениях за счет большой степени беспорядка и большой величины конфигурационной энтропии идет преимущественное формирование твердого раствора. Высокая термодинамическая стабильность таких многокомпонентных карбидов, высокая тугоплавкость и коррозионная стойкость привлекательны для создания эффективной тепловой защиты в атомной энергетике и в ракетно-космической отрасли.

Впервые в мировой практике получены экспериментальные теплофизические данные [1] для высокоэнтропийного карбида (HfTaTiNbZr) C_5 при высоких температурах (2500 ÷ 5500 К). Использовался быстрый (10 мкс) метод «взрывного» нагрева импульсом тока. Образцы в виде плоских пластинок толщиной ~ 100 мкм зажимались между тонкими стеклянными пластинами для фиксации образца и предотвращения возникновения шунтирующего разряда. Измерены температуры солидуса, ликвидуса и свойства карбида – теплота плавления, введенная энергия (энтальпия) и теплоемкость – в зависимости от температуры. Температура измерялась с помощью быстродействующего пирометра на длине волны 856 нм.

Свойства графита (самого тугоплавкого вещества на Земле) при высоких температурах также представляют интерес для Росатома и Роскосмоса, в качестве элемента тепловой защиты. В [2] исследован анизотропный графит высокой начальной плотности (2.26 г/см³) при «взрывном» нагреве импульсом тока в условиях повышенного давления (оценка дает ~ 27 кбар). Компрессионное давление создавалось при нагреве пластинок графита в толстостенных (11 мм, каждая) пластинах стекла ТФ-5 (тяжелый флинт). Впервые измерена теплоемкость C_V для жидкого углерода (2 Дж/(г·К)); ранее измеренная теплоемкость C_P составила (~ 4 Дж/(г·К)). Ключевой результат эксперимента с высоким импульсным давлением показал, что зависимость электросопротивления от измеряемой температуры от начала плавления (~ 5500 К) до 9000 К в условиях ограничения объема представляет собой константу во всем диапазоне температур для жидкого углерода. Такой же эффект (постоянство электросопротивления) ранее наблюдался ранее в работах Кикоина и Брэдли при нагреве жидкой ртути в кварцевом капилляре (при $T \sim 200 \div 300$ °С). Показано, что плавление графита и жидкого углерода, во всем диапазоне импульсного нагрева (5000 К ÷ 9000 К), демонстрируют металлическую проводимость. Заключение некоторых авторов в литературе о переходе металл – неметалл при плавлении графита – не имеет экспериментальных подтверждений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (продолжение проекта 19-79-30086, руководитель академик Г. А. Месяц).

Список литературы

1. Савватимский А. И., Онуфриев С. В., Седегов А. С., Юдин С. Н., Московских Д. О. Теплофизические свойства высокоэнтропийного карбида (HfTaTiNbZr) C_5 при температурах от 2500 до 5500 К. ТВТ. – 2022. – Т. 60, № 5. – С. 672–675.

2. *Савватимский А. И., Онуфриев С. В.* Исследование физических свойств углерода при высоких температурах (по материалам экспериментальных работ). УФН. – 2020. – Т. 190, № 10. – С. 1085–1108.

Ударно-волновые свойства и плавление периклаза при ударном сжатии до давления 1 терапаскаль

Д. Н. Николаев, А. В. Острик

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка

Периклаз (MgO) является одним из оксидов, составляющих земную кору и мантию, лунную кору и реголит, астероиды. Его свойства при сверхвысоких давлениях востребованы как в виде экспериментально определенной ударной адиабаты, так и в виде табличных уравнений состояния (УРС), что необходимо для построения аддитивных УРС земных и внеземных пород и моделирования космических импактных явлений. Ударно-волновые свойства MgO изучаются давно, но только в последнее десятилетие при помощи лазерных ударных волн (УВ) и электромагнитного метания были получены давления более 250 ГПа, что достаточно для плавления MgO за фронтом УВ. Несмотря на это, представления о положении границы полиморфного перехода из структуры NaCl в структуру CsCl (переход В1–В2) и кривой плавления MgO на диаграмме температура – давление остаются противоречивыми.

В данной работе эксперименты с монокристаллическими, оптически прозрачными образцами MgO были выполнены при помощи взрывных маховских кумулятивных генераторов ударного сжатия [1]. Ударная сжимаемость образцов определялась методом отражения, в качестве вещества-эталоны использовался монокристаллический кварц, волновые скорости в эталоне и в образце измерялись при помощи оптической базисной методики. Одновременно скоростным оптическим пирометром регистрировалась яркостная температура фронта УВ.

Уравнение состояния было сконструировано методом, предложенным в [2] на основе экспериментальных данных по ударной сжимаемости MgO, кривая плавления была построена по УРС с помощью критерия Линдемана.

Полученные нами точки по ударной сжимаемости согласуются с данными [3–5]. Экспериментально определенная температура ударного сжатия описывается построенным УРС до момента плавления. Данные по температуре ударного сжатия отличаются от «лазерных» данных и позволяют сделать предположение о положении кривой плавления в области ее пересечения с ударной адиабатой. Оказалось, что плавление при ударном сжатии лучше всего описывается первопринципными расчетами по теории функционала плотности [5], а также нашими расчетами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (соглашение № 21-72-20023).

Список литературы

1. *D. Nikolaev, V. Ternovoi, V. Kim and A. Shutov.* Plane shock compression generators, utilizing convergence of conical shock waves. *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2014. – V. 500. – P. 142026.
2. *A. Ostriki, D. Nikolaev.* Shock induced melting of sapphire. *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2022. – V. 2154. – P. 012010.
3. *B. Svendsen and T. Ahrens.* Shock-induced temperatures of MgO. *Geophys J. Int.* – 1987. – V. 91. – P. 667–691.
4. *S. Root, L. Shulenburg et al.* Shock response and phase transitions of MgO at planetary impact conditions. *Phys. Rev. Lett.* – 2015. – V. 115. – P. 198501.

5. *A. McCoy, M. C. Marshall et al.* Hugoniot, sound velocity, and shock temperature of MgO to 2300 GPa. *Phys.Rev.B.* – 2019. – V. 100. – P. 014106.
6. *F. Soubiran, B. Militzer.* Anharmonicity and phase diagram of magnesium oxide in the megabar regime. *Phys. Rev. Lett.* – 2020. – V. 125. – P. 175701.

Экспериментальное исследование и широкодиапазонное моделирование поведения конденсированных сред при интенсивных воздействиях

О. Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

Экспериментальные исследования и моделирование поведения конденсированных сред в широком диапазоне интенсивностей нагружения основано на результатах статистико-термодинамического описания ансамблей дефектов (микротрещин, микросдвигов), обнаруживающих закономерности «критичности» – структурно-скейлинговые переходы [1]. Процессы деформации при ударно-волновом и динамическом нагружении характеризуются близкими временами нагружения к временам развития дефектов, структурной релаксации, стадийности зарождения трещин и их распространения. Это предполагает рассмотрение процесса деформирования и разрушения в терминах структурных переменных, характеризующих дефекты, включая термодинамику, влияние на релаксационные свойства. Экспериментально подтверждена связь степенной универсальности пластических волновых фронтов, стадийности разрушения «адиабатическим сдвигом», статистики фрагментации с установленными типами коллективных мод дефектов [2]. Количественный анализ морфологии поверхностей разрушения определил структурные масштабы, соответствующие типам автомодельных решений, и зависимость параметров моделей от структурных инвариантов. Исследовано влияние коллективных мод дефектов на формирование упруго-пластических фронтов, механизм «релаксации» упругого предвестника, анализируется связь с термодинамикой инертных и энергетических материалов. Развита методика многомасштабного анализа структурных изменений, обусловленных дефектами, с использованием данных рентгеновской томографии применительно к широкодиапазонному моделированию поведения материалов.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30041).

Список литературы

1. *Naimark O. B.* Defect induced transitions as mechanisms of plasticity and failure in multifield continua // In: *Advances in multifield theories of continua with substructure*. Birkhauser. – 2004. – P. 75–114.
2. *Naimark O., Bayandin Y., Uvarov S. Bannikova I., Saveleva N.* Critical dynamics of damage-failure transition in wide range of load intensity. *Acta Mech.* – 2021. – V. 232. – P. 1943–1959. <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02922-1>.

Уравнения состояния тугоплавких материалов в задачах физики взрыва

К. В. Хищенко^{1,2,3,4}

¹*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

²*Московский физико-технический институт, Долгопрудный*

³*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка*

⁴*Южно-Уральский государственный университет, Челябинск*

Для численного моделирования нестационарных гидродинамических процессов в задачах физики взрыва требуется знать уравнение состояния среды во всей области изменения термодинамических параметров [1]. В таких процессах на стадии нагружения происходит увеличение внутренней энергии вещества, что может сопровождаться ростом давления и плотности. На последующей стадии разгрузки внутренняя энергия уменьшается вместе с давлением и плотностью.

Построение уравнений состояния среды в обширных интервалах изменения плотностей, давлений и внутренних энергий теоретическими методами затруднено необходимостью учета взаимодействия между частицами в случае сильной неидеальности. Полуэмпирический подход позволяет сформулировать функциональную форму термодинамического потенциала из теоретических представлений и найти параметры в формулах из условия оптимального описания имеющейся экспериментальной информации о поведении вещества при высоких плотностях энергии [2].

Тугоплавкие материалы широко используются в элементах конструкций, подвергаемых интенсивным импульсным воздействиям. Уравнения состояния таких материалов необходимы для численного моделирования возникающих при этом течений.

В настоящей работе дается краткий обзор моделей уравнений состояния, применяемых для описания термодинамики вещества в широком диапазоне степеней сжатия и нагрева. Приводятся примеры построения уравнений состояния тугоплавких металлов (иридия, родия, рутения и других) при высоких давлениях и температурах. Результаты расчетов термодинамических характеристик рассматриваемых материалов сопоставляются с имеющимися данными экспериментов по изотермическому и ударному сжатию образцов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>.

Список литературы

1. Бушман А. В., Канель Г. И., Ни А. Л., Фортон В. Е. Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий. Черноголовка: ИХФ АН СССР, 1988.
2. Ломоносов И. В., Фортон С. В. Широкодиапазонные полуэмпирические уравнения состояния вещества для численного моделирования высокоэнергетических процессов. ТВТ. – 2017. – Т. 55, № 4. – С. 596–626.

Малопараметрическое уравнение состояния вольфрама вблизи области фазового перехода жидкость—пар

К. А. Боярских^{1,2,3}, К. В. Хищенко^{1,2,3,4}

¹*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

²*Московский физико-технический институт, Долгопрудный*

³*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка*

⁴*Южно-Уральский государственный университет, Челябинск*

В работе получено уравнение состояния с малым числом параметров для жидкой фазы вольфрама. Параметры уравнения состояния рассчитывались с помощью данных по изобарическому расширению жидкого вольфрама при атмосферном давлении и высоких температурах [1]. Предложен метод определения теплоемкости в предположении ее постоянства с помощью данных по ударному сжатию исходно пористых образцов металла.

Область применимости полученного уравнения состояния определена по результатам сравнения расчетов ударных адиабат и изоэнтроп разгрузки исходно пористых образцов с данными ударно-волновых экспериментов. Рассчитаны ударные адиабаты для исходного состояния в двухфазной области жидкость—пар. Изучен вопрос гофрировочной неустойчивости, описанной в работе [2].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>.

Список литературы

1. Коваль С. В., Кускова Н. И., Ткаченко С. И. Исследование механизма электрического взрыва проводников и теплофизических характеристик жидких металлов. ТВТ. – 1997. – Т. 35, № 6. – С. 876–879.
2. Дьяков С. П. Об устойчивости ударных волн. ЖЭТФ. – 1954. – Т. 27, № 3. – С. 288–295.

Моделирование ударной сжимаемости сплава титан—цирконий в широком диапазоне давлений и температур

Н. Н. Середкин^{1,2,3}, К. В. Хищенко^{1,3,4,5}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

³Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка

⁴Московский физико-технический институт, Долгопрудный

⁵Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

Для решения фундаментальных и прикладных задач физики взрыва представляется интересным построение моделей термодинамических свойств различных конструкционных материалов.

В настоящей работе представлена модель термодинамики сплава Ti—Zr при высоких давлениях и температурах на основе уравнений состояния и массовых долей компонентов сплава.

Калорическое и термическое уравнения состояния каждого компонента определяется в виде $E = E(V, T)$ и $P = P(V, T)$, где E — удельная внутренняя энергия; P — давление; V — удельный объем; T — температура. С учетом этого уравнение состояния сплава задается соотношениями для объема и энергии:

$$V_{1N}(P, T) = \sum_{i=1}^N \alpha_i V_i(P, T), \quad E_{1N}(P, T) = \sum_{i=1}^N \alpha_i E_i(P, T), \quad (1)$$

где V_{1N} и E_{1N} — удельный объем и удельная внутренняя энергия сплава; V_i , E_i и α_i — удельный объем, удельная внутренняя энергия и массовая доля i -того компонента; N — количество компонентов.

Результаты расчетов ударных адиабат на основе этих уравнений состояния для компонентов (Ti и Zr) и сплава Ti—Zr с разными массовыми долями Ti и Zr согласуются с ударно-волновыми данными в широком диапазоне плотностей, давлений и внутренних энергий.

Проводится также сопоставление этих результатов с ударными адиабатами сплава Ti—Zr, рассчитанными по методу аддитивности ударных адиабат компонентов [1, 2].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>.

Список литературы

1. Дремлин А. Н., Карпухин И. А. Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ. ПМТФ. — 1960. — № 3. — С. 184–188.
2. Алексеев Ю. Ф., Альтшулер Л. В., Крупникова В. П. Ударное сжатие двухкомпонентных парафино-вольфрамовых смесей. ПМТФ. — 1971. — № 4. — С. 152–155.

Сера: переход диэлектрик-металл при ударном сжатии

С. Д. Гилев¹, Л. Е. Петров^{1,2}

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

²*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск*

С целью исследования фазовых переходов в сере в области больших давлений и температур проведены эксперименты по измерению электропроводности при ударном сжатии. Найдена электропроводность серы при нескольких значениях давления ударной волны. В области давлений $p > 20$ ГПа обнаружена высокая электропроводность образца $\sim 10^3$ Ом⁻¹·см⁻¹, что более чем на порядок величины превышает известные ранее значения [1]. Расхождение с [1] обусловлено, по нашему мнению, с несовершенством измерительной схемы [1], имеющей ограничения на временное разрешение и величину измеряемой электропроводности. Показано, что при ударном сжатии рост электропроводности серы составляет $\sim 10^{18}$ раз за время < 5 нс.

Список литературы

1. *Постнов В. И., Ананьева Л. А, Дремин А. Н, Набатов С. С, Якушев В. В.* Электропроводность и сжимаемость серы при ударном сжатии. ФГВ. – 1986. – Т. 22, № 4. – С. 106–109.

Модель ударного сжатия конденсированной среды

В. Ф. Анисичкин, Э. Р. Прууэл

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Основные свойства среды определяются потенциалом межчастичного взаимодействия и массой частиц. В случае ударного сжатия, из соображений подобия и размерностей, зависимость давления за фронтом ударной волны (УВ) – p_H от потенциальной составляющей давления – p_p можно записать как $p_H = p_p \times f(\rho/\rho_1)$. В работе обосновывается ранее полученная эмпирическая связь p_H и p_p [1]:

$$p_H = \Delta p_p \times (\rho/\rho_1) + p_1 \quad (1)$$

Апробирование связи давления за фронтом УВ и потенциальной составляющей давления (1) проводилось моделированием ударного сжатия конденсированной среды методами молекулярной динамики (МД). Использовался статистический метод Монте-Карло. Вещество рассматривалось как набор точечных объектов, взаимодействующих с центральным парным потенциалом. Для существенно разных по характеру и величине потенциалов межмолекулярного взаимодействия, «жестких» и «мягких», получено удовлетворительное согласие результатов до больших сжатий. Для ряда металлов – до давлений сотни ГПа [2]. Свойства железа наиболее полно изучены ударно-волновыми методами. Поэтому сравнение расчетов предложенным методом с известными данными для железа более показательнее. На рис. 1, в качестве примера, показаны: экспериментальная ударная адиабата (УА) железа; изотерма железа при $T = 300$ К; расчет изотермы железа при $T = 300$ К методами МД; расчет p_p железа методами МД; расчет p_p по (1).

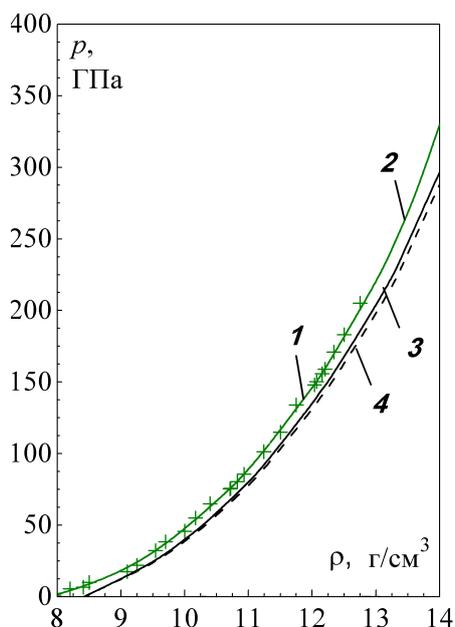


Рис. 1: 1 – УА железа [3]; + – изотерма железа при $T = 300$ К [4]; 2 – расчет изотермы железа при $T = 300$ К методами МД; 3 – расчет p_p железа методами МД; 4 – расчет p_p по (1).

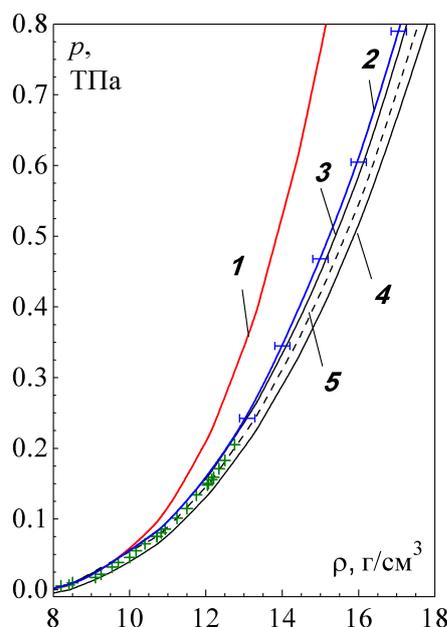


Рис. 2: Эксперимент (из [5]): 1 – УА железа; 2 – изэнтропа; + – изотерма при $T = 300$ К [4]. Расчет: 3 – расчет изэнтропы железа по (2); 4 – расчет p_p по (1); 5 – расчет изотермы железа при $T = 300$ К.

При известных и принятых зависимостях $p_H(\rho/\rho_1)$ и $p_p(\rho/\rho_1)$, промежуточные зависимости, такие как изотерма, изэнтропа, двукратное ударное сжатие среды, могут быть рассчитаны при достаточно обоснованном интерполяционном предположении. Таким может быть, например, понятие о сжимаемом «коволоме» [6], когда «тепловое» слагаемое давления среды – p_h создается частицами идеального одноатомного газа, занимающими объем V_i , свободный от объема упругих частиц. Но при этом каждая частица занимает свой индивидуальный объем, не сообщающийся с другими частицами. Тогда, например, изэнтропа может быть получена как:

$$p_s = \Delta p_p + p_{p1} + p_{h1} \left(\frac{V_{i1}}{V_i} \right)^{1.67} \quad (2)$$

На рис. 2. приведено сравнение экспериментальных и расчетных сжимаемостей для железа. Из рис. 2 видно, что расчетная (2) и экспериментальная [5] изэнтропы железа практически совпадают. Так же хорошо согласуются расчетная изотерма железа и экспериментальная, полученная на алмазных наковальнях при $T = 300\text{K}$.

Качественно и количественно соотношение (1) можно обосновать из предельных случаев следующей моделью ударного сжатия.

Соотношение (1), пренебрегая начальными значениями давлений, с учетом законов сохранения в УВ, можно представить как $p_p = \rho_1 U(D - U)$, тогда $p_h = \rho_1 U^2$, где U – массовая скорость за фронтом УВ, D – скорость УВ.

При ударном сжатии имеющих массу, но невзаимодействующих на расстоянии частиц они сближаются, как угодно близко, не отталкиваясь. Тогда скорость УВ равна U и полное давление на сжимающий «поршень» только тепловое и равно $\rho_1 U^2$, так как нет потенциальной составляющей. (К такому случаю приближается ударное сжатие, например, многоатомного сильно разреженного газа.)

С появлением и ростом потенциала отталкивания частиц начинает расти скорость ударной волны D от исходного значения U . В результате появляется, вызванная ростом потенциала «отталкивания» добавка к тепловому давлению $\rho_1(D - U)U$, которую и следует считать потенциальной составляющей. В пределе «сильного» потенциала отталкивания давление за фронтом УВ только потенциальное «холодное» и равно $\rho_1 U D$. (К такому случаю приближается, например, ударное сжатие «жесткого» кристалла алмаза.)

Тогда, принимая, из соображений размерности, что потенциальная составляющая давления в промежуточных случаях растет пропорционально разности $(D - U)$, объясняем соотношение (1).

Список литературы

1. Анисичкин В. Ф. Обобщенные ударные адиабаты и нулевые изотермы элементов. ФГВ. – 1979. – Т. 15, № 2. – С. 152–157.
2. Прууэл Э. Р., Анисичкин В. Ф. Метод расчета равновесных ударных адиабат в плотных газах. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666437. – 2019.
3. Трунин Р. Ф. (Под ред.). Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. Саров, РФЯЦ–ВНИИЭФ. – 2006.
4. Mao H. K., et al. Static Compression of Iron to 300 GPa and Fe_{0.8}Ni_{0.2} alloy to 260 GPa: implications for composition of the core. J. Geophys. Res. Solid Earth Planets. – 1990. – V. 95. – P. 21737–21742.

5. *Smith R. F., et al.* Equation of state of iron under core conditions of large rocky exoplanets. *Nature Astronomy*. – 2018. – V. 2. – P. 452–458.
6. *Копышев В. П.* Теория уравнений состояния. Саров: ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ». – 2009. – 386 с.
7. *Анисимкин В. Ф.* Уравнение состояния для расчета температуры материалов при обработке взрывом. *Инженерно-физический журнал*. – 2017. – Т. 90, № 4. – С. 1025–1035.

Синхротронная диагностика процессов пыления

*К. А. Тен¹, Э. Р. Пруэл¹, А. О. Кашкаров¹, И. А. Рубцов^{1,2}, А. А. Студенников^{1,2},
В. П. Халеменчук¹, Б. П. Толочко³, Д. В. Петров⁴, А. Ю. Гармашев⁴, Е. Б. Смирнов⁴,
А. Л. Михайлов⁵, М. В. Антипов⁵, И. А. Спирин⁵*

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

²ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

³Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск

⁴Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

⁵Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

Под «пылением» понимается выброс облака мелких частиц из металлической поверхности по которой прошла сильная ударная волна. Выброс «пыли» заметно ограничивает получение предельных значений в кумулятивных процессах. Экспериментальное исследование этих процессов затруднены из-за малых плотностей ($0,1 \div 100$ мг/см³) и размеров микрочастиц ($0,1 \div 100$ мкм) и больших скоростей их полета ($2 \div 5$ км/с).

В последнее время интерес к «пылению» сильно возрос в связи с влиянием выброса «пыли» на результаты измерений динамики движения свободной поверхности с использованием лазерных, теневых и электроконтактных методов регистрации движения. Наиболее часто для исследования «пыления» используются лазерные системы (VISAR, лазерно-гетеродинный метод (ЛГМ)) и пьезодатчики. Их достоинства – многоканальность и возможность транспортировки оборудования. А недостатки – точечное измерение и сложность калибровки показаний. С 2000-х годов «пыление» начинают изучать с использованием ускорительных комплексов (протонография и синхротронное излучение). Синхротронное излучение от ускорителей дает возможность получения многих радиографических снимков (кино) процесса зарождения и динамики движения облака микрочастиц.

В докладе приводятся новые экспериментальные данные о выбросе облака микрочастиц при ударно-волновом нагружении металлов. Исследовались процессы выброса облака «пыли» из олова при разных степенях шероховатости (R_z от 5 до 80), а также его движение в разных газах (гелий, азот) при разных давлениях (от вакуума до 10 атм). Особенностью данной работы является одновременное использование трех современных методик – лазерной ЛГМ, пьезодатчиков и радиографии синхротронного кино. Эксперименты проводились на базе ускорительного комплекса ВЭПП-3 – ВЭПП-4 в ИЯФ СО РАН. Синхротронные рентгеновские импульсы имеют одинаковые параметры (длительность 1 нс, период следования 124 нс) в течении длительного времени, что позволяет тщательно калибровать детектор DIMEX для измерения массы (и плотности) с рекордной точностью при движении облака микрочастиц.

Полученные результаты могут быть полезными при анализе показаний разных методик, при проектировании новых устройств, использующих энергию взрыва, и для контроля безопасной эксплуатации.

Исследование движения ударно-индуцированных пылевых потоков методом синхротронного излучения

*М. В. Антипов¹, А. Б. Георгиевская¹, В. А. Огородников¹, А. Л. Михайлов¹, И. А. Спирин¹,
Д. А. Калашников¹, А. А. Утенков¹, И. В. Юртов¹, А. В. Федосеев¹, О. Б. Согрина¹,
К. А. Тен², Э. Р. Прууэл², А. О. Кашкаров², И. А. Рубцов²*

¹Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

В настоящее время интенсивно изучается явление выброса микрочастиц из свободных поверхностей металлических пластин при выходе на них ударных волн с амплитудой давления до нескольких десятков гигапаскалей. Это явление, часто называемое «пыление», может существенно затруднять интерпретацию получаемых результатов при использовании современных измерительных методик исследования ударно-волновых процессов, а также быть важным для некоторых технических применений. Для исследования «пыления» разработаны ряд методов, таких как импульсная радиография, теневая макро – и микросъемка, голография, лазер – гетеродинный метод (PDV), пьезодатчики, индикаторные фольги и др. Эти методы позволяют измерять размеры и скорости частиц, распределения плотности материала в потоках и их массу. Однако получить данные об изменении распределения плотностей в пылевых потоках от момента их образования с использованием этих методов нельзя. Такая информация важна при исследовании потоков частиц движущихся в газах или если потоки вызваны несколькими ударными волнами.

В докладе представлены постановка и результаты экспериментов, в которых для регистрации динамики пространственного распределения плотностей в ударно-индуцированных пылевых потоках был использован метод скоростной рентгенографии на основе синхротронного излучения из вигглера, установленного на ускорителе заряженных частиц ВЭПП-3 (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск). В экспериментах на свободную поверхность образцов из олова, имевших разные шероховатости: Rz 5, 20 и 60 мкм, выходили одна или, последовательно, две ударные волны с давлением ~ 40 ГПа. Разгрузка ударной волны происходила в вакуум или газовую среду (воздух, гелий, азот) с начальными давлениями от 1 до 8 атм.

Регистрация пылевого потока при ударном нагружении ступенчатых конструкционных стыков

В. П. Халеменчук¹, К. А. Тен¹, И. А. Рубцов^{1,2}, Э. Р. Прууэл¹, А. О. Кашикар¹, А. А. Студенников^{1,2}, Л. И. Шехтман³, Б. П. Толочко⁴, Е. Б. Смирнов⁵, М. Ю. Столбиков⁵

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

²ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

³Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск

⁴Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск

⁵Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

При взаимодействии сильной ударной волны с металлами, обычно со свободной поверхности происходит выброс потока микрочастиц. Этой явление получило название «пыление» металлов. Размеры и количество частиц, а как следствие и их скорость зависят от формы нагружающего импульса, чистоты поверхности и структуры материала. В данной работе рассматриваются случаи, когда две сопрягаемые поверхности металлов располагались под малыми углами или параллельно друг другу формируя поток микрочастиц при ударно-волновом нагружении.

Исследования выброса микрочастиц проводились методом импульсной рентгенографии на источнике синхротронного излучения ВЭПП-3 в ИЯФ СО РАН. Регистрация рентгеновской тени проводилась детектором DIMEX.

Исследовался процесс выброса частиц из ступенчатых конструкционных стыков металлов под действием ударной волны интенсивностью ~ 40 ГПа. Выброс вещества формировался из стыков (щелей) в нагружаемом образце из меди и олова.

В докладе представлены экспериментальные результаты по регистрации линейной плотности (от 5 мг/см^2) и скорости потока ($1 \div 3 \text{ км/с}$) частиц из исследованных стыков.

Показана эффективность использованной методики для исследования процессов пыления из конструкционных стыков. Результаты работы важны для анализа корректности работы устройств ударного нагружения.

Восстановление распределения плотности за фронтом сильной ударной волны в пористой среде

А. М. Асылкаев^{1,2}, К. А. Тен^{2,3}, Э. Р. Прууэл², И. А. Рубцов^{2,4}, А. О. Кашкаров²,
В. П. Халеменчук², А. А. Студенников^{2,4}, Е. Б. Смирнов⁵, А. К. Музыря⁵,
К. М. Просвирнин⁵, И. Г. Галиуллин⁵

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

³Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск

⁴ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

⁵Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

В Сибирском отделении РАН с 2005 года начала работать станция «Субмикросекундной диагностики» на которой быстрые процессы (в том числе взрывные) можно исследовать с использованием мощных ускорителей. Рентгеновские импульсы (синхротронное излучение, СИ) позволяют осуществлять измерения в динамических экспериментах с очень малыми экспозициями (менее 1 нс), в которых результаты взаимодействия с веществом фиксируются в последовательные моменты времени (т.е. можно снимать «кино»).

В работе исследовалась динамика распределения плотности в пористом веществе при ударном нагружении взрывом цилиндрических зарядов взрывчатого вещества (ВВ) на основе триаминотринитробензола (ТАТБ) диаметром 40 мм. Методика определения параметров сжатого вещества за фронтом ударной волны основана на измерении распределения интенсивности проходящего СИ от ускорителя ВЭПП-4 (энергия электронов – 4,5 ГэВ, вигглер с 9-ю полюсами). Регистрация проходящего излучения велась рентгеновским детектором DIMEX, который располагался параллельно оси пенопласта. Время между снимками определялось количеством банчей в накопительном кольце ускорителя и составляло 203 нс (при 6-ти банчах). В таком быстром режиме детектор может записывать 100 кадров.

Плотность вещества вдоль луча СИ сильно менялась, из-за чего менялся и спектр поглощения. Для вычисления плотности сжатого вещества проводилась калибровка поглощения детектора DIMEX. Для этого перед детектором ставилась известная масса того же вещества. Пользуясь калибровкой, можно восстановить массу сжатого вещества вдоль СИ (на рис. 1. приведено распределение массы при ударном сжатии пенопласта).

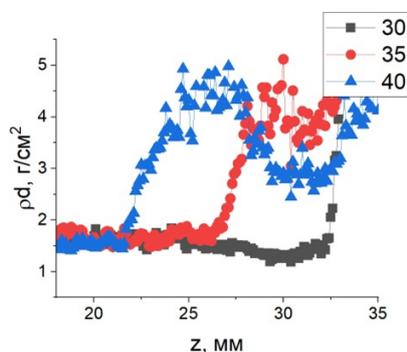


Рис. 1: Распределение массы пенопласта вдоль луча СИ; время между кадрами С30, С35, С40 равно 1 мкс

Полученные результаты необходимы для получения уравнения состояния ударно сжатого пенопласта.

Определение параметров уравнения состояния полимерных материалов по результатам экспериментов с применением синхротронной диагностики

*Е. С. Шестаковская¹, М. А. Бирюкова^{1,2}, Н. Л. Клиначева¹, Е. Б. Смирнов^{1,2},
Я. Е. Стариков¹, А. П. Яловец¹*

¹Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

²Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

Эксперименты с однократным и двукратным ударным сжатием вещества являются основой для построения уравнений состояния материалов при высоких давлениях. Регистрация ударно-волновых процессов при помощи синхротронного излучения (СИ) существенно расширила информативность экспериментов, в том числе сопровождающихся многократным сжатием. Измерение поглощения прямого пучка СИ позволяет получить информацию о динамике изменения плотности объекта исследования.

В данной работе представлена методика определения параметров уравнений состояния на основе рассчитанных и экспериментально полученных профилей относительного поглощения исследуемого материала.

Для проведения вычислительного эксперимента построена математическая модель упругопластических течений среды на основе модели пластичности Прандтля – Рейса [1, 2]. Численная реализация предложенной математической модели основана на методе [3]. Восстановление плотности вещества вдоль луча синхротронного излучения и относительного поглощения проводилось с использованием методики [4]. Для определения параметров уравнений состояния разработана методика на основе минимизации функционала отклонений численных и экспериментальных профилей относительного поглощения. Проведено численное моделирование задачи в постановке, соответствующей экспериментам по одно- и двукратному сжатию полиметилметакрилата и поликарбоната [5]. На основе численно рассчитанных и экспериментально полученных профилей относительного поглощения исследуемого материала определены параметры уравнений состояния.

Список литературы

1. *Prandtl L.* Spannungsverteilung in plastischen korper. Proc. 1st Int. Congr. Appl. Mech. Delft. – 1924. – P. 43.
2. *Рейс А.* Учет упругой деформации в теории пластичности. Теория пластичности. М.: Издательство иностранной литературы. – 1948. – 260 с.
3. *Яловец А.П.* Расчет течений среды при воздействии интенсивных потоков заряженных частиц. ПМТФ. – 1997. – Т. 38, № 1. – С. 151–166.
4. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов. Под. ред. д.т.н. А.Л. Михайлова. Саров: ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ», 2015. – 322 с.

5. *Смирнов Е. Б., Петров Д. В., Гармашев А. Ю., Музыря А. К., Долгих С. М.* Исследование однократного и двукратного сжатия плексигласа и поликарбоната с применением синхротронного излучения. Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения: Всеросс. конф. – 2018.

О точности определения величины откольной прочности по данным измерений на контактной поверхности

А. В. Красильников, В. Н. Ногин, Д. Т. Юсупов, А. А. Дегтярев, Д. Ю. Кадочников

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

Проведены ударно-волновые эксперименты с пластинами из нержавеющей стали 12Х18Н10Т на легкогазовой пушке, в которых варьировалась толщина образца при фиксированной толщине ударника. Показано, что значение откольной прочности в такой серии экспериментов при обработке по формуле Г.И. Канеля [1] практически не зависит от скорости деформации, что противоречит имеющимся данным [2]. На основании результатов аналитического решения задачи о форме откольного сигнала в рамках модели мгновенного разрушения для простейшего уравнения состояния конденсированного вещества $P = (\gamma - 1)\rho E + C_{0k}^2(\rho - \rho_{0k})$ сделан вывод, что традиционно применяемое для распространения откольного импульса приближение, в котором откольный импульс распространяется со скоростью звука, является неточным. Согласно полученному решению, откольный импульс движется быстрее скорости звука в веществе перед ним.

Результаты численного моделирования экспериментов по столкновению пластин из нержавеющей стали реальным уравнением состояния с учётом современных упругопластических моделей показали, что выводы, полученные при анализе аналитического решения, справедливы и для упругопластической среды, для которой традиционно используется формула [1]. Предложена поправка, учитывающая реальную геометрию эксперимента. После введения предложенной геометрической поправки получено качественное согласие с [2]: при увеличении скорости деформации откольная прочность возрастает.

Список литературы

1. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортков В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. – М.: «Янус-К», 1996. – 408 с.
2. Уткин А. В. Определение констант кинетики откольного разрушения материалов на основе экспериментальных данных. ПМТФ. – 1997. – Т. 38, № 6. – С. 157–166.

Влияние вращения ударника на его проникание в преграду при высокоскоростном ударе

П. А. Радченко, А. В. Радченко, С. П. Батуев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Исследуется влияние вращения на разрушение и процесс взаимодействия высокопрочных стальных ударников при высокоскоростном взаимодействии с преградой конечной толщины. Рассмотрены различные типы головных частей ударников. Углы взаимодействия варьировались от 0 до 75 градусов. Начальная скорость ударника составляла 1000 м/с. Частота вращения ударника вокруг продольной оси изменялась от 0 до 10000 об/с. Поведение материалов ударника и преграды описывается упругопластической средой. В качестве критерия разрушения используется предельная величина интенсивности пластических деформаций. Моделирование проводится в трехмерной постановке методом конечных элементов с использованием авторского алгоритма и программного комплекса EFES 2.0, 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. Проведенные исследования показали, что вращение ударника оказывает существенное влияние на разрушение взаимодействующих тел и кинематику ударника.

Показано, что отличия в проникании вращающегося и невращающегося ударника обусловлены наличием во вращающемся ударнике напряженно-деформированного состояния, вызванного вращательным движением. Определены условия возникновения рикошета ударников для различных углов взаимодействия, скоростей вращения и форм головной части.

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

Физико-математическое моделирование проникания ударников в мягкие текстильные преграды

А. В. Петлюков, А. И. Боброва, И. Р. Гришин, Д. А. Иванов, М. Ю. Сотский

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва

В локальных вооружённых конфликтах основная доля санитарных и безвозвратных потерь личного состава приходится на осколочные поражения. Для защиты от них используются комбинированные защитные структуры. В связи с этим особую актуальность приобретают вопросы исследования баллистической стойкости высокомодульных синтетических тканей, таких как Кевлар, Тварон, СВМ, Русар, Армос.

Разработана трехмерная лагранжевая численная методика проникания ударников в текстильную преграду, позволяющая учесть тип плетения ткани, влияние силы трения между нитями и между ударником и тканью, влияние поперечных размеров ткани, а также угол подхода ударника. Проведено ее тестирование путем сопоставления результатов расчетов с экспериментальными данными по пробитию текстильных бронепакетов сферическими ударниками. Эксперименты проводились на базе баллистической лаборатории кафедры СМ-4 МГТУ им. Н. Э. Баумана. Также показано, что методика адекватно воспроизводит известные факты: зависимость механизма пробития (вытягивание нитей или их обрыв) от поперечных размеров преграды; зависимость предельной скорости пробития от величины силы трения и угла воздействия [2].

В качестве примера работы методики был проведен анализ работы конструкции бронепакета, состоящего из нескольких слоев фрагментов ткани, скрепленных между собой слабопрочной нитью, а также цельнокроеных слоев во фронтальной и тыльной частях [1]. Отличие от классических текстильных преград в состоит в том, что при попадании ударника в один из фрагментов он деформируется независимо от других и пробивается за счет вытягивания, а не обрыва нитей. Слоев таких фрагментов несколько, и уплотненная в зоне высокого давления часть фрагментов присоединяется к ударнику, увеличивая его площадь мишени и уменьшая воздействие на тыльные слои бронепакета. Также, по результатам расчетов было получено, что при попадании ударника в рассматриваемую панель глубина отпечатка в пластине меньше, чем при использовании цельнокроеных слоев, следовательно, уменьшается заброневое воздействие на защищаемый объект.

Полученные результаты могут быть использованы для предпроектного моделирования новых конструкций средств индивидуальной бронезащиты.

Список литературы

1. Патент 2147363С1 Российской Федерации. Защитный экран / Куприянова Е. В., Харченко Е. Ф., Полушин А. Г., Русин Ю. В. Оpubл. 10.04.2000.
2. *И. Ф. Кобылкин, В. В. Селиванов* Материалы и структуры легкой бронезащиты. Учебник. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – 191 с.

Численное моделирование разрушения керамики при воздействии высокоскоростных ударников

А. В. Петлюков, А. И. Боброва, И. Р. Гришин, Д. А. Иванов, М. Ю. Сотский

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва

Целью данной работы является исследование методами численного моделирования ударного воздействия металлических ударников разных геометрических форм на элемент керамической защиты. В качестве расчетной схемы была выбрана следующая схема: металлический ударник располагался на некотором расстоянии от керамического элемента и двигался с заданной начальной скоростью к его поверхности. В качестве модели разрушения керамики использовалась модель JH-2 [1], учитывающая зависимость прочности керамики от давления, скорости деформаций и поврежденности. В работе варьировалась начальная скорость ударника, его форма, угол соударения, а также толщина керамического элемента.

Перед тем как перейти к основным расчетам была проведена валидация численной методики. Для этого были проведены эксперименты по прониканию сферического ударника в керамический элемент на базе баллистической лаборатории кафедры СМ-4 МГТУ им. Н. Э. Баумана. Стенд представлял собой воздушную камеру высокого давления (ресивер), гладкий ствол калибром 80 мм, уловитель и средства регистрации (высокоскоростная видеокамера). Метание ударника производилось с помощью сжатого воздуха. Его скорость регистрировалась по видеосъемке высокоскоростной камерой Phantom V611 с частотой съемки 20000 кадр/с. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных скоростей откольного конуса, а также его размеров показали, что их отличие составляет не более 5%.

По результатам проведенной серии основных расчетов были получены распределения скорости конической пробки, ее угла раствора в зависимости от начальной скорости ударника, его формы, угла соударения и толщины керамического элемента.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки баллистической стойкости средств легкой бронезащиты, выполненных из керамики.

Список литературы

1. *Gordon R. Johnson and Tim J. Holmquist* Response of boron carbide subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. *Journal of Applied Physics*. – 1999. – V. 85. 8060.

Ударно-волновые конфигурации в канализированной нагретом среде

А. Н. Богданов

НИИ механики МГУ, Москва

При расчетах поражающего воздействия ядерных взрывов было открыто неожиданное явление – образование предвестника при распространении ударной волны (УВ) в область с предварительно нагретым слоем¹.

Расчеты показали [1], что ударная волна, выйдя в область покоящегося нагретого газа, ускоряется. Т.о. наличие перед фронтом УВ областей нагретого газа приведет к перестройке течения. Простейшей для исследования модельной задачей является рассмотрение, в плоской геометрии, течения, возникающего при распространении прямой УВ в область покоящегося газа, однородность которого нарушена бесконечно тонким бесконечно протяженным в направлении распространения УВ каналом нагретого газа. В такой постановке задача становится автомодельной [2]. Предвестник треугольной формы, выдаваясь вперед с поверхности фронта ударной волны, неограниченно растет со временем.

Но нет ли предела этому росту? Возможны ли предельные стационарные конфигурации?

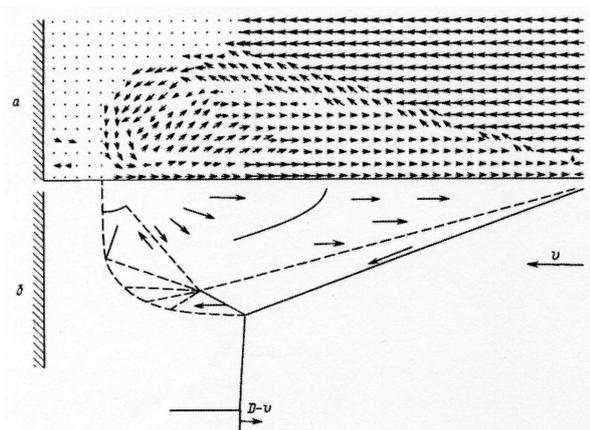


Рис. 1: Расчеты [2]

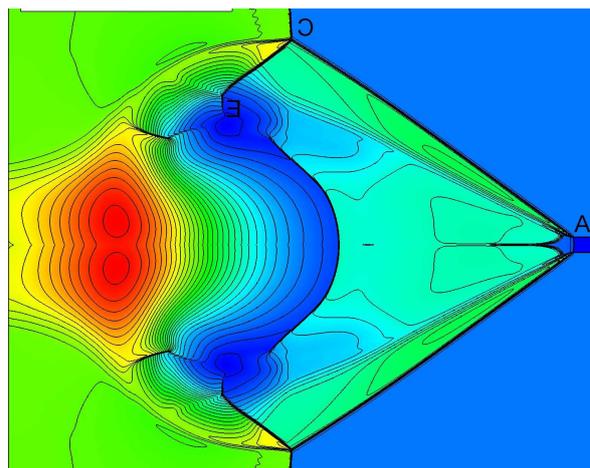


Рис. 2: Расчеты [3]

Зв фронтом прямой УВ течение тормозится до дозвукового, возмущения из областей сзади УВ догоняют ее фронт и могут изменять интенсивность УВ.

Предвестник образуют слабые косые УВ, течение за ними сверхзвуковое, оно не столько тормозится, сколько отклоняется в стороны, клинообразно раздвигаясь. Кажется бы, слабые возмущения из пройденных УВ областей фронтов этих волн не достигают. В таких условиях причин изменения скорости роста предвестника, определяемой температурой нагретого канала, не усматривается. Однако детальное рассмотрение течения в «теле» предвестника позволяет такие причины обнаружить.

Компьютерное моделирование показало [2, 3] сложную структуру течения в «теле» предвестника, возвратные течения к его вершине, раскручивание которых будет расходовать поступающую из нагретого канала энергию. Т.о. течение в «теле» предвестника становится аналогичным обтеканию выступа дозвуковым потоком газа – задаче, с которой столкнулись автомобилестроители. Там установка обтекателя от кабины к кузову прекращает образование

¹Автор узнал об этом явлении от И. В. Немчинова.

в устье вихря и его дальнейшее раскручивание, что приводит к экономии топлива в среднем на 10%.

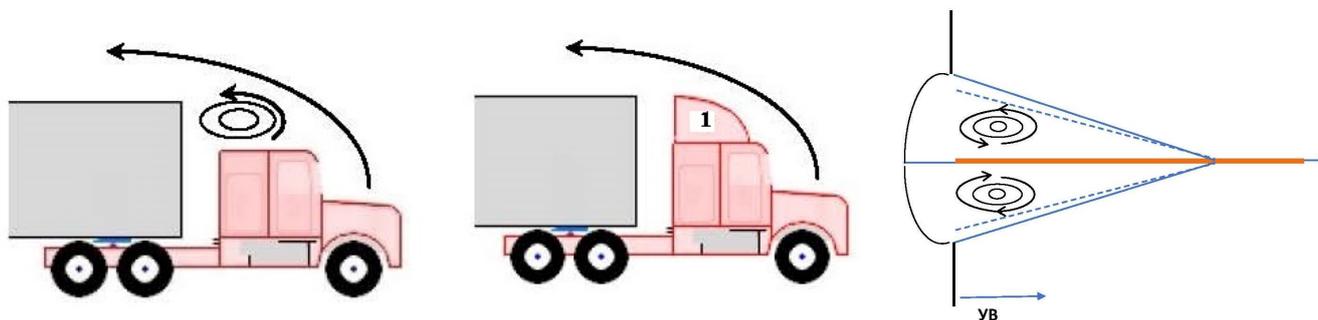


Рис. 3: 1 – обтекатель

При обтекании выступа течение формирует твердая стенка, в случае взаимодействия предвестника и УВ течение более сложное, с разворотом потока системой косых УВ и волн разрезания.

Условие стационарности процесса есть равенство притока энергии из нагретого канала удвоенной энергии образующегося вихря (их два):

$$\sigma q = 2E_{rot}$$

Список литературы

1. Богданов А. Н. Динамика ударных волн в средах с продольной стратификацией. Докл. РАН. – 2020. – Т. 491, № 1. – С. 5–6.
2. Артемьев В. И., Маркович И. Э., Немчинов И. В., Суляев В. А. Двумерное автомодельное движение сильной ударной волны над нагретой поверхностью. Докл. АН СССР. – 1987. – Т. 293, № 5. – С. 1082–1084.
3. Георгиевский П. Ю., Левин В. А., Сутырин О. Г. Взаимодействие ударной волны с продольным слоем газа пониженной плотности. Известия РАН. МЖГ. – 2016. – № 5. – С. 125–132.

Моделирование поведения сферических оболочек из карбида бора при взрывном обжати

П. В. Забусов, Г. Я. Карпенко, М. Н. Кирюхина, В. В. Ковалдов, А. В. Нефедов, К. Н. Панов, Е. В. Сапрыкина, М. О. Ширшова

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

В работе рассматривается рентгенографический эксперимент по взрывному обжатию сферических оболочек из карбида бора и свинца при одноточечном инициировании детонации на поверхности шарового слоя из ВВ. Полученные экспериментальные данные сравниваются с результатами численного моделирования в методике ЛЭГАК. Достигается удовлетворительное согласие в характере разрушения оболочек из карбида бора в расчете и эксперименте.

Исследование деформационного движения сегментной облицовки под воздействием динамических нагрузок

К. Р. Кабиров, А. А. Марсов, А. А. Можеев, Л. Х. Бадретдинова

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань

Известно, что из полусферических и сегментных облицовок формируются массивные высокоскоростные тела, которые могут быть удлиненными, разрушающимися в полете к преграде на несколько частей и компактными, способными сохранять свою сплошность при полете на большие расстояния. По литературным сведениям обычно полагается, что первые формируются при условии величины прогиба $0,2 < h/d < 0,3$, а вторые при $h/d < 0,2$ (где h – высота сферического сегмента, d – диаметр его основания). Однако, как показывают настоящие исследования, механизм деформационного движения из сегментной облицовки в интервале прогибов $0,15 \leq h/d \leq 0,45$ будет одним и тем же. Отличия состоят только в интенсивности протекания процесса деформирования в зависимости от величины прогиба. Формирование таких тел происходит, как правило, по деформационному механизму «выворачивания» когда движущаяся с большой скоростью вершинная часть облицовки опережает периферийные элементы, мешая их осевому схлопыванию. Последние как бы выдавливают головные элементы, а сами формируют ее хвостовую часть.

Процесс формирования представленных в данной работе сегментных облицовок изучен по рентгеновским снимкам. В процессе формирования метаемого тела происходят следующие деформационные процессы. На первом этапе нагружающая волна, воздействуя на вершинные слои облицовки придает им импульс движения по направлению нагружающей волны, в это время периферийные слои сегмента еще не приобрели импульс, в результате происходит выворачивание облицовки со сменой знака кривизны на обратный. При таком характере движения металл облицовки вершинных слоев оказываются впереди металла периферийных слоев, которые впоследствии за счет воздействия нагружающей волны начинают двигаться к центру оси движения и стремясь схлопнуться, натекают на движущуюся часть вершинных слоев, придавая им дополнительное ускорение. Вследствие протекания таких сложных деформационных процессов формируемое тело испытывает растягивающее усилие, в результате чего он удлиняется, приобретая, в конечном итоге стержневидную форму. На всем протяжении полета тело продолжает удлиняться и уменьшать поперечный размер сечения за счет перераспределения металла по его длине, вызывая ускорение головных частей. На определенном этапе движения телок начинает фрагментироваться, распадаясь на отдельные части.

Полученные значения скоростей движения и размеров формируемого стержневидного тела свидетельствуют о том, что тело, сформированное из сегментной облицовки, будет более массивным и обладать высокой кинетической энергией по сравнению с телом, формируемым из классической облицовки конической формы. Можно предположить, что тела сформированные из сегментной облицовки будут меньше реагировать на различные флуктуации при формировании и взаимодействии с преградами. В результате действия такого заряда на преграду в ней должны образовываться каналы большего диаметра и, как следствие этого, более высокая эффективность формирования каналов, например в обсадных колоннах нефтяных скважин.

Моделирование сжатия твердого раствора Al-Cu с учетом фазовых переходов и дислокационной пластичности

Н. А. Грачёва, Е. В. Фомин, А. Е. Майер

Челябинский государственный университет, Челябинск

В нашей работе мы разработали модель релаксации напряжений с использованием методов машинного обучения и применили ее для моделирования одноосного сжатия материала. Провели молекулярно-динамическое (МД) моделирование сжатия твердого раствора Al-Cu с использованием программного пакета LAMMPS [1] и потенциала ADP [2]. Результаты расчетов показали зарождение и движение дислокаций, а также фазовый переход кристаллической структуры. Эти процессы приводят к значительной релаксации сдвиговых напряжений. Процедура подбора параметров для разработанной модели эволюции фазовой структуры и модели дислокационной пластичности из предыдущей литературы [3] была проведена с помощью метода Байеса. В качестве уравнения состояния твердого раствора Al-Cu использовалась искусственная нейронная сеть, обученная на результатах МД расчетов.

Работа выполнена за счёт гранта РНФ (проект № 20-11-20153, <https://rscf.ru/project/23-11-45024/>).

Список литературы

1. *Plimpton S.* Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics. J. Comput. Phys. – 1995. – V. 117. – P. 1–19.
2. *F. Apostol, Y. Mishin.* Interatomic potential for the Al-Cu system. Phys. Rev. B. – 2011. – V. 83. – P. 054116.
3. *T. V. Popova, A. E. Mayer, K. V. Khishchenko* Evolution of shock compression pulses in polymethacrylate and aluminum. J. Appl. Phys. – 2018. – V. 123. – P. 235902.

Определение динамической твердости материала при помощи метода молекулярной динамики

А. В. Уткин¹, В. М. Фомин^{1,2,3}

¹*Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

³*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск*

Характер физических явлений в материале под действием высокоскоростного удара деформируемой частицей представляет значительный интерес, но для корректного описания явлений необходим всесторонний анализ процесса упругопластической деформации, который сопровождается разрушением, экстремальной температурой и плавлением в зоне контакта. В силу сложности исследуемых явлений, разработка аналитических моделей процесса соударения деформируемых тел, учитывающих все характеристики разрушения является практически недостижимой задачей.

Одним из возможных подходов является анализ явления методами теории подобия и размерности с последующими уточнениями на основе новых экспериментальных данных или данных численного моделирования. Использование теории подобия и размерности также позволяет экстраполировать результаты, полученные для одного размера или скорости, на другие, значительно большие. В результате такого подхода и анализа экспериментальных данных по высокоскоростному ударному взаимодействию компактного металлического ударника с металлической преградой был сформулирован так называемый энергетический критерий: объем кратера остается пропорциональным кинетической энергии ударника и обратно пропорциональным прочности материала преграды. Результаты экспериментов находятся на единой общей кривой процесса, которую принято называть кривой Н. А. Златина.

Наибольшие вопросы вызывает выбор параметра прочности или динамической твердости преграды. Обычно динамическую твердость определяют на основе статической твердости или статического предела текучести материала преграды вводя специальные поправочные коэффициенты на динамические процессы. Но оценка динамической твердости материала на основе данных статических экспериментов вносит серьезную погрешность даже для случая одинакового материала ударника и преграды. В связи с этим в математических моделях, описывающих поведение материала необходимо учитывать зависимость динамической твердости (Н) от скорости нагружения. Эта задача может быть решена в рамках метода молекулярной динамики на основе модельной задачи о соударении нанокластера с преградой. Используя определение динамической твердости, предложенное Д. Тейбором, и основываясь на точных измерениях объема кратера в численных экспериментах, можно определять зависимость Н от безразмерной скорости (скорость удара, нормированная на скорость звука в преграде). Такой подход в дальнейшем будет учитывать влияние динамических процессов в уравнении состояния материала, что позволит уточнить классические модели механики сплошных сред для динамических процессов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00733, <https://rscf.ru/project/21-19-00733/>.

Высокоскоростное взаимодействие составных ударников с тонкими преградами

Ю. В. Попов, В. А. Марков, В. В. Селиванов

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва

Вопросы динамического нагружения тонких металлических преград (толщиной менее полудиаметра ударника $h/d < 0,5$), которые применяются для защиты машин и оборудования в аварийных ситуациях, рассматриваются в конечной (терминальной) баллистике. Освещены они в гораздо меньшей степени, чем традиционные задачи конечной баллистики или бронебаллистики, связанные с решением задач оборонной тематики в варианте противотанкового направления, где рассматриваются преграды в основном толщиной $h/d > 0,5$. Хотя существует множество объектов инфраструктуры и аппаратов, ограждающие конструкции которых представляют собой набор тонких пластин или оболочек. В том числе различные экраны используются для защиты от случайного или преднамеренного воздействия летательных аппаратов (ЛА).

Основным отличием ЛА от обычного металлического ударника является его значительная деформируемость при ударе о преграду. ЛА может быть представлен в виде составного ударника с деформируемым носовым отсеком (НО) и недеформируемым хвостовым отсеком. В данной работе рассматривается взаимодействие такого составного ударника с тонкой металлической преградой ($h/d = 0,1$).

Целью работы является определение предельной скорости сквозного пробития и построение зависимости остаточной скорости от начальной скорости ударника. Для этого предложено использовать численное моделирование ударного взаимодействия составных ударников с преградой в двумерной осесимметричной постановке. Движение среды описывается с позиций Лагранжа. Рассматривался диапазон скоростей от 150 до 850 м/с.

Носовой отсек в реальных ЛА содержит бортовую радиолокационную станцию или другое бортовое радиоэлектронное оборудование. Согласно подходу, предложенному и обоснованному в [1], в качестве механического эквивалента НО ЛА используется высокопористый алюминиевый сплав. Расчетная модель разрабатывалась на основе геометрии экспериментальных образцов из работы [2].

Результаты расчетов сравнивались с известными экспериментальными данными и аналитическими зависимостями, которые с разной степенью точности позволяют описать баллистические кривые при пробитии металлических преград. Использовался ряд подходов к анализу пробития преград ударником, содержащим деформируемый НО и без него, предложенных Ченом и др. в работе [2], а также подход для анализа пробития тонких преград деформируемым ударником представленный в [3].

Полученные в численных расчетах результаты хорошо согласуются с аналитическими зависимостями как качественно, так и количественно.

Список литературы

1. *Марков В. А., Обвинников А. Ф., Пусев В. И.* Модельная среда для внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2010. № 5. – С. 196–206.
2. *Chen X. W., Yang Y. H., Yang Y. B., Lu Z. H., Chen Y. Z.* Perforation of metallic plates struck by a blunt projectile with a soft nose. Int. J. Imp. Engng. – 2008. – V. 35, № 6. – P. 549–558.

3. *Куся А. М., Марков В. А., Попов Ю. В., Пусев В. И., Сычев С. И.* Предварительная оценка ударно-проникающего действия летательных аппаратов. Материалы XXIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Вятчи, М.: ООО "ТРИ". – 2018. – Т. 2, № 5. – С. 163–176.

Генератор ступенчато-циклического ударного сжатия для исследования электрофизических свойств металлов при высоких давлениях и температурах

А. А. Гольшев, А. М. Молодец

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка

Изучение электрофизических свойств ударно-сжатых материалов обычно производится с использованием плоских образцов в окружении изоляционного материала с отличающейся акустической жесткостью. Поэтому чаще всего нагружение образцов происходит в режиме ступенчатого ударного сжатия последовательными ударными волнами (см. [1]). В экспериментах, в которых тонкий жёсткий металлический образец находится в окружении изолятора с малой акустической жесткостью, может реализоваться модификация ступенчатого ударного сжатия, так называемое ступенчато-циклическое ударное сжатие с высокочастотной составляющей давления на каждой ступени (см. [2]). В рамках этой схемы удаётся измерить электросопротивление образца в протяжённой области фазовой диаграммы металла вне его ударной адиабаты, что расширяет доступные области исследования электрофизических свойств металлов в условиях высоких давлений и температур динамического сжатия.

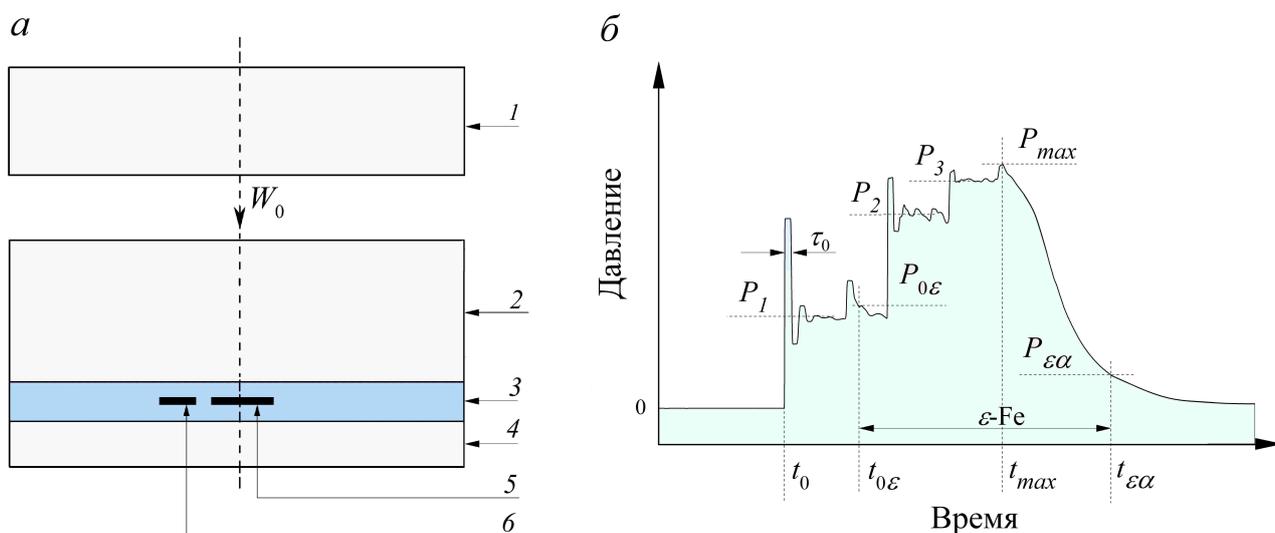


Рис. 1: [2] Генератор ступенчато-циклического ударного нагружения (а), и профиль давления в исследуемом образце при измерении его электросопротивления (б). (а) 1 – стальной ударник со скоростью ≈ 3 км/с, 2 – стальная пластина, 3 – тефлон ≈ 3 мм, 4 – стальная пластина, 5 – образец толщиной $h_0 \approx 0,05$ мм, 6 – манганиновый датчик; (б) пояснение обозначений в тексте.

Рис. 1 иллюстрирует оптимальную схему генератора ступенчато-циклического ударного нагружения, который стимулирует в образце специфический режим нагружения, состоящий из ступенчато-циклической фазы сжатия до давлений $P_{max} \approx 100$ ГПа и последующей фазы плавного уменьшения давления. Здесь плоский ударник 1 соударяется со слоистой мишенью 2–4. Тонкий (по сравнению с изолятором) «жесткий» металлический образец 5 располагается

в «мягком» тефлоне 3 и поэтому поочередный приход каждой ступени сжатия микросекундной длительности сопровождается реверберацией затухающих волн сжатия и разгрузки в исследуемом образце. Это показано на рис. 1 в виде высокочастотной циклической составляющей на фронтах ступеней P_1 , P_2 , P_3 . Полупериод циклической составляющей τ_0 составляет величину порядка $\tau_0 \approx h_0/C_0$, где h_0 – толщина образца, C_0 – скорость звука в металлическом образце, что при типичных для образца значениях $h_0 \approx 0,05$ мм и $C_0 \approx 5$ мм/мкс даёт $\tau_0 \approx 0,01$ мкс. При этом в координатах давление-температура фазовая траектория нагружения железного образца располагается в протяженной области, в том числе и над ударной адиабатой однократного сжатия (см. [2]).

Работа выполнена в рамках Госзадания №АААА-А19-119071190040-5.

Список литературы

1. *Набатов С. С., Дрёмин А. Н., Постнов В. И., Якушев В. В.* Измерение электропроводности серы при сверхвысоких динамических давлениях. Письма в ЖЭТФ. – 1979. – Т. 29. – С. 407–410.
2. *Молодец А. М., Гольшев А. А.* Электросопротивление $\varepsilon - Fe$ при высоких давлениях ступенчатого ударного сжатия. Физика Земли. – 2023. – № 4. – С. 39–52.

Структура и динамические свойства алюминиевого сплава АК6, синтезированного селективным лазерным плавлением

*А. И. Клёнов¹, А. Н. Петрова², И. Г. Бродова², Е. Б. Смирнов¹,
А. Ю. Гармашев¹, Д. П. Кучко¹*

¹Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

²Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург

Исследованы структура и динамические свойства сетчатых образцов Al-Mg-Cu-Si сплава АК6, синтезированных методом селективного лазерного плавления (СЛП) на 3D принтере по металлу Realizer SLM100. Задача подбора оптимального режима синтеза для уменьшения дефектности структуры решалась методом одиночных треков. Варьировали мощность лазерного излучения от 100 до 200 Вт и скорость сканирования от 100 до 900 мм/с. Контролируя режимы синтеза, получены образцы разной плотности в диапазоне 700,...,1900 кг/м³, с различной объемно-периодической структурой, а именно, с кубической ячейкой, а также топологии типа гироид с различным соотношением размера ячейки и толщины стенки. Определено, что при мощности лазера $P=200$ Вт и скорости сканирования 400 мм/с в сплаве формируется оптимальная структура. Для сетчатых образцов важным параметром также является толщина слоя. Исследовано влияние параметров синтеза, направления синтеза, геометрии построения, плотности сетчатого материала на динамические механические свойства сплава в диапазоне скорости деформации $10^2 \div 10^3$ с⁻¹. Динамические механические свойства на сжатие определяли на установке составных стержней Гопкинсона.

Проведена серия экспериментов по нагруженную сетчатого материала с объемно-периодической структурой типа гироид ударными волнами. Представлены зарегистрированные в эксперименте сигналы от манганинового датчика в координатах $\sigma(t)$. В результате произведена оценка демпфирования ударной волны в зависимости от плотности и периода ячейки сетчатых образцов, а также толщины демпфирующего экрана. Установлено, что амплитуда ударной волны снижается с 33,3 ГПа до 23,9 ÷ 27,6 ГПа при прохождении ударной волны через сетчатый материал. Среди исследованных образцов, сетчатый материал с периодом решетки 3 мм и толщиной стенки 0,2 мм обеспечивает наибольшее затухание ударной волны. Увеличение толщины экрана с 9 мм до 15 мм уменьшает давление ударной волны на 24%.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Структура», №122021000033-2).

Структурные исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов ИФМ УрО РАН»

Ударно-волновые явления при воздействии импульсного лазерного излучения на алюмоводную суспензию с целью получения водорода

*Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, Н. В. Нелобина, Г. М. Белокуров, Я. В. Крафт,
З. Р. Исмагилов*

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово

В настоящей работе предлагается использование воздействия лазерных импульсов на водную суспензию наночастиц алюминия с целью достижения полного превращения алюминия и максимальной скорости выхода водорода. Предлагаемый подход имеет преимущества перед способом получения водорода с помощью лазерной абляции металлов, поскольку используются меньшие плотности энергии лазера при одинаковых скоростях реакции. Отметим, что в предлагаемом способе получения водорода в качестве сырья используются только наночастицы алюминия и вода. Т.е. в водной суспензии наночастиц алюминия отсутствуют дополнительные химические соединения, также отсутствует необходимость в легировании или специальной обработке наночастиц алюминия. Следовательно, предлагаемый метод отличается технической простотой. Применение распространенных и дешевых полупроводниковых лазеров позволит снизить стоимость получаемого водорода.

Показана возможность получения водорода при воздействии лазерных импульсов (1064 нм, 14 нс, 10 Гц, $0,5 \div 6$ Дж/см²) на суспензию, содержащую 0,03 масс. % алюминия (100 нм) в воде. Установлено, что наночастицы алюминия поглощают лазерную энергию и нагреваются. В результате нагрева нарушается сплошность оксидной оболочки, и металлический алюминий реагирует с водой. Показано, что происходит полное превращение наночастиц алюминия в продукты (гиббсит, бёмит, байерит). Максимальное значение выхода водорода V_m не зависит от плотности энергии лазерного излучения. Время достижения V_m уменьшается по гиперболическому закону с ростом плотности лазерной энергии, достигая 3,5 минуты при плотности энергии равной 6 Дж/см².

Особенностью данного способа является то, что воздействие импульсного наносекундного лазерного излучения на суспензию сопровождается ударно-волновыми явлениями, в результате которых происходит интенсивное перемешивание суспензии.

Работа выполнена в рамках гос. задания ИУХМ ФИЦ УУХ СО РАН (проект 121031500513-4, руководитель Адуев Б.П.).

Секция 3

Энергетические материалы, горение, детонация

Состояние и перспективы развития промышленных ВВ

В. А. Соснин

Государственный научно-исследовательский институт «Кристалл», Дзержинск

Увеличение объемов добычи полезных ископаемых вызвало необходимость совершенствования ассортимента промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) и разработки высокоэффективных и безопасных ПВВ для различных горно-геологических условий их применения. За рубежом в течение 70–90-х годов XX века были разработаны все типы ПВВ на основе эмульсионных составов, включая предохранительные.

В нашей стране развитие ПВВ осуществлялось в несколько ином направлении, и долгое время основную часть применяемых ПВВ составляли гранулированные и порошкообразные патронированные аммиачно-селитренные вещества, сенсibilизированные тротилом, доступном и дешевом сырье. Рост цен на тротил и, как следствие, на традиционные граммониты и порошкообразные аммониты способствовал развитию производства других классов ПВВ, в том числе нового поколения – смесей АС-ДТ и эмульсионных взрывчатых веществ.

В докладе приведены данные по динамике применения за последнее десятилетие промышленных взрывчатых веществ в России и за рубежом, показан потребляемый ассортимент взрывчатых веществ и объемы его выпуска по основным производителям на местах потребления и специализированными заводами.

Детонационная способность взрывчатых веществ и материалов.

Экспериментальные исследования

А. С. Козлов, С. А. Душенок, А. А. Котомин

Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог», Санкт-Петербург

Одним из основных требований к взрывчатым материалам, используемым в современных системах инициирования, детонационных разводках, устройствах взрывной логики, детонирующих шнурах, удлинённых кумулятивных зарядах, системах разделения космических аппаратов, является высокая детонационная способность, критерием которой является критический диаметр детонации (d_k). Для обычно используемых в промышленности зарядов традиционных ВВ d_k равен $1 \div 10$ мм, в то время как для зарядов в указанных системах он должен составлять $0,1 \div 1,0$ мм [1]. Для гетерогенных систем d_k не является константой. Величина d_k определяется совокупностью кинетических, термодинамических и газодинамических факторов при детонации заряда ВВ. Для индивидуальных ВВ d_k зависит от химической природы, дисперсности и дефектности кристаллов ВВ, плотности заряда, начальной температуры, наличия и характера оболочки. Для смесевых ВВ d_k зависит также от концентрации взрывчатого наполнителя, физических свойств и дисперсности инертных компонентов, микроструктуры и однородности заряда и др. Наличие многих факторов, оказывающих влияние на d_k , существенно затрудняет его прогнозирование для реальных зарядов.

Авторами с участием сотрудников, аспирантов и студентов СПбГТИ(ТУ) и ФГУП «СКТБ «Технолог» были проведены систематические экспериментальные исследования детонационной способности штатных и перспективных индивидуальных ВВ различных классов, их смесей и композиций на их основе. Основные результаты этих работ опубликованы во многих научных статьях, материалах конференций и монографии [2].

Разработана методология исследований. Получены зависимости d_k тэна, гексогена, октогена, БТФ, тетрила, СL-20, DNTF, НТФ, FOX-7 от их удельной поверхности. Найдена зависимость d_k от пористости зарядов.

Показаны основные способы регулирования детонационной способности взрывчатых материалов. Установлена зависимость их d_k от объёмной доли ВВ. Установлено, что зависимость d_k от степени разбавления ВВ инертными веществами, как органическими, так и неорганическими, является единой. Для органических компонентов определяющей характеристикой, влияющей на d_k , является их акустическая жесткость, связанная с ударной сжимаемостью; для неорганических – плотность, связанная с затратами энергии на разгон частиц в детонационной волне, и дисперсность, связанная, по-видимому, с характером диссипации энергии волны разрежения и скоростью звука в расширяющихся продуктах взрыва. Исследованы особенности d_k суспензий кристаллических ВВ в воде и нитрометане.

На основе результатов исследований разработан метод расчета d_k высокоплотных зарядов ряда индивидуальных ВВ различной дисперсности, бинарных смесей микронных ВВ, а также взрывчатых материалов с инертными компонентами, включая пластичные, эластичные, прессовочные, литьевые и др.

Список литературы

1. А. А. Котомин, С. А. Душенок, А. С. Козлов, В. В. Ефанов Современные и перспективные высокоэнергетические материалы в системах детонационной автоматики аэрокосмических аппаратов. Общеросс. научн.-техн. журнал «Полет». – 2005. – № 8. – С. 51–60.

2. *А. А. Котомин, С. А. Душенок, А. С. Козлов* Эмпирические методы расчета взрывчатых веществ и композиций. Лань. 3-е издание. – 2022. – Санкт-Петербург. – 384 с.

Скрининг металлических горючих для использования в смесевых топливах для прямоточных воздушно-реактивных двигателей

О. Г. Готов

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

Представлен обзор литературы по методам активации горения металлических горючих, прежде всего, борсодержащих, как перспективных компонентов смесевых топлив для прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД). Некоторые методы и идеи проверены экспериментально с использованием лабораторного подхода, разработанного для сравнения металлических горючих (МГ) различного происхождения. Подход подразумевает определение набора параметров горения топлива, таких как скорость горения, масса конденсированных продуктов горения (КПГ), полнота сгорания МГ, эффективность тепловыделения (ЭТ). Подход основан на сравнении характеристик исходных МГ и КПГ топлив. Частицы КПГ сначала гасят в инертном газе, затем отбирают и подвергают химическому анализу. Семнадцать топлив, содержащих различные виды горючего, изучали при давлениях 1,2 и 2,5 МПа. Были выявлены рецептурные факторы, которые влияют на скорость горения и ЭТ. Даны рекомендации по будущим направлениям исследований и перспективным составам топлив.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2020-781.

Борсодержащие композиционные наполнители «Al-nB» для смесевых взрывчатых составов: свойства, совместимость со связующими, применение

*Е. А. Бутенко³, И. А. Кузнецов², А. Е. Курепин², Л. В. Маланчева², А. И. Малкин¹,
Д. А. Попов¹, А. А. Рязанцева², Н. И. Шишов³, В. Б. Яшин²*

¹Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, Москва

²Государственный научно-исследовательский институт машиностроения им. В. В. Бахирева, Дзержинск

³Федеральный центр двойных технологий «Союз», Дзержинский

Обсуждаются результаты исследований возможности повышения детонационных характеристик, метательного и фугасного действия смесевых взрывчатых составов путем замены горючего наполнителя – порошка алюминия на борсодержащие композиционные наполнители «Al-nB», изготовленные методом механического легирования (механоактивации).

Расчетные обоснования выбора рецептур композиционных наполнителей «Al-2B» и смесевых взрывчатых составов проведены с помощью программного комплекса «Тетра» и базы данных «NIST». С использованием манометрического и ампульно-хроматографического анализов исследовано влияние состава и массы (толщины) защитных покрытий частиц композиционного наполнителя «Al-2B» на его совместимость с активными связующими смесевых взрывчатых составов. По данным копровых методик определено влияние покрытий частиц «Al-2B» на чувствительность создаваемых рецептур взрывчатых составов к удару и сдвигу. Методом дифференциального термического анализа показано, что введение графита в состав покрытия позволяет промотировать процесс его горения.

На образцах модельных взрывчатых составов с близкой по величине теплотой взрыва определено влияние на детонационные характеристики замены алюминия на борсодержащий наполнитель «Al-2B». Для определения характеристик фугасного, метательного и бризантного (дробящего) действия борсодержащих взрывчатых составов использованы масштабные макеты, выполненные по схеме стандартных осколочных цилиндров закрытого типа [1], и методика «Т-20». Оценка времени реакции окисления наполнителя за детонационной волной проведена при помощи методики малоуглового рентгеновского рассеяния синхротронного излучения [2].

По результатам выполненных исследований показана возможность повышения характеристик смесевых взрывчатых составов при обеспечении оптимальных размеров и формы частиц композиционного борсодержащего наполнителя, а также решения вопросов совместимости и чувствительности к ударным нагрузкам.

Список литературы

1. Физика взрыва. Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – В 2 т. – Т. 2. – М.: Физматлит. – 2004. – 656 с.
2. И. А. Рубцов, К. А. Тен, А. О. Кашикаргов и др. Исследование процесса окисления алюминиевой добавки при детонации взрывчатых составов с применением синхротронного излучения, Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Международная конференция XXIII Харитоновские тематические научные чтения. Сборник тезисов докладов. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», – 2022. – С. 17–18.

О росте углеродных частиц в волне детонации

А. П. Ершов

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Открытие детонационного синтеза алмаза активизировало интерес к выделению свободного углерода при взрыве. В работе рассмотрен роста частиц на основе физических оценок и экспериментальных результатов, полученных в последние годы.

Типичный размер частиц составлял несколько нанометров [1–3]. Броуновская коагуляция должна приводить к значительно большим размерам (десятки нм). Естественно возникло представление об ограничении роста частиц из-за выхода из условно жидкого состояния при увеличении размеров [4, 5]. Однако в продуктах взрыва безводородного ВВ бензотрифуроксана (БТФ) были обнаружены частицы размером в сотни нанометров [6], явно не подверженные размерным ограничениям. Для таких частиц броуновская коагуляция оказывалась слишком медленной. И. Ю. Мальков [7] указал на важность микротурбулентности (либо сдвиговых течений) в продуктах детонации, которые возникают благодаря неоднородности вещества и способны резко ускорить коагуляцию: размер 200 нм мог быть достигнут за время около 3 мкс.

Позднее появились данные о динамике роста частиц в реальном времени, полученные методом малоуглового рассеяния пучка синхротронного излучения (СИ) [8]. Это позволяет сравнить предсказания моделей роста с экспериментом. Кинетику роста частиц примем в виде

$$v \frac{dN}{dt} = \frac{1}{\tau_B} + \frac{Nv^{-2/3}}{\tau_S}, \quad \tau_B = \frac{3\eta}{4kTn_0}, \quad \tau_S = \frac{\pi}{\kappa\alpha\Gamma}, \quad (1)$$

где N – среднее число атомов углерода в частице, τ_B, τ_S – характерные времена броуновской и сдвиговой коагуляции, η, T – вязкость и температура среды, n_0 – начальная концентрация атомов углерода, α – объемная доля углерода, Γ – градиент скорости в продуктах детонации, $\kappa = 6,41$ – безразмерный коэффициент, найденный для сдвигового и турбулентного механизма в [9]. Расширение продуктов детонации, замедляющее рост, учитывается множителем $v = V/V_0$ в левой части (1). В правой же части выделено влияние расширения на градиент $\Gamma \propto v^{-2/3}$, а τ_B и τ_S рассматриваются как константы. Расширение для цилиндрических зарядов происходит в основном в радиальном направлении. Принималась оценочная зависимость $v = (1 + t/\tau_H)^2$.

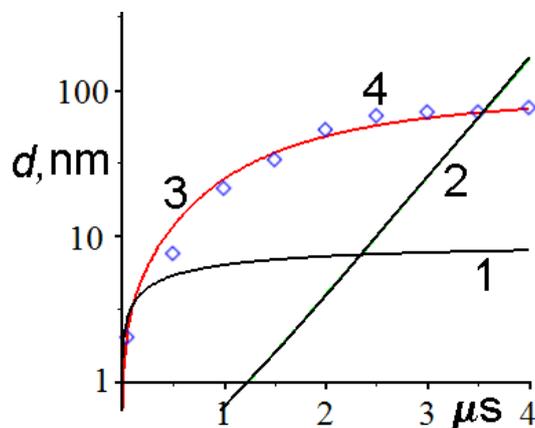


Рис. 1: Сравнение различных кинетик роста с экспериментом [8].

Линейный броуновский рост (рис. 1, кривая 1, $\tau_B = 3 \cdot 10^{-5}$ мкс) недостаточен уже начиная с 1 мкс. Сдвиговый механизм (кривая 2, $\tau_S = 0,08$ мкс) обеспечивает экспоненциальный рост, замедленный в начале и слишком быстрый в конце процесса. Однако при их параллельной работе (кривая 3, соответствующая кинетике (1), тем же τ_B и τ_S и $\tau_H = 2$ мкс) можно получить приемлемое совпадение с опытом (точки 4). Характерное время разлета τ_H выглядит вполне разумно для заряда диаметра 20 мм [8]. Время τ_S также соответствует ожиданиям. Реакция начинается в горячих точках, и градиент скорости Γ , по существу, представляет собой обратное время химической реакции. Время τ_B взято на порядок больше, чем следует из простейших оценок. Это можно объяснить как их неопределенностью, так и неоднородностью просвечиваемого объекта. Сигнал рассеяния СИ зависит от разности плотностей среды и частиц. Разлет вещества при детонации начинается с поверхности заряда, где контраст плотностей и будет наиболее сильным. Наружные области, где можно ожидать образования сравнительно мелких частиц, будут избыточно представлены в рассеянном излучении, создавая впечатление медленного роста частиц на начальной стадии.

Образование аномально крупных частиц при детонации БТФ связывали с повышенной температурой либо с отсутствием водородсодержащих соединений, предположительно тормозящих коагуляцию [6, 7]. Поскольку рост частиц продолжается существенно дольше, чем могла бы поддерживаться температура, необходимая для существования жидкой фазы, второй фактор более вероятен.

И сдвиг, и турбулентность порождают экспоненциальный рост, отличаясь только выражениями для характерных времен. Однако для формирования развитой турбулентности требуется заметное время (более 1 мкс), даже если достигаются необходимые числа Рейнольдса ($1 \div 2 \cdot 10^4$). Сдвиговый механизм выглядит предпочтительным.

Список литературы

1. Волков К. В., Даниленко В. В., Елин В. И. Синтез алмаза из углерода продуктов детонации ВВ. ФГВ. – 1990. – Т. 26, № 3. – С. 123–125.
2. Greiner N. Roy, Phillips D. S., Johnson J. D., Volk F. Diamonds in detonation soot. Nature. – 1988. – V. 333. – P. 440–442.
3. Лямкин А. И., Петров Е. А., Ершов А. П., и др. Получение алмазов из взрывчатых веществ. ДАН СССР. – 1988. – Т. 302, № 3. – С. 611–613.
4. Ершов А. П., Куперитох А. Л. Образование фрактальных структур при взрыве. ФГВ. – 1991. – Т. 27, № 2. – С. 111–117.
5. Даниленко В. В. Синтез и спекание алмаза взрывом. М.: Энергоатомиздат. – 2003. – 272 с.
6. Мальков И. Ю., Филатов В. И., Титов В. М., и др. Образование алмаза из жидкой фазы углерода. ФГВ. – 1993. – Т. 29, № 4. – С. 131–134.
7. Мальков И. Ю. Коагуляция углерода в условиях нестационарных течений продуктов детонации. ФГВ. – 1994. – Т. 30, № 5. – С. 155–157.
8. Ten K. A., Titov V. M., Pruvuel E. R., et al. Carbon condensation in detonation of high explosives. Proc. 15th Symposium (International) on Detonation. San Francisco, CA, USA. – 2014. – P. 369–374.
9. Лушников А. А., Токарь Я. И. Гамма-приближение для асимптотических спектров в коагулирующих системах. Коллоидный журнал. – 1980. – Т. 40, № 3. – С. 570–574.

Влияние модифицированных аллотропий углерода на процесс горения модельных смесевых ракетных топлив

*С. Ю. Нарыжный, В. Ю. Долматов, А. С. Козлов, В. В. Фоменко, Г. В. Семашкин,
В. А. Марчуков, С. В. Десятов*

Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог», Санкт-Петербург

Целью исследования является разработка компонентной базы энергоемких продуктов на основе аллотропий углерода и оценка их влияния на характеристики смесевых ракетных топлив (РТ) на примере модельных составов. Детонационные алмазы (ДНА) увеличивают скорость горения безметалльных РТ за счет окисления их до низкомолекулярного монооксида углерода, высокой плотности ($\sim 3,5$ г/см³), высокой положительной энтальпии образования (~ 3000 кДж/кг), большой теплопроводности, а также за счет образования углеродного каркасного слоя на поверхности горения. Введение ДНА в состав пастообразных РТ дает ощутимый прирост скорости горения композиции, а эффект от их применения зависит от компонентов базы состава и рабочего давления в камере сгорания.

Для каждого из 14-ти модельных составов были получены законы скоростей горения, часть из которых представлены в таблице 1.

Таблица 1: Модельные составы

Номер состава	Состав, %	Зависимость $U(p)$, мм/с	U_{40} , мм/с	U_{100} , мм/с	U_{150} , мм/с
1	Связующее 28 Окислитель 70 Пластификатор 2	$6,15 \cdot p^{0,315}$	19,7	26,2	29,8
2	Связующее 26 Окислитель 70 ДНА мод 2 Пластификатор 2	$2,585 \cdot p^{0,549}$	19,6	32,4	40,5
3	Связующее 28 Окислитель 70 ДНА (650 °С) 2	$2,676 \cdot p^{0,529}$	18,9	30,6	37,8
4	Связующее 28 Окислитель 70 ДНА(4 нм) 2	$3,031 \cdot p^{0,508}$	19,8	31,4	38,5
5	Связующее 28 Окислитель 70 ДНА (900 °С) 2	$2,844 \cdot p^{0,505}$	18,4	29,1	35,6

В качестве наноуглеродных добавок использовали: ДНА стандартный, термообработанный и раздробленный до 4 нм, сажу, активированный уголь, графит, адамантан, «графен». Максимальный прирост скорости горения на 24% обеспечила добавка 2% мас. ДНА модифицированного. При этом на ~ 200 °С снижается температура продуктов сгорания, что благоприятно сказывается на конструктивных элементах ракетного двигателя.

Список литературы

1. *Титов В. М., Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю.* Исследование процесса синтеза ультрадисперсного алмаза в детонационных волнах. ФГВ. – 1989. – Т. 25, № 3. – С. 117–126.
2. *Анисичкин В. Ф.* О механизме выделения углерода при детонационном разложении веществ. ФГВ. – 1994. – Т. 30, № 5. – С. 100–106.
3. *Анисичкин В. Ф.* О механизме детонации органических взрывчатых веществ. Химическая физика. – 2016. – Т. 35, № 6. – С. 30–34.

Скорость детонации эмульсионного взрывчатого вещества с добавлением алюминиевого порошка

А. В. Пластинин, А. С. Юношев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Эмульсионное взрывчатое вещество (ЭМВВ) – основное промышленное взрывчатое вещество (ВВ) [1]. Алюминиевый порошок является компонентом многих составов ЭМВВ. Несмотря на большое количество экспериментальных работ, посвященных изучению детонационных характеристик алюминизированных ЭМВВ [2, 3], трудно количественно предсказать влияние различных алюминиевых порошков на детонационные характеристики новых составов ЭМВВ. Зафиксировано, что добавление алюминия часто увеличивает действие взрыва ВВ. Однако до сих пор неизвестно, в какой части детонационной волны происходит реакция алюминия. Измерение зависимости скорости детонации алюминизированного ЭМВВ от диаметра или толщины заряда может помочь ответить на этот вопрос.

Таблица 1: Состав матрицы

Компонент	масс. %
Аммиачная селитра	68,25
Натриевая селитра	10,55
Вода	15,2
Индустриальное масло	4
Эмульгатор	2

В основе исследуемого ЭМВВ лежит эмульсионная матрица, состав которой приведен в таблице 1. Плотность эмульсии составляет $1,41 \text{ г/см}^3$. В качестве сенсibilизатора использовались полимерные микробаллоны Expancel 461 DET 40 d25. Плотность ЭМВВ варьировалась добавлением в эмульсию разного количества сенсibilизатора. Исследовались ЭМВВ с начальной плотностью 0,5, 1,0 и $1,2 \text{ г/см}^3$. В качестве добавки использовались алюминиевые порошки ПАП-2 и АСД-4, а также порошок талька. Массовое содержание добавки составляло 23%.

Измерена скорость детонации исследуемых составов в плоских зарядах с разной толщиной и с разной начальной плотностью. Показано, что добавление алюминиевого порошка ПАП-2 уменьшает критическую толщину ЭМВВ. При больших толщинах заряда и плотности алюминизированного эмульсионного взрывчатого вещества более $1,0 \text{ г/см}^3$ влияние порошков ПАП-2 и АСД-4 на скорость детонации эквивалентно. Замена в составе ЭМВВ алюминиевого порошка на порошок талька заметно ухудшает детонационные характеристики эмульсионного взрывчатого вещества. Результаты работы позволяют сделать предположение, что алюминиевые порошки ПАП-2 и АСД-4 в составе эмульсионного взрывчатого вещества с плотностью более $1,0 \text{ г/см}^3$ полностью реагируют в детонационной волне до поверхности Чепмена – Жуге.

Список литературы

1. Колганов Е. В., Соснин В. А. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. 1-я книга (Составы и свойства). Дзержинск: ГосНИИ «Кристалл». – 2009. – 592 с.

2. *Bednarczyk E., Maranda A., Paszula J., Paplinski A.* Studies of effect of aluminium powder on selected parameters of emulsion explosive sensitized with microballoons. *Chemik.* – 2016. – V. 70, № 1. – P. 41–50.
3. *Kato Y., Murata K., Kaga N., Tanaka K., Takahashi K.* Reaction of aluminum particles in detonation of emulsion explosive. *European Federation of Explosives Engineers, Lisbon Conference Proceedings.* – 2011. – P. 281–289.

Современные количественные квантовохимические расчеты термохимии и кинетики разложения энергетических соединений

В. Г. Киселев^{1,2}, Н. В. Муравьев³, К. А. Моногаров³, А. Н. Пивкина³

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

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва

Высокоточные расчеты энергий связи и активационных барьеров первичных реакций разложения играют важную роль для надежных прогнозов термической стабильности и параметров детонации энергетических материалов (ЭМ). В то же время, ввиду большой вычислительной сложности, высокоуровневые количественные *ab initio* расчеты были недоступны для большого количества важных ЭМ даже «среднего» размера молекул, включая, например, СL-20. Широко распространенные расчеты методами теории функционала плотности (DFT) не позволяют достичь универсальной «химической точности» (~ 1 ккал/моль) и, в конечном счете, дать надежные механистические данные о путях разложения важных ЭМ.

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

Кроме того, предложена новая методика определения энтальпии образования энергетических соединений в стандартном (твердом) состоянии, состоящая в комбинации газофазной энтальпии образования, полученной из высокоточного квантовохимического расчета многоуровневыми процедурами (W2-F12 или W1-F12) и энтальпии сублимации, определяемой из термогравиметрического эксперимента. Данная методика позволяет заменить сложный и затратный калориметрический эксперимент более простым в комбинации с теоретическими расчетами.

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

Взрывное горение наноразмерной смеси Al + CuO

*А. Ю. Долгобородов^{1,2}, В. Г. Кириленко², М. А. Бражников², Б. Д. Янковский¹,
Т. И. Бородина¹, Г. Е. Вальяно¹*

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Москва

Термитные составы с наноразмерными компонентами (нанотермиты, НТ) имеют ряд преимуществ по сравнению с обычными смесями металл-окислитель. За счет увеличения поверхности контакта между реагентами и уменьшению ограничений по тепло- и массопереносу НТ имеют существенно более высокую скорость распространения пламени по сравнению с их микронными аналогами. Скорость горения в высокопористых НТ носит взрывной характер с сильным звуковым эффектом и может достигать более 1 км/с [1].

В данной работе с помощью высокоскоростной видеорегистрации были измерены скорости и исследованы особенности распространения реакции взрывного горения (ВГ) в пористых наноразмерных смесях Al+CuO в трубках из кварцевого стекла с различными преградами. Диаметр трубок составлял 2÷5 мм, длина до 20 см, пористость смеси в трубках – 84÷86%. Горение инициировалось лазерным импульсом. За первые 30 мм трубки скорость распространения светящегося фронта в НТ достигала величины 800÷900 м/с и сохранялась по всей длине трубки. При наличии воздушных промежутков (20÷30 мм) зафиксирована скорость разлета светящихся продуктов более 1800 м/с. Обнаружена способность реинициирования реакции в нанотермитах через инертные преграды с различной пористостью (стеклянные микросферы, вискоза) протяженностью до 30 мм.

По относительному изменению яркости свечения фронтальной области на оси трубки определен характерный размер зоны воспламенения, в которую горячие промежуточные продукты в виде струй проникают по каналам макропор, поджигая исходную смесь. Показано, что зона появления и нарастания свечения и зона возникновения градиента давления в высокопористых НТ-составах разнесены в пространстве на расстояние 4÷5 мм. Ранее это явление было обнаружено экспериментально авторами [2], но никак не прокомментировано.

Для объяснения высокоскоростного процесса предложена упрощенная модель, основанная на предположении ведущего влияния создаваемого в процессе горения нанотермитов градиента давления в газообразных промежуточных продуктах. В этой модели инжектирование высокотемпературных струй, поджигающих исходный состав, рассматривается, как процесс неизотермической фильтрации горячей субстанции через неподвижную матрицу исходного вещества с порами микронного размера. По модельным опытам с инертными преградами (микросферы, воздушный промежуток) выявлены характерные черты исследуемого механизма и проведены оценки проницаемости смеси и давления на границе зон воспламенения и горения. Результаты расчетов согласуются с независимыми экспериментальными данными.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

Список литературы

1. *Zarko V. E., Gromov A. A.* Energetic nanomaterials: synthesis, characterization, and application. Eds. Amsterdam: Elsevier – 2016. – 392 p.
2. *Sanders V., Asay B., Foley T., Tappan B. et al.* Reaction Propagation of Four Nanoscale Energetic Composites. *J. Propul. Power.* – 2008. V 23, № 4. – P. 707–714.

Исследование влияния азодикарбонамида на свойства нанотермитных систем CuO/Al и $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$

В. В. Гордеев, М. В. Казутин, Н. В. Козырев

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск

В последние десятилетия ведутся активные исследования высокоэнергетических гетерогенных систем, содержащие наноструктурные реагенты. Среди подобных систем, заметно выделяются нанотермиты – наноразмерные порошкообразные смеси металлов и оксидов металлов, для которых характерен ряд уникальных характеристик: широкий диапазон скорости горения от нескольких см/с до тысяч м/с, которую можно варьировать с помощью рецептурных и технологических факторов; возможность горения в тонких слоях (0,1 мм и ниже) и миллиграммовых навесках. Исходя из представленных особенностей, нанотермитные смеси рассматриваются как перспективный материал для создания микроразмерных пиротехнических устройств. Однако, в «чистом» виде применение нанотермитных систем затруднено ввиду их высокой чувствительности к электростатическому и механическому воздействию. Для нивелирования подобных недостатков в пиротехнике, часто используются флегматизирующие добавки, которые, как правило, позволяют снизить чувствительность смесей, но в случае нанотермитов наблюдается существенное снижение скорость горения исследуемых систем вплоть до потери способности горения в тонком слое. С другой стороны, ведутся активные исследования влияния добавок высокоэнергетических материалов (нитрат целлюлозы, гексоген, перхлорат аммония и т.п.) на свойства нанотермитных систем, которые способствуют увеличению взрывчатых параметров нанотермитных композиций, при этом, в некоторых случаях (нитрат целлюлозы, CL-20) наблюдается снижение чувствительности исследуемых композиций. Однако, имеющиеся данные не позволяют составить однозначное представление о влиянии добавок на свойства нанотермитов, что осложняет понимание механизма горения систем нанотермит/добавка.

В настоящей работе представлены результаты исследования свойств композиций на основе нанотермитных пар $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$ и CuO/Al с добавкой горючего-газообразователя азодикарбонамида (АДКА), при различной рецептурной компоновке составов: I – соотношение компонентов нанотермитной пары $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$ (87/13 %), CuO/Al (79/21 %) соответствующее максимальному расчётному значению Q и оставалось постоянным в смеси; II – соотношение компонентов нанотермита $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$ (86/14 %), CuO/Al (76/24 %), соответствующее максимальному расчётному значению P и оставалось постоянным в смеси. Для композиции на основе нанотермитной пары $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$ добавка АДКА позволяет увеличить относительную силу взрыва на $19 \div 29$ %, а для композиции на основе CuO/Al на $147 \div 155$ %, по сравнению с базовой нанотермитной смесью. При этом для всех исследуемых композиций наблюдается экстремальный характер зависимости силы взрыва от содержания добавки. Скорость горения композиций $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/\text{АДКА}$ в трубке диаметром 2 мм остаётся на уровне базовой нанотермитной смеси, однако в тонком слое наблюдается увеличение скорости на $\sim 100 \div 200$ м/с. В случае композиций $\text{CuO}/\text{Al}/\text{АДКА}$ скорость горения в трубке удаётся увеличить на $\sim 50 \div 150$ м/с, а скорость горения в тонком слое на $\sim 100 \div 270$ м/с.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FUFЕ-2021–0005).

Структура неустойчивого детонационного фронта в жидких ВВ

А. В. Уткин, В. М. Мочалова, Д. Ю. Рапота, В. А. Сосиков, С. И. Торунюв

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка

Одномерные детонационные волны в гомогенных взрывчатых веществах (ВВ) в зависимости от кинетики химической реакции могут распространяться как в устойчивом, так и в неустойчивом режимах. Наиболее существенный вклад в исследование неустойчивости детонации в жидких ВВ внесли авторы [1]. Считается, что в результате потери устойчивости формируется сложная трехмерная ячеистая структура фронта, одной из особенностей которой является формирование поперечных детонационных волн [1]. Поэтому при регистрации свечения детонационного фронта скоростной камерой в режиме щелевой развертки регистрируется сетка ярко светящихся линий. Другой метод, позволяющий получить информацию о структуре неустойчивого детонационного фронта, основан на регистрации волновых профилей в условиях стационарной детонации. В этом случае потеря устойчивости проявляется в виде осцилляций скорости, амплитуда которых определяется характерным размером возникающих ячеек. Достоверность этих методов не вызывает сомнения, но они дают косвенную информацию о ячеистой структуре неустойчивого детонационного фронта.

В данной работе проведено исследование структуры неустойчивого детонационного фронта в смесях нитрометан/ацетон (НМ/Ац), тетранитрометан/метанол (ТНМ/М) и ФИФО/М с использованием высокоскоростной камеры НАНОГЕЙТ-22/16, позволяющей получить 16 кадров с временем экспозиции 10 нс. Результаты экспериментов для смеси НМ/Ац 80/20 демонстрируют наиболее близкую к предсказываемой теоретически ячеистую структуру детонационного фронта. Из полученных кадров видно, что неоднородности на фронте детонационной волны в исследуемой смеси имеют сетчатую структуру. Характерный размер неоднородностей составляет $0,15 \div 3$ мм. Расчётные скорости их поперечного движения по поверхности детонационного фронта лежат в диапазоне $5 \div 8$ км/с.

Влияние концентрации разбавителя на неустойчивость детонации исследовалось на примере смеси ТНМ/М. При концентрации метанола 50% характерный размер неоднородностей меньше пространственного разрешения методики, и свечение фронта является однородным. При увеличении концентрации метанола до 55% характер свечения фронта резко меняется: на ярком фоне появляется множество темных полос, которые, однако, не формируют сетчатую структуру, как это наблюдается в смеси НМ/Ац. При концентрации метанола 57% неоднородности фронта оказываются сопоставимыми с диаметром заряда, что приводит к затуханию детонации.

Смесь ФИФО/М теряет устойчивость лишь при приближении к предельной концентрации метанола, равной 35%. При 30% метанола в смеси ФИФО/М формируются крупномасштабные области в виде темных полос, которые движутся в поперечном направлении фронта с характерной скоростью 4 км/с.

Таким образом показано, что структура неустойчивого детонационного фронта не является универсальной и зависит от свойств исследуемого ВВ.

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

Список литературы

1. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970. – 164 с.

Влияние полиметилметакрилата на устойчивость детонационных волн и критические параметры нитрометана

*В. М. Мочалова¹, А. В. Уткин¹, М. Ю. Шакула^{1,2}, В. В. Лавров¹, В. А. Сосиков¹,
С. И. Торуннов¹, Д. Ю. Рапота¹*

¹Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Нитрометан (НМ) является одним из наиболее изученных жидких взрывчатых веществ. Добавление различных механических включений может существенно менять процесс инициирования, чувствительность к ударно-волновому воздействию и критические параметры детонации вещества [1]. В этом случае возникают горячие точки, и скорость химической реакции увеличивается. Разложение взрывчатого вещества становится неоднородным по объему. Смеси НМ с калиброванными микросферами идеально подходят для исследований, анализа и численного моделирования, поскольку при сжатии получают горячие точки одинакового размера и температуры.

Как правило, стабилизация смеси НМ/микросферы во времени обеспечивается за счет увеличения вязкости НМ. Это достигается за счет растворения в НМ, например, гуаровой камеди [2] или полиметилметакрилата (ПММА) [3]. В то же время практически нет информации о том, как загуститель влияет на детонационные параметры и структуру детонационных волн НМ. Поэтому целью нашей работы является исследование влияния различных добавок ПММА на структуру детонационных волн, критический диаметр и параметры детонации в смеси НМ/ПММА (гелеобразный НМ).

В работе профили массовой скорости и скорость детонации в гелеобразном НМ измерялись с помощью лазерного интерферометра VISAR. Показано, что добавление от 2 до 4% ПММА приводит к изменению структуры зоны реакции, что проявляется в виде ячеистой неустойчивости детонационного фронта. При изменении концентрации ПММА от 0 до 4% скорость детонации уменьшается с 6,34 км/с до 6,26 км/с, при этом критический диаметр в стеклянной оболочке увеличивается с 14 до 19 мм.

Известно, что критический диаметр жидких взрывчатых веществ определяется волнами срыва реакции на границе с оболочкой. Свечение фронта детонации по мере его распространения вдоль заряда регистрировалось высокоскоростной фотокамерой СФР. В чистом НМ на границе заряда периодически возникают волны срыва реакции. Показано, что с увеличением концентрации ПММА волны срыва реакции достигают центра заряда, что приводит к потере устойчивости детонационного фронта вещества.

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

Список литературы

1. *J. J. Lee, D. L. Frost, J. H. S. Lee, A. Dremin.* Propagation of nitromethane detonations in porous media. *Shock Waves*. – 1995. – V. 5, N 1–2. – P. 115–119.
2. *D. M. Dattelbaum, S. A. Sheffield, D. B. Stahl, A. M. Dattelbaum* Influence of hot spot features on the shock initiation of heterogeneous nitromethane. *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics. – 2009. – P. 263–266.
3. *E. Bouton, B. A. Khasainov, H. N. Presles, P. Vidal, B. S. Ermolaev* Sensitization of two-dimensional detonations in nitromethane by glass microballoons. *Shock Waves*. – 1999. – V. 9, N 2. – P. 141–147.

Зависимость скорости детонации взрывчатых составов от дисперсности алюминиевого порошка

*И. Н. Сурначёв¹, Б. В. Певченко¹, А. В. Курбатов¹, Е. А. Петров^{1,2}, Д. В. Пушкин¹,
М. А. Чеканов¹, Е. А. Романова¹*

¹Федеральный научно-производственный центр «Алтай», Бийск

²Бийский технологический институт Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова, Бийск

Приведен анализ многочисленных экспериментальных исследований влияния инертных (в зоне химпика) высокоэнергетических твердых добавок (ИД) на параметры детонации взрывчатых составов (ВС).

На примере алюминизированных ВС (АВС) показано, что влияние среднего размера частиц алюминия d_{cp} (то есть количества частиц N при определенном процентном содержании β алюминия в АВС) на скорость детонации АВС ($D_{АВС}$) зависит от способа изготовления заряда (литьё, прессование) и соотношения скоростей детонации АВС ($D_{АВС}$) и ударной волны в частице D_{Al} .

Показано, что при уменьшении d_{cp} , то есть при увеличении количества частиц N при заданном процентном содержании β :

- в прессованных АВС скорость детонации $D_{АВС}$ уменьшается независимо от соотношения D_{Al} и $D_{АВС}$;
- для литьевых АВС, если скорость ударной волны в алюминии выше скорости детонации АВС, то есть $D_{Al} > D_{АВС}$, то скорость детонации АВС растет, а если скорость $D_{АВС} > D_{Al}$, то скорость детонации АВС уменьшается;
- при этом в прессованных и литьевых АВС теплота взрыва растет.

Для объяснения такой зависимости $D_{АВС}$ от размера d_{cp} и количества частиц N выдвинуто предположение, что при $D_{Al} > D_{АВС}$ ударная волна в частицах алюминия, опережая детонационную волну в АВС, повышает давление перед ней, чем способствует возникновению и распространению детонации, то есть в этом случае частицы играют положительную роль «горячих точек» и при увеличении их количества скорость детонации АВС возрастает.

При $D_{Al} < D_{АВС}$ такого эффекта не возникает – частицы играют отрицательную роль «холодных точек», поглощая большое количества тепла, препятствуя распространению детонации.

Получены формулы для расчета скорости детонации для прессованных и литьевых АВС при изменении дисперсности (количества) частиц алюминия.

Экспериментальное определение параметров воспламенения и горения конгломератов частиц боридов алюминия в условиях высокотемпературной среды

Д. А. Ягодников, П. В. Папырин, М. Ю. Гаца, М. А. Худяков

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва

Одной из актуальных проблем современного ракетного двигателестроения является создание новых, более эффективных топливных композиций, в том числе содержащих высокоэнергетические материалы. Перспективным считается использование в этой роли порошкообразных металлических горючих (ПМГ) таких как магний, алюминий, бор (условно относимый к металлам) и его соединения. Интерес представляют экспериментальные данные и математические модели, позволяющие оценить времена задержки воспламенения и горения ПМГ в виде отдельных частиц, их аэрозвесей или в составе смесевых конденсированных систем.

Для ряда технических устройств процессы воспламенения и горения ПМГ происходят при относительно высоких температурах ($2\,300 \div 2\,500$ К), однако опубликовано ограниченное число работ, содержащих информацию по характеристикам воспламенения и горения частиц ПМГ, в частности боридов алюминия, в этих условиях.

В данной работе определение характеристик процессов воспламенения и горения конгломератов проводилось с использованием установки для создания высокотемпературной среды представляющей собой горелку Бунзена, работающую на предварительно перемешанных газообразных компонентах топлива – кислороде и метане. В пламя горелки вводился исследуемый конгломерат частиц ПМГ и обеспечивалась регистрация процессов воспламенения и горения с помощью скоростной видеокамеры (до 4000 кадров/с) и широкодиапазонного цифрового спектрографа ($200 \div 1\,000$ нм).

В работе авторами проведена экспериментальная оценка времени задержки воспламенения и времени горения конгломератов микродисперсных частиц диборида алюминия и бора в условиях повышенных ($2\,300 \div 2\,500$ К) температур окружающей среды. По результатам экспериментальных исследований получены данные о морфологическом составе конгломератов частиц ПМГ до и после испытания, проведён спектральный анализ излучения продуктов сгорания конгломератов частиц диборида алюминия и бора. Выполнена оценка зависимости времени индукции воспламенения и времени горения от размеров, плотности конгломерата частиц и от температуры окружающей среды.

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для подтверждения и расширения области применимости известных теоретических моделей [1], при выработке рекомендаций при проектировании двигательных установок летательных аппаратов, использующих топлива с высокоэнергетическими добавками на основе бора и диборида алюминия.

Список литературы

1. Папырин П. В., Сухов А. В., Ягодников Д. А. Единая математическая модель воспламенения и горения одиночных частиц диборида алюминия. Инженерный журнал: Наука и инновации. – 2017. – № 6.

О модели процессов, протекающих при контакте продуктов детонации алюминизированных ВВ с воздухом

А. С. Губин, М. Н. Терещенко, П. С. Чернавкин

Научно-исследовательский машиностроительный институт им. В. В. Бахирева, Москва

Способность к догоранию продуктов детонации (ПД) различных индивидуальных взрывчатых веществ и взрывчатых составов (ВВ) в окружающем воздухе известна и описана многими исследователями. Однако большинство подобных работ посвящено изучению влияния процесса догорания ПД на фугасное действие взрыва, в то время как вопрос влияния указанного процесса на метательную способность, в частности, на метание оболочек и их фрагментов, затрагивается в меньшей степени.

В результате анализа данных по взрывному метанию металлических оболочек мощными ВВ с добавками дисперсного алюминия, была сформулирована модель процессов [1], происходящих на контактной границе ПД-воздух, названная моделью «пробки». Согласно этой модели при прорыве ПД сквозь щели в оболочке происходит их турбулентное перемешивание с воздухом и интенсивное догорание алюминия, возникающая в результате реакции зона повышенного давления играет роль «пробки», закрывающей щели в оболочке и препятствующей дальнейшей разгрузке ПД. Данный эффект эквивалентен увеличению радиуса разрушения оболочки, которое приводит к повышению доли энергии ПД, трансформируемой в кинетическую энергию оболочки.

Исследования проводились на макетах, изготовленных из стали 45, стали 35ХЗНМ, стали 60С2, меди М1. Макеты снаряжались составами на основе флегматизированных гексогена и октогена, а также их смесей с добавкой дисперсного алюминия. Скорости метания оболочек и фрагментов определялись методом импульсной рентгенографии.

В работе продемонстрировано влияние процесса догорания ПД на метательную способность ВВ. Прирост скорости метания оболочки за счет введения 10% дисперсного алюминия, равномерно распределенного в заряде, составляет до 9%. При метании в вакууме эта величина снижается. На примере экспериментов с двусторонним инициированием детонации показано влияние скорости движения ПД на величину эффекта догорания.

Установлено влияние добавки алюминия, размещенного в тонком периферийном слое комбинированного заряда, на скорость метания стальной оболочки в атмосфере воздуха и в вакууме. При этом при значительно меньшем содержании добавки алюминия прирост скорости метания (по сравнению с зарядом без добавки) сопоставим по величине с равномерно распределенной добавкой алюминия.

Показано влияние физико-механических свойств материала оболочек на энергию взрыва алюминизированных ВВ, передаваемую оболочке, и эффект от введения добавки дисперсного алюминия.

В работе приводится обобщенная информация по экспериментальным данным, на основании которых получена модель «пробки», а также по новым данным, дополнительно подтверждающим положения указанной модели.

Список литературы

1. Давыдов В. Ю., Грязнов Е. Ф., Губин А. С. и др. Метание стальных пластин и трубок при детонации флегматизированного гексогена и его смеси с алюминием в разреженной атмосфере. XI Харитоновские научные чтения. Сборник докладов. РФЯЦ–ВНИИЭФ. – 2009. – С. 435–440.

Управление структурой, физико-химическими характеристиками и реакционной способностью механоактивированных композиционных борсодержащих наполнителей взрывчатых составов

И. А. Кузнецов², А. Е. Курепин², А. И. Малкин¹, Д. А. Попов¹, А. А. Рязанцева²

¹Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, Москва

²Государственный научно-исследовательский институт машиностроения им. В. В. Бахирева, Дзержинск

Одним из перспективных направлений создания новых энергетических материалов является использование в качестве наполнителей композиционных борсодержащих порошков «А1-2В», изготовленных методом механической обработки компонентов в охлаждаемых шаровых мельницах-активаторах.

По теплоте сгорания такие порошки могут значительно превосходить алюминий. Однако широкое внедрение композиционных порошков «А1-2В» в практику сталкивается с необходимостью адаптации их физико-механических свойств и кинетических параметров к конструкции и условиям функционирования изделий. Эффект от их применения в значительной степени определяется кинетическими параметрами воспламенения и горения. Последние существенно зависят от фракционного состава, гранулометрических и структурно-морфологических характеристик получаемой смеси. В связи с этим возникает проблема управления характеристиками композиционных порошков «А1-2В» за счет варьирования технологических параметров.

Одним из способов существенного улучшения структурно-морфологических характеристик и физико-механических свойств композиционных порошков «А1-2В» является добавление коллоидного графита. Введение в систему «А1-2В» всего 2% по массе коллоидного графита приводит к более быстрому и легкому насыщению композиционных частиц бором за счет его пластичности и относительной мягкости, снижению содержания продуктов реакции с компонентами размольной среды, количества намола, возникающего при взаимодействии твердых частиц бора со стенками емкости активатора и мелющими телами, и ускорению реакции горения.

Проведены сравнительные эксперименты, показавшие, что применение композиционных порошков «А1-2В» в составе снаряжения изделий вместо применяемых промышленностью порошков алюминия обеспечивает повышение фугасного, бризантного и метательного действия.

Исследование окисления алюминиевой добавки при детонации конденсированных взрывчатых составов с применением синхротронного излучения

И. А. Рубцов^{1,2}, К. А. Тен¹, А. О. Кашкаров¹, А. Е. Курепин³, А. А. Рязанцева³

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

²ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

³Государственный научно-исследовательский институт машиностроения им. В. В. Бахирева, Дзержинск

Добавление к энергетическим материалам активных добавок, таких как алюминий и бор приводит к повышению теплоты взрыва, метательного и фугасного действия получающихся смесевых взрывчатых составов. При этом одной из ключевых характеристик такого взрывчатого состава является длительность реакции (окисления) активных добавок.

Экспериментально напрямую в процессе взрыва зарегистрировать длительность окисления активных добавок возможно с использованием методики малоуголового рентгеновского рассеяния с высоким временным разрешением. Эксперименты были проведены на экспериментальной станции Экстремальное состояние вещества Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» использующей синхротронное излучение (СИ) ускорительного комплекса ВЭПП-4, с временем экспозиции 73 пс и скважностью импульсов СИ 611 нс.

Для определения влияния добавок алюминия и бора методом литья были изготовлены цилиндрические заряды ($\varnothing 20 \times 30$ мм) из взрывчатых составов с одинаковой основой, но разными наполнителями (с добавками алюминия и композиционной смеси алюминий-бор). Экспериментально получены данные о времени реакции добавки в волне разгрузки продуктов детонации, а также уравнение состояния продуктов взрыва исследуемых ВВ, определены их детонационные характеристики.

Влияние добавки-модификатора на параметры горения и агломерацию смесевых модельных топлив с алюминием

И. В. Сорокин¹, О. Г. Глотов^{1,2}, Г. С. Суродин¹, Н. С. Белоусова^{1,2}

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

²Новосибирский государственный технический университет, Новосибирска

Для горения алюминизированного топлива характерно явление агломерации. В результате с поверхности горения в газовую фазу выходят агломераты, образованные из сотен, а зачастую из тысяч исходных частиц алюминия. Помимо размера, агломераты отличаются от начальных частиц алюминия по структуре, основным параметром которой является массовое соотношение металлического (непрореагировавшего) алюминия и его оксида. Явление агломерации является вредным и нежелательным. Для снижения агломерации необходимо оптимизировать компонентный и гранулометрический состав топлива. Однако на данный момент нет развитых математических моделей, способных предсказать характеристики (параметры) агломератов при вариации состава топлива. Поэтому необходимые характеристики агломерации получают в экспериментах. Целью работы является изучение влияния добавки-модификатора на основные характеристики горения смесевых топлив с алюминием и состав конденсированных продуктов горения (КПГ).

Исследованы характеристики горения смесевых топлив, компонентный состав которых включал 20 % активного связующего, 60 % перхлората аммония ситовой фракции 180 ÷ 250 мкм и 20 % порошка алюминия. В топливах использовали порошки марок АСД-4 и АСД-0 со средними размерами частиц $D_{43} = 15$ мкм и $D_{43} = 80$ мкм, соответственно. В качестве добавки-модификатора характеристик процесса горения использовали криолит – гексафтороалюминат натрия $\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$ [1]. Добавку вводили в топливо в количестве 2 %.

Эксперименты по горению смесевых топлив проводили в двух вариантах: 1 – в сосуде высокого давления в азоте при давлении 0,35 МПа с отбором КПГ в жидкость; 2 – в воздухе при атмосферном давлении с отбором продуктов горения в поддон. В экспериментах определяли скорости горения и массовые и размерные характеристик агломератов, покидающих поверхность горения. Массу агломератов в варианте 1 характеризовали безразмерным параметром m_{80} , который вычисляли как частное от деления массы частиц КПГ крупнее 80 мкм на массу топлива.

Установлено, что введение добавки $\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$ приводит к снижению массы агломератов. При этом эффект снижения агломерации сильнее проявился для топлива с алюминием марки АСД-4 – 30 %. Для топлива с алюминием марки АСД-0 эффект составляет – 16 %. Следует отметить, что добавление криолита в состав топлива приводит к большому разбросу значений скорости горения в сосуде высокого давления.

Авторы (ИХКГ СО РАН) благодарят Министерство науки и высшего образования РФ за финансовую поддержку в рамках госзадания (FWGF-2021-0001).

Список литературы

1. *Архипов В. А., Басалаев С. А., Кузнецов В. Т., Порязов В. А., Федорычев А. В.* Моделирование процессов зажигания и горения борсодержащих твердых топлив. ФГВ. – 2021. – Т. 57, № 3 – С. 58–64.

Исследование горения алюминизированных топлив с добавками-модификаторами

Н. С. Белоусова^{1,2}, О. Г. Глотов^{1,2}, П. Г. Корчемкина²

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

²Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

В традиционных смесевых ракетных топливах наиболее широкое распространение в качестве горючего компонента получил алюминий. Возможности повышения параметров топлива при использовании обычного порошкообразного алюминия микронных размеров практически исчерпаны. Поэтому предпринимаются попытки модифицировать алюминий, чтобы улучшить его характеристики горения. Известные способы модификации металлических горючих: повышение дисперсности, легирование металла (введение добавок в объём частиц, а также приготовление сплавов, механосплавов, композитов); нанесение различных покрытий на поверхность частиц; введение дополнительного горючего, каталитического или иного активного компонента не в частицы, а в состав смесевой системы.

Объектами исследования являются модельные смесевые топлива, состоящие из перхлората аммония (ПХА, $\approx 60\%$ по массе), алюминия ($\approx 20\%$), активного связующего ($\approx 20\%$) и включающие опционально добавку-модификатор ($1,0 \div 3,5\%$ сверх 100%). Компоненты: ПХА – ситовая фракция $500 \div 630$ мкм, либо $180 \div 250$ мкм; Al: АСД-4; связующее – метилполивинил-тетразольный полимер, пластифицированный нитроэфирно-нитраминным пластификатором [1, 2]; добавка – одно из следующих веществ: TiB_2 , $AlMgB_{14}$, $(NH_4)_2TiF_6$, NH_4BF_4 , $Ca_3(PO_4)_2$.

Эксперименты по горению смесевых топлив проводили в малогабаритном сосуде высокого давления (бомбе) в азоте при давлении $0,35$ МПа. Бомба имеет объём $0,33$ л, рассчитана на давление до 3 МПа, снабжена окнами диаметром 30 мм для видеозаписи процесса горения, системой контроля давления и предназначена для отбора конденсированных продуктов горения (КПГ) в жидкость. При сжигании исследуемого образца диаметром 5 мм и высотой 5 мм, производится видеосъёмка процесса горения и отбор КПГ в сосуд с дистиллированной водой объёмом 100 мл, помещённый внутрь бомбы. В результате определены масса частиц-агломератов крупнее 80 мкм, их полнота сгорания, функции распределения частиц КПГ по размерам и средние размеры частиц. Выявлены тенденции влияния добавок-модификаторов на регистрируемые параметры. Некоторые из обнаруженных эффектов представляют практической интерес с точки зрения управления скоростью горения и улучшения характеристик КПГ.

Авторы (ИХКГ СО РАН) благодарят Министерство науки и высшего образования РФ за финансовую поддержку в рамках госзадания (FWGF-2021-0001).

Список литературы

1. Кижняев В. Н., Голобокова Т. В., Покатилов Ф. А., Верещагин Л. И., Эстрин Ю. И. Синтез энергичных триазол- и тетразолсодержащих олигомеров и полимеров. Химия гетероциклических соединений. – 2017. – Т. 53, № 6/7. – С. 682–692. <https://doi.org/10.1007/s10593-017-2109-6>.
2. Архипов В. А., Горбенко Т. И., Жуков А. С., Пестерев А. В. Влияние хлорида олова на скорость горения гетерогенных конденсированных систем. Химическая физика и мезоскопия. – 2011. – Т. 4, № 13. – С. 463–469.

Моделирование горения в замкнутом объеме зерненого заряда с добавлением нанопорошка алюминия

А. Ю. Крайнов, К. С. Рогаев

Томский государственный университет, Томск

Целью данной работы является сравнение экспериментально замеренной зависимости роста давления во времени в манометрической бомбе постоянного объема (МБ) с расчетами по термодинамической модели горения навески пороха в МБ, и по сопряженной модели нестационарного горения пороха.

Представлено экспериментально-теоретическое исследование горение зерненных зарядов, состоящих из пироксилиновых порохов в манометрической бомбе постоянного объема. Проведено сравнение экспериментально замеренной зависимости роста давления в манометрической бомбе с расчетами по термодинамической модели горения навески пороха в манометрической бомбе с использованием эмпирического закона зависимости скорости горения от давления и по сопряженной модели нестационарного горения пороха, в которой учитываются химические реакции в конденсированной и в газовой фазах, на поверхности горения ставятся граничные условия четвертого рода (условия сопряжения) [1, 2]. Получено удовлетворительное согласие результатов расчетов с экспериментальными измерениями. Выявлено, что нестационарная скорость горения пироксилинового пороха, обусловленная большой скоростью роста давления над поверхностью горения, превышает квазистационарную скорость. Это отличие зависит от скорости роста давления и от его абсолютной величины, и уменьшается с увеличением давления.

Для учета добавления нанопорошка алюминия в состав пороха математическая модель [2] была дополнена моделью горения наноразмерных частиц алюминия как в [3]. Проведен расчетно-теоретический анализ влияния добавления нанопорошка алюминия в состав пороха на скорость его горения и скорость роста давления в МБ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Список литературы

1. Крайнов А. Ю., Порязов В. А. Численное моделирование нестационарного горения пороха при быстром росте давления на основе сопряженной модели горения. Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 1. – С. 185–193.
2. Крайнов А. Ю., Порязов В. А. Численное моделирование погасания пороха Н при резком сбросе давления на основе сопряженной модели горения. ФГВ. – 2015. – Т. 51, № 6. – С. 47–52.
3. Крайнов А. Ю., Порязов В. А. Математическое моделирование горения замороженной суспензии нанодисперсного алюминия. ФГВ. – 2016. – Т. 52, № 2. – С. 60–66.

Влияние V_2O_5 на процесс окисления аморфного бора

В. Г. Шевченко, Д. А. Еселевич, В. Н. Красильников, А. В. Конюкова

Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург

Бор и его соединения рассматриваются как возможные высокоэффективные горючие компоненты топлив для ракетных двигателей и воздушно-реактивных двигателей. Однако, образование на поверхности бора легкоплавкого оксида, затрудняющего доступ окислителя к поверхности горения, снижает его эффективность в энергетических конденсированных системах. Активное тепловыделение начинается при температурах выше температуры кипения оксида бора. Аналогичная картина наблюдается на бориде алюминия и других соединениях. В связи с этим, наиболее эффективным подходом для решения проблемы полноты сгорания бора, представляется модификация свойств продуктов окисления путем воздействия на процесс доставки окислителя к поверхности горения. Нами разработано два варианта способа активирования порошка бора (рис. 1), включающих смешение исходного порошка с гидридами или сольвогелем на основе оксидного соединения ванадия. Предлагаемое решение проблемы окисления и горения порошкообразного бора расширяет возможности его использования в ЭКС различного назначения, поскольку позволяет устранить причину неполного сгорания энергоемкого металла [1].

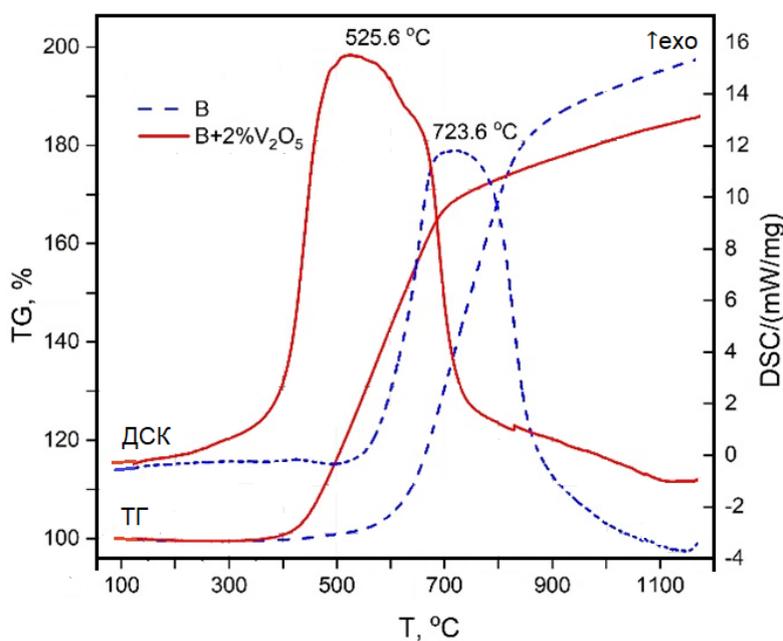


Рис. 1: ТГ и ДСК образцов бора и В+2% V_2O_5 .

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием и планами НИР ИХТТ УрО РАН, тема № АААА-А19-119031890028-0.

Список литературы

1. Пат. РФ № 2784154. Горючее как компонент энергетических конденсированных систем и способ его получения / Шевченко В.Г., Красильников В.Н., Еселевич Д.А., Конюкова А.В. Опубликовано 23.11. 2022. Бюл. № 33.

Калибровка уравнения состояния продуктов взрыва пластифицированного октогена на результатах опытов по разгону лайнеров

*В. Б. Титова, Н. А. Володина, М. О. Ширшова, М. Н. Кирюхина,
Е. Н. Богданов, А. А. Становов*

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

В работе представлены результаты расчетно-экспериментального анализа результатов опытов по исследованию метательной способности пластифицированного октогена в интересах верификации уравнений состояния (УРС) его продуктов взрыва (ПВ). Экспериментально проведена непрерывная регистрации движения лайнеров из алюминия и сплава вольфрам-никель-железо (ВНЖ), метаемых продуктами взрыва пластифицированного состава на основе октогена. Проведена калибровка параметров уравнений состояния продуктов взрыва с опорой на результаты экспериментальных данных для трех форм УРС ПВ. Расчетно-теоретический анализ показал, что применение новых современных экспериментальных методов исследования позволяют проводить более качественную калибровку параметров уравнений состояния продуктов взрыва, а использование различных лайнеров получать данные для различных областей состояния вещества.

Особенности распространения детонации в каналах малого сечения для состава на основе тэна

В. Б. Титова, Н. А. Володина, М. О. Ширшова

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

В настоящее время в целях совершенствования систем инициирования детонации в экспериментальных сборках, содержащих взрывчатые вещества, ведутся работы по исследованию процессов распространения детонационной волны в каналах, снаряженных ВВ на основе тэна (пентаэритриттетранитрата) [1].

В данной работе на основе модельных экспериментов, представленных в [1], исследуются подходы численного моделирования распространения детонационной волны в каналах малого сечения с учетом кинетики детонации МК [2].

Список литературы

1. *Е. В. Халдеев, А. В. Бессонова, Д. А. Пронин, Ю. М. Сустаева, О. В. Шевлягин.* Распространение детонации на углах поворота в каналах малого сечения. ФГВ. – 2018. – Т. 54, № 5. С. 1–6.
2. *В. Г. Морозов, И. И. Карпенко, С. Е. Куратов, С. С. Соколов, Б. Н. Шамраев, Л. В. Дмитриева* Теоретическое обоснование феноменологической модели ударноволновой чувствительности ВВ на основе ТАТБ. Химическая физика. – 1995. – Т. 14, № 2–3.

Численное моделирование работы миллидетонационного устройства «Нивелирующая накладка» в Методике Д на адаптивно-встраиваемых сетках

Ю. А. Шихова, В. Б. Титова, А. П. Осипцов, Р. В. Яковенко

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

В данной работе представлен расчетно-теоретический анализ работы малогабаритного прецизионного инициирующего устройства – нивелирующая накладка [1], предназначенного для нивелирования неконтролируемого положения несимметричного детонатора со смещённым от оси симметрии очагом инициирования детонации при передаче детонации по изогнутому детонационному каналу. Применение изогнутого канала улучшает компоновочные характеристики накладки при размещении детонатора во взрывном устройстве, но приводит к необходимости учета несимметричности детонатора.

Численное моделирование инициирования и распространения детонации проводится по модели кинетики МК [2] с использованием технологии разработанной в рамках Методики Д [3] с использованием адаптивно-встраиваемых сеток [4].

В результате численного моделирования получена характерная картина симметричного распространения стационарной детонационной волны в прилегающей нивелирующей накладке канал. Показано, что обеспечивается стабильность временных характеристик работы за счёт выбранных конструктивных решений.

Список литературы

1. Патент № 2636982 F42C19/00 (2006.01), F42B3/10 (2006.01). Иницирующее устройство. Осипцов А.П. № 2016146231. Оpubл. 29.11.2017. Бюл.№ 34.
2. Морозов В. Г., Карпенко И. И., Куратов С. Е., Соколов С. С., Шамраев Б. Н., Дмитриева Л. В. Теоретическое обоснование феноменологической модели ударноволновой чувствительности ВВ на основе ТАТБ. Химическая физика. – 1995. – Т. 14, № 2–3.
3. Артемьев А. Ю., Башурова М. С., Делов В. И., Дмитриева Л. В., Самигулина Р. З., Сенилова О. В., Чернышев Ю. Д. Пакет прикладных программ Д для решения нестационарных задач газодинамики в переменных Лагранжа и задач механики деформируемого твердого тела на регулярных сетках. III Забабахинские научные чтения. (Тезисы докладов) – 1992. – С. 41–42.
4. Андреевских Л. А., Епшиков И. М., Корепова Н. В., Линник Д. М., Муругова О. О., Титова В. Б., Чернышев Ю. Д. Численное моделирование процесса детонации в трехмерном пространстве на адаптивно-встраиваемой лагранжевой сетке в методике Д. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2015. – № 2. – С. 28–39.

Модель воспламенения ВВ на основе тэна в пакете программ Логос, учитывающая влияние температуры и давления на скорость газофазных химических реакций

А. Ю. Вшивняков, В. А. Глазунов, Н. Н. Жбанова, О. Л. Игнатов, А. А. Кабаев, С. А. Кабаев, Е. О. Ткач

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

В программном модуле Логос Тепло пакета программ Логос [1] реализована модель воспламенения взрывчатого вещества (ВВ) на основе тэна для расчетного определения поведения конструкций с ВВ при нагреве. Процесс терморазложения ВВ описывается с помощью многостадийной кинетики, в которой скорость газофазных химических реакций зависит от температуры и давления.

Выполнено численное моделирование опытов [2] и экспериментов института физики взрыва РФЯЦ–ВНИИЭФ по исследованию воспламенения сборок с ВВ в условиях нагрева. Определены параметры воспламенения: время задержки воспламенения, положение очага воспламенения, поля температуры и концентраций ВВ. Показано, что предложенная модель воспламенения достаточно точно (в пределах погрешности эксперимента) описывает воспламенение ВВ с учетом особенностей сборки.

Список литературы

1. Пакет программ «Логос» [Электронный ресурс]: – режим доступа: <http://logos.vniief.ru/products/logos>.
2. *C. M. Tarver, T. D. Tran and R. E. Whipple. Thermal Decomposition of Pentaerythritol Tetranitrate. Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2003. V. 28, N 4. – P. 189–193.*

Лазерное инициирование низкоплотных смесей тэна с нанодисперсным алюминием импульсами наносекундной длительности

А. Г. Глущенко, М. С. Суров, А. Р. Бакиров, В. И. Сдобнов, А. В. Станкевич, А. Ю. Гармашев, Д. В. Фролов, Д. А. Грибанов, С. М. Долгих, Д. В. Петров

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

Основной проблемой при осуществлении прямого лазерного инициирования индивидуальных ВВ является их высокая прозрачность в области большинства широко распространенных лазерных источников. В связи с этим нетривиальной задачей является сенсбилизация ВВ к лазерному излучению при сохранении чувствительности (а, в идеальном варианте, флегматизации) к прочим инициирующим воздействиям.

Одним из способов повышения чувствительности ВВ к импульсному лазерному излучению является введение в объем ВВ светопоглощающих добавок. В связи с этим актуальной задачей является оптимизация параметров смесового светочувствительного ВВ для минимизации порога его лазерного задействия.

В настоящей работе проведены исследования чувствительности низкоплотных смесей ($\rho \leq 1,1 \text{ г/см}^3$) тэна с нанодисперсным алюминием к импульсному лазерному излучению ($\lambda = 1064 \text{ нм}$) наносекундной длительности. Представлено сравнение смесей, гомогенизированных ультразвуковым воздействием в среде легколетучей жидкости (гексане) и изготовленных сухим смешением в замкнутой электростатической системе. Показана эквивалентность этих технологий изготовления по отношению к чувствительности смеси к импульсному лазерному воздействию. Определены параметры смеси (плотность, количество и размер частиц алюминия), при которых порог лазерного импульсного задействия в ближнем инфракрасном диапазоне минимален.

Зажигание сокристаллов на основе CL-20 лазерным излучением

Е. С. Варламов, В. И. Колесов, Н. А. Костин, Н. В. Юдин

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва

Исследован процесс воспламенения сокристаллизатов на основе мощного бризантного взрывчатого вещества (ВВ) гексанитрогексаазаизовюрцитана (CL-20) непрерывным лазерным излучением с длинами волн 450, 915, 975 нм.

В данной работе исследовались сокристаллизаты CL-20 с октогеном – (2CL-20*HMX) [1, 2], бензотрифуроксаном – (CL-20*ВТФ), диазодинитрофенолом – (CL-20*DDNP), а также сокристаллизат диазодинитрофенола с бензотрифуроксаном – (DDNP*ВТФ). В ходе работы были получены зависимости времени задержки воспламенения прессованных образцов от плотности мощности лазерного излучения.

Образцы исследовались как в чистом виде, так и с добавкой 0,5% внутрикристаллических поглощающих добавок. Показано сильное влияние поглощающих добавок, эффективность которых растет в ряду: наноразмерный оксид меди, nanoалюминий, сажа. Также установлено влияние размера лазерного пятна и его соотношения с критическим диаметром горения [3] сокристаллизатов на характеристики их воспламенения.

Список литературы

1. *Варламов Е. С., Корнеев О. С., Костин Н. А., Колесов В. И., Юдин Н. В.* Воспламенение непрерывным лазерным излучением сокристаллов и составов с внутрикристаллическими включениями оптически чувствительных добавок на основе CL-20. Фотон-экспресс. – Т. 174, № 6. – С. 427.
2. *McBain A. et al.* Laser ignition of CL-20 (hexanitrohexaazaisowurtzitane) cocrystals. *Combustion and Flame.* – 2018. – V. 188, N 6. – P. 104–115.
3. *Вишневский И. Я., Денисюк А. П., Фогельзанг А. Е.* Критические условия горения баллистических порохов. ФГВ. – 1979. – Т. 15, № 1. – С. 12–18.

Лазерное зажигание угля

Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, В. Д. Волков, Я. В. Крафт, З. Р. Исмагилов

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово

Одной из важнейших характеристик каменных углей является минимальная энергия, при которой происходит их воспламенение. Знание этой характеристики необходимо для разработки безопасных методов работы с угольными печами и в угольных шахтах. Удобным инструментом для исследования зажигания углей является использование лазерных импульсов. Поглощение энергии лазерных импульсов вызывает нагрев частиц углей и их воспламенение, т.е. моделирует тепловой нагрев частиц в угольных печах и шахтах. Лазерные методы зажигания частиц углей в настоящее время используются достаточно широко. Короткая длительность лазерных импульсов в сочетании с применением времязадающих методик для регистрации свечения пламен позволяют изучать начальные этапы зажигания угольных частиц и дают новый материал для построения экспериментально обоснованных моделей зажигания.

Использование для зажигания угольных частиц неодимового лазера (1064 нм) с длительностью импульсов 120 мкс позволило выделить три стадии, отличающиеся порогами зажигания и временными интервалами горения угольных частиц ряда метаморфизма от бурого до антрацита. Первая стадия зажигания с наименьшим порогом наблюдается непосредственно во время воздействия лазерного импульса. Она связана с зажиганием реакционно-активных микровыступов на поверхности частиц с размерами ~ 1 мкм. Вторая стадия наблюдается, когда при повышении плотности энергии излучения происходит зажигание всей поверхности частиц и прогрев их объема, где инициируются термохимические реакции, выход и зажигание летучих веществ и углеродных частиц во временном интервале до $3 \div 5$ мс. При дальнейшем повышении плотности энергии наблюдается зажигание поверхности частиц во время импульса, процессы, связанные со второй стадией и, кроме того, во временном диапазоне до $60 \div 100$ мс наблюдается третья стадия, на которой инициируется другой тип термохимических реакций. На этом этапе в пламени наблюдается свечение углеродных частиц.

При использовании лазерного излучения (1064 нм, 532 нм) длительностью 10 нс для зажигания образцов углей от бурого до антрацита определены две стадии зажигания, отличающиеся по кинетическим характеристикам свечения и критическим энергиям излучения. На первой стадии происходит оптический пробой и образование плотной плазмы со сплошным спектром свечения. По мере разрежения плазмы в спектрах регистрируется свечение ионов углерода СII, возбужденных атомов азота N, возбужденных молекул углерода С2, циана CN и окиси углерода СО. Максимум интенсивности свечения плазмы наблюдается по окончании лазерного импульса, время релаксации свечения составляет ~ 1 мкс. Амплитуда свечения плазмы нелинейно возрастает с ростом плотности энергии лазерных импульсов. На второй стадии происходит инициирование термохимических реакций в объеме угольных микрочастиц в субмиллисекундном временном интервале.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20041, и за счет гранта Кемеровской области – Кузбасса (соглашение с №2 от 22.03.2022).

Продукты детонации смесевых взрывчатых составов на основе БТФ

*А. О. Кашкаров¹, Э. Р. Пруэл¹, И. А. Рубцов¹, Н. П. Сатонкина¹,
Н. А. Хлебановский^{1,2}, Е. Ю. Герасимов³*

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

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

³Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

В работе исследовалась возможность влияния на продукты детонации составов на основе бензотрифуроксана (БТФ) взрывчатыми и инертными добавками. Для чистого прессованного БТФ характерно наличие в продуктах детонации шарообразных луковичных структур размерами до одного микрона и наноалмазов с монокристаллической областью до ста нанометров [1]. Задачей исследования было повлиять на морфологию детонационного углерода прессованных зарядов, изготовленных путём смешения исходного БТФ с различными добавками.

Были изготовлены следующие взрывчатые составы: БТФ с гексогеном в равных массовых долях, БТФ с октодекановой кислотой в массовых долях 90% и 10% соответственно. В указанных образцах перемешивание компонент по данным сканирующей электронной микроскопии было на масштабе $1 \div 10$ микрон. Дополнительно был изготовлен состав БТФ с тротилом в равных массовых долях, в котором перемешивание компонент было на близком к молекулярному уровню.

Анализ продуктов детонации с помощью просвечивающей электронной микроскопии показал, что продукты детонации образца БТФ/гексоген представляют собой механическую смесь продуктов детонации индивидуальных взрывчатых компонент. Продукты детонации образца БТФ/октодекановая кислота в целом аналогичны продуктам детонации чистого БТФ, но присутствует и мелкодисперсная фаза углерода. В случае образца БТФ/тротил соответствующих чистому БТФ крупных углеродных структур не наблюдается, характерные размеры частиц в графитовой и алмазной фазах составляют от единиц до десятков нанометров.

Список литературы

1. *Kashkarov A. O., Prueel E. R., Ten K. A. et al.* Transmission electron microscopy and X-ray diffraction studies of the detonation soot of high explosives. JPCS. – 2016. – V. 744, N 1. – P. 012072.

Электропроводность при детонации заряда гексогена с бензотрифуроксаном

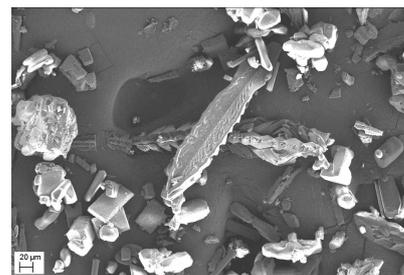
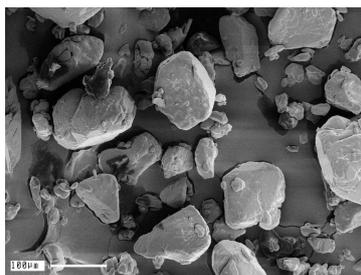
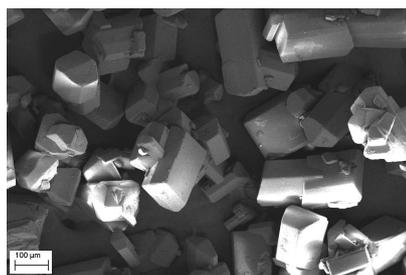
Н. П. Сатонкина^{1,2}, А. П. Ершов¹, А. О. Кашикар¹, А. А. Кузьминых², Н. А. Хлебановский²

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

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

Кинетика химических реакций при детонации конденсированных взрывчатых веществ вызывает постоянный интерес с момента появления понятия «зона реакции» [1]. В настоящее время получило широкое распространение моделирование из первых принципов, в результате которого получено удовлетворительное согласие с экспериментом. При этом, детали моделей разных авторов могут сильно отличаться [2]. Поэтому экспериментальное исследование представляет определенный интерес.

Интересны детали кинетики, которые могут быть получены при исследовании свойств зарядов смесевых ВВ. Ранее в работе [3] проведено исследование смеси из двух взрывчатых веществ с резко отличающимися электрическими характеристиками, получено влияние размера зерна исходных веществ, что указывает на перемешивание в продуктах на границе раздела, причем глубина перемешивания составляет величину около микрона.



В настоящей работе проведено экспериментальное исследование электропроводности при детонации смеси из гексогена и бензотрифуроксана 50/50, смешение производилось на микронном уровне. На рисунке показаны фотографии с микроскопа исходных бензотрифуроксана, гексогена, смеси этих ВВ (слева направо). Обсуждается интерпретация экспериментальных данных.

Список литературы

1. Зельдович Я. Б. К теории распространения детонации в газообразных системах. Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1940. – Т. 10, № 5. – С. 542–568.
2. Rai N. K., Koundinyan S. P., Sen O., Schweigert I. V., Henson B. F., Udaykumar H. S. Evaluation of reaction kinetics models for meso-scale simulations of hotspot initiation and growth in HMX. Combustion and Flame. – 2020. – V. 219. – P. 225–241.
3. Ершов А. П., Сатонкина Н. П., Дибиров О. А., Цыкин С. В., Ячилкин Ю. В. Исследование взаимодействия компонентов гетерогенных взрывчатых веществ методом электропроводности. ФГВ. – 2000. – Т. 36, № 5. – С. 97–108.

Исследование методом ЛГМ влияния способа изготовления заряда тротила на профиль массовой скорости

А. С. Туманик^{1,2}, А. О. Кашикар¹, Н. П. Сатонкина^{1,2}, А. А. Студенников¹

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

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Как известно, чувствительность заряда взрывчатого вещества зависит не только от вида ВВ и его плотности, но и от структуры, которая, в свою очередь, определяется способом изготовления. Прогнозирование характеристик заряда ВВ и его чувствительности является актуальной задачей. Наибольшая зависимость параметров от структуры наблюдается для тротила. Так, критический диаметр литого и прессованного зарядов отличается на порядок. В рамках теории горячих точек этот эффект принято объяснять разным характером неоднородностей, на которых происходит эффективное развитие химической реакции в детонационной волне.

В работе [1] проведено томографическое исследование структуры зарядов литого и прессованного тротила с близкой плотностью. Было показано, что прессованный заряд тротила обладает меньшим характерным размером пор и более однороден в сравнении с литым зарядом. Согласно теории горячих точек, литой заряд тротила должен быть чувствительнее прессованного, что противоречит имеющимся экспериментальным данным по ударно – волновой чувствительности, скорости кинетики химических реакций и данным по критическому диаметру.

Целью настоящей работы было дальнейшее изучение зависимости параметров зарядов тротила от их структуры. Проведен ряд экспериментов по исследованию профиля массовой скорости при детонации зарядов тротила с помощью лазерной гетеродинной методики, использованы две преграды с разными ударно-волновыми импедансами – LiF и ПММА.

Полученные профили массовой скорости и параметры детонации для прессованного тротила имеют хорошее соответствие с результатами работы [2].

Список литературы

1. *N. P. Satonkina, K. E. Kuper, A. P. Ershov, E. R. Prueel, A. S. Yunoshev, Ya. L. Lukyanov, D. V. Gusachenko, A. S. Khorungenko, A. A. Kuzminykh.* Tomographic study of the structure of cast and pressed trotyl charges. Results in Engineering. – 2022. – V. 16. – P. 100621.
2. *Arnaud Sollier, Philippe Hebert, Roland Letremy.* Chemical reaction zone measurements in pressed trinitrotoluene (TNT) and comparison with triaminotrinitrobenzene (TATB), Journal of Applied Physics, – 2022. – V. 131, N 5. – P. 055902.

О переходе ударной волны в детонационную в прессованных зарядах ТАТБ малых и средних диаметров

*А. А. Студенников^{1,2}, И. А. Рубцов^{1,2}, Э. Р. Прууэл², К. А. Тен², А. О. Кашикаров²,
К. М. Просвирнин³, И. Г. Галиуллин³, К. В. Еганов³, А. С. Гремитских³*

¹ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

³Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

В работе приводятся экспериментальные данные об инициировании прессованных зарядов триаминотринитробензола (ТАТБ) диаметрами от 20 до 40 мм. Наличие перехода к детонации определялось по динамике распространения фронта волны и последующей разгрузки. Данные были получены из экспериментов с преградами из полиметилметакрилата (ПММА) различной толщины. Регистрация данных проводилась одновременно синхротронной методикой регистрации быстропротекающих процессов и радиоинтерферометрией. Особенную важность полученных результатов представляет анализ данных независимых методик регистрации процесса инициирования.

Инициирования переходного процесса производилось активным зарядом на основе октогена через инертную преграду в качестве которой использовали ПММА толщиной до 20 мм. Диаметры преград и активного заряда были выбраны такими же, как и исследуемый образец 20 и 40 мм соответственно.

В результате анализа и наложения данных синхротронной и радиоинтерферометрической методик была разрешена область переходного процесса, причем данные об области перехода, полученные двумя независимыми методиками, находятся в хорошем согласии друг с другом. С увеличением толщины преграды данные по определению скорости фронта расходятся. Это может свидетельствовать о динамике кривизны фронта в переходной области инициирования. Анализ экспериментальных данных, позволяет предположить динамическую модель формы фронта в области переходных процессов. Именно различие физических принципов, на которых основаны используемые методы регистрации, делает возможным определение наличия динамики и открывает возможность построения модели течения в области перехода из ударной волны в детонационную.

Распределение плотности на фронте детонации ТАТБ

*К. А. Тен¹, Э. Р. Пруэл¹, А. О. Кашикар¹, И. А. Рубцов^{1,2}, А. А. Студенников^{1,2},
В. П. Халеменчук¹, Б. П. Толочко³, К. М. Просвирнин⁴, А. К. Музыря⁴*

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

²ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

³Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск

⁴Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

Получение экспериментальной информации о зоне химической реакции во взрывчатых веществах (ВВ) сильно затруднено ввиду экстремальности параметров вещества (давление > 30 ГПа, время < 1 мкс). При математическом моделировании химических процессов в этой зоне в настоящее время используются формально-кинетические модели, в которых задаются полуэмпирические зависимости с параметрами. Эти параметры устанавливаются на основе экспериментальных результатов.

Метод синхротронной рентгенографии предоставляет новые возможности для получения экспериментальных данных по ВВ, позволяющих изучать кинетику происходящих процессов. Метод дает возможность, во первых: визуализировать исследуемый процесс; во-вторых получать распределение плотности вещества за фронтом детонационной волны. Таким образом, на детекторе видна динамика характерных зон в ВВ: исходное ВВ; сжатое ударной волной ВВ и зона разлета продуктов взрыва.

Измерение распределения поглощения на фронте детонации проводилось на ускорительном комплексе ВЭПП-4М (ИЯФ СО РАН), который работал в режиме с шестью банчами. Такой режим работы ускорителя позволил уменьшить время между кадрами до 200 нс. Измерение интенсивности СИ проводилось детектором DIMEX-3М с линейным разрешением 100 мкм. В опытах использовались заряды ТАТБ диаметром 40 мм. Кривизна фронта детонации измерялась на фоторегистрограмме (скорость фоторазвертки 3 км/с) и затем интерполировалась кривой четвертого порядка. Идея восстановления распределения плотности состоит в том, что фронт детонации разбивается на слои, ширина которых равна расстоянию между каналами (стрипами) детектора DIMEX-3М. Каждый слой имеет кривизну (форму) четвертого порядка. Если совместить начало падения интенсивности с первым слоем, то на втором стрипе поглощение будет от второго слоя и части первого. На третьем - от третьего слоя и части второго и первого, и так далее.

На восстановленном распределении плотности видна зона повышенной плотности ($\sim 0,5$ мм), зона более плавного изменения плотности (~ 21 мм), за которой следует зона разлета продуктов взрыва.

В докладе приводятся оценки такого метода восстановления профиля плотности. Погрешность методики определяется: погрешностью показаний детектора, ошибкой определения массы в каждом стрипе, неточностью связанной с неопределенностью истинного размера поглощающей области из-за кривизны фронта детонации, погрешности, связанные с неточным положением переднего края детонационного фронта.

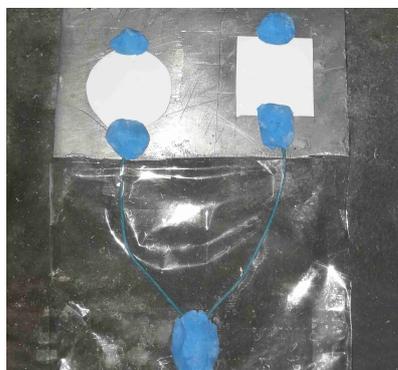
Данные о распределении плотности вещества за фронтом детонационной волны позволят калибровать газодинамические расчеты с использованием различных моделей кинетики взрывчатого превращения, провести уточнение уравнений состояния ВВ, продуктов взрыва и их смесей, и совместно с результатами других методик дадут возможность построения физической модели возбуждения детонации в гетерогенных ВВ.

Экспериментально-расчётный метод определения критического диаметра детонации высокоплотных зарядов ВВ

А. А. Котомин, А. С. Козлов, С. А. Душенок, П. Г. Буковский, Д. В. Бармашова

Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог», Санкт-Петербург

При проведении научных исследований, расчётов и для практических разработок необходимо знание величин критических диаметров детонации ($d_{кр}$) высокоплотных (малопористых) зарядов взрывчатых веществ и композиций. Для взрывчатых материалов, из которых можно легко изготовить высокоплотные удлиненные цилиндрические или шнуровые заряды (литьевые, пластичные, эластичные, жидкие, пластизоли и др. ВВ), экспериментальное определение $d_{кр}$ не вызывает затруднений, но для порошкообразных кристаллических ВВ это достаточно сложно. Известный метод определения $d_{кр}$ ВВ, разбавленного в различной степени инертным полимером, с экстраполяцией на чистое ВВ [1, с. 182] достаточно трудоёмок. Поэтому для таких ВВ определяют критическую толщину детонации плоских зарядов ($h_{кр}$). Однако, корректный пересчет $h_{кр}$ в $d_{кр}$ требует точной величины коэффициента $K = d_{кр}/h_{кр}$, который зависит от условий разгрузки, то есть от постановки опыта. Обычно для оценки принимают $K = 2$, так как время разгрузки из-за распространения волны разрежения в зону химической реакции определяется толщиной плоского и радиусом цилиндрического зарядов ВВ. Для свободных цилиндрических и полуограниченных плоских зарядов предлагается $K \approx 3 \div 4$ [2, с. 313]. Кроме того, необходимо учесть изменение плотности прессованных плоских зарядов, имеющих обычно значительную пористость, до плотности близкой к максимальной.



а) Плоские заряды ВВ



б) Шнуровые заряды ВВ

Рис. 1: Постановка опытов.

Цель данной работы заключалась в разработке способа корректного пересчета $h_{кр}$ пористых зарядов кристаллических ВВ в $d_{кр}$ высокоплотных зарядов. Были получены смеси гексогена, октогена, тэна, тротила, Фох-7 различной дисперсности с инертным полимером – полидиметилсилоксаном СКТ. Из каждой смеси формировались сплошные, практически беспористые плоские (круглые, диаметром 40 мм и квадратные 40x40 мм) заряды различной толщины и шнуровые заряды различного диаметра. Схема испытаний (рис. 1) включает инициирующий, испытуемый и контрольный заряды. Точность определения $h_{кр}$ и $d_{кр}$ составила 0,05 мм. Для коррекции $d_{кр}$ по пористости заряда использована зависимость, установленная ранее [1, с. 207]. В результате исследований получено уравнение для корректного пересчета $h_{кр}$ в $d_{кр}$, подтвержденное по проведенным в данной работе испытаниям различных индивидуальных ВВ.

Список литературы

1. А. А. Котомин, С. А. Душенок, А. С. Козлов. Эмпирические методы расчета взрывчатых веществ и композиций. 3-е издание. – Санкт-Петербург : Лань. – 2022. – 384 с.
2. Физика взрыва. Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, переработанное. – В 2 т. – Т. 1. – М.: Физматлит. – 2004. – 832 с.

Исследование детонационной способности гидразиниевой соли 5-аминотетразола

А. М. Астахов, В. О. Тамашков, Д. В. Антишин, И. В. Чумаков, В. А. Вольф

*Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева,
Красноярск*

Гидразиниевая соль 5-аминотетразола (НАТ) известна с 1952 г. и ранее предлагалась как компонента ракетных топлив. Однако в 2008 г. в ряде зарубежных работ её стали рассматривать как малочувствительное взрывчатое вещество с высокими расчётными детонационными параметрами ($D_{1,55 \text{ г/см}^3} = 9,52 \text{ км/с}$ [1,2], $D_{1,48 \text{ г/см}^3} = 8,79 \text{ км/с}$ [3]). В [4,5] нами было показано, что из-за ошибок, сделанных в работах [1–3], вычисленные детонационные параметры НАТ сильно завышены. Тем не менее, представляется интересным экспериментальное изучение этого бескислородного соединения.

В зарядах $\varnothing 28 \text{ мм}$ и $\rho_0 = 0,80 \text{ г/см}^3$ в массивной стальной оболочке вызвать детонацию НАТ не удаётся даже от мощного промежуточного детонатора (10 г гексогена). Прибавление к НАТ мощного ВВ (тэн), как promotora детонации, позволяет получить устойчивый детонационный процесс. Скорости детонации смесей НАТ с тэном при $\rho_0 = 0,80 \text{ г/см}^3$ и содержании тэна 10, 20 и 40 % составляют 3,46, 4,03 и 4,55 км/с, соответственно. Для состава с содержанием тэна 20 % найдена зависимость скорости детонации от плотности заряда (в диапазоне $\rho_0 = 0,80 \div 1,34 \text{ г/см}^3$). Полученные экспериментальные данные сравниваются с расчётными.

Таким образом, НАТ не только не обладает заявленной высокой скоростью детонации, но и вообще неспособно к самостоятельному взрывчатому превращению, т.е. не является ВВ, по крайней мере, в изученных условиях. В смесях с тэном детонация протекает, но её скорость существенно ниже, чем ожидаемая расчётная. Характер зависимости скорости детонации от содержания тэна, а также зависимости скорости детонации от плотности заряда, свидетельствует о неполноценном разложении НАТ в детонационной волне.

Известные в настоящее время расчётные методы нахождения детонационных параметров не позволяют делать прогноз для подобных ВВ экстремального состава.

Список литературы

1. *Fisher N., Klapötke T. M., Scheutzw S., Stierstorfer J.* Hydrazinium 5-Aminotetrazolate: an Insensitive Energetic Material Containing 83.7% Nitrogen. *Central Eur. J. Energ. Mat.* – 2008. – V. 5, N 3–4. – P. 9219–9228.
2. *Klapötke T. M., Stierstorfer J.* High nitrogen compounds for use in low-erosivity gun propellants. *Proc. 26th Army Science Conference.* Orlando, FL, USA: Department of the Army, 2008.
3. *Tao G.-H., Guo Y., Joo Y.-H., Twamley B., Shreeve J. M.* Energetic nitrogen-rich salts and ionic liquids: 5-aminotetrazole (AT) as a weak acid. *J. Mat. Chem.* – 2008. – V. 18, N 35. – P. 5524–5530.
4. *Астахов А. М., Антишин Д. В.* О детонационных параметрах некоторых бескислородных ВВ. Тез. докладов всероссийской конференции Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения. – 2018. – С. 62–63.
5. *Astachov A. M., Antishin D. V., Tamashkov V. O.* On the calculated detonation parameters of some oxygen-free explosives. *Proc. 22nd Seminar New Trends in Research of Energetic Materials.* Part II. Pardubice. Czech Republic: University of Pardubice, 2019.

Развитие и распространение детонации в ВВ на основе октогена при кольцевом инициировании

А. Г. Глуценко, А. Б. Сырцов, Я. М. Горопашный, А. С. Лобачев, Д. В. Мухин, А. Н. Аверин, Д. А. Грибанов, С. М. Долгих, Д. В. Фролов, А. Ю. Гармашев

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

Проведены экспериментальные исследования развития и распространения детонационно-го процесса при реализации кольцевого инициирования ВВ на основе октогена. В качестве инициатора использовались кольцевые слои из пластичного ВВ на основе тэна различного диаметра. В работе представлены эволюция формы детонационного фронта и профилей давления, полученных при вариации толщин ВВ на основе октогена от 5 до 30 мм. Показано качественное и количественное сравнение названных параметров при различных диаметрах кольцевого инициатора, а также влияние на них дополнительного слоя из пластичного ВВ на основе тэна, расположенного между кольцевым инициатором и исследуемым ВВ на основе октогена.

Особенности построения моделей кинетики тепловыделения энергоемких соединений

П. Н. Столяров, Ю. А. Мисюрин, Д. Г. Перменов

Центральный научно-исследовательский институт химии и механики, Москва

При решении ряда практических задач, таких как тепловая безопасность хранения и эксплуатация изделий, снаряженных энергоемкими конденсированными составами (ЭКС), проведение ускоренных климатических испытаний необходимо знание кинетики разложения образцов ЭКС. Кроме того, такие вопросы, как установление запаса термической стойкости, решаются при наличии уравнений кинетики разложения образцов ЭКС.

Проведено исследование процесса разложения ЭКС (октоген, тэн, гексанитростильбен (ГНС), тетрил, гидрид алюминия, пироксилиновый порошок) при различных плотностях заполнения реакционного объема реакционной ячейки.

Полученные данные свидетельствуют (на примере октогена), что при разложении в статических условиях при небольших плотностях заполнения реакционной ячейки (m/v , m – масса навески, v – внутренний объем герметичной реакционной ячейки) экспериментальные данные удовлетворительно описываются уравнением автокатализа первого порядка. Переход к большим плотностям ($m/v \approx \rho$, ρ – плотность ЭКС) приводит к необходимости использовать модель автокатализа второго порядка. Исследование расчетных кривых в пространстве безразмерная глубина разложения – время от величины кинетических параметров позволяет предложить модель, объединяющую модели автокатализа первого и второго порядков. В условиях линейного нагрева получено, что для удовлетворительного описания экспериментальных данных требуется как минимум трехстадийная модель (кроме начальных и конечных продуктов необходимо учитывать последовательное появление двух промежуточных продуктов).

В литературе для расчета экспериментальных данных по разложению ГНС ниже и выше температуры плавления предлагают две различные модели кинетики разложения. Авторами показано, что с учетом процесса плавления для всех исследованных температурных областей достаточно одной модели кинетики разложения ГНС.

На примере описания экспериментальных данных разложения тэна показано, что не учет физических процессов, таких как плавление, приводит к увеличению значений энергии активации по сравнению с полученными данными на ряде других исследований.

Экспериментальные данные и проведенные расчеты кинетических параметров по экспериментальным данным разложения тетрила интересны тем, что в начале XX века были предложены модели с учетом процесса плавления,

Исследование процесса разложения пироксилиновых порохов интересны тем, что для удовлетворительного описания экспериментальных данных по их разложению приходится учитывать наличие трех областей с различной стойкостью, обусловленных технологией их получения.

Гидрид алюминия, разлагающийся в атмосфере воздуха, требует для удовлетворительного описания экспериментальных данных учета процесса диффузии через образующуюся пленку окисленного алюминия.

Численное моделирование разлёта металлической трубки под действием продуктов детонации

Н. Л. Клиначева, Е. С. Шестаковская, А. П. Яловец

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

Одним из способов изучения свойств взрывчатых веществ (ВВ) является изучение их метательной способности по методике Т-20 (за рубежом «цилиндр-тест»). Экспериментальные данные для скоростей цилиндрической медной оболочки, полученные по методике Т-20, не только характеризуют работоспособность ВВ, но и служат основой для нахождения коэффициентов УРС, описывающих изэнтропии расширяющихся ПВ (например, в форме JWL [1]).

В данной работе представлены результаты численного моделирования разлёта медной трубки под действием продуктов детонации. Для расчёта был разработан программный комплекс, который основан на алгоритме, позволяющем моделировать взаимодействие движущихся различных сред. Движение газового потока описывается системой уравнений механики сплошных сред в эйлеровых переменных. Твёрдое тело рассматривается как упругопластическая среда, в качестве модели пластичности могут использоваться модель Мизеса или модель Прандтля – Рейса [2, 3]. Движение твёрдого тела описывается системой уравнений механики сплошных сред в лагранжевых переменных. Численная реализация проводилась методом [4].

Верификация численного алгоритма проводилась на решении задачи об обтекании ступени [5]. Проведено сравнение результатов расчёта разлёта продуктов детонации с аналитическим решением [6]. Результаты разлёта медной трубки сравнивались с экспериментальными данными [7], получено хорошее согласие. Таким образом, разработанный программный комплекс позволяет моделировать процессы взаимодействия газового потока как с неподвижными, так и с движущимися твёрдыми телами.

Список литературы

1. *Finger M., Lee E., Helm F.H., et al.* The effect of elemental composition on the detonation behavior of explosives. Proc. Sixth Symp.(Intern.) on Detonation, Coronado, California. – ACR-221. – 1976. – P. 710–722.
2. *Prandtl L.* Spannungsverteilung in plastischen korper. Proc. 1st Int. Congr. Appl. Mech. Delft. – 1924. – P. 43
3. *Рейс А.* Учет упругой деформации в теории пластичности. Теория пластичности. М.: Издательство иностранной литературы. – 1948. – 260 с.
4. *Яловец А. П.* Расчет течений среды при воздействии интенсивных потоков заряженных частиц. ПМТФ. – 1997. – Т. 38, № 1. – С. 151–166.
5. The Numerical Simulation of Two-Dimensional Fluid Flow with Strong Shocks. Journal of computational physics. – 1984. – N 54. – P. 115–173.
6. *Бондаренко Ю.А.* Особенности счета детонации на эйлеровых сетках с навязанной скоростью фронта. ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2010. – № 3. С. 38–45.
7. *E. L. Lee, H. C. Horning, J. W. Kury* Adiabatic expansion of high explosive detonation products LLNL, UCRL-50422. – 1968. – 38 p.

Численное моделирование процесса огибания детонационной волной линзы из высокомодульной керамики

И. А. Балаганский, А. В. Виноградов

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

При проектировании кумулятивных и снарядоформирующих зарядов важной задачей для повышения эффективности является формирование формы фронта детонационной волны при ее подходе к кумулятивной облицовке. Как правило, для этого используются так называемые линзы. Линзовый узел преобразует первоначально расходящуюся детонационную волну (ДВ) в сходящуюся с тороидальной формой фронта. Наличие в заряде линзы из инертного материала приводит к повышению скорости метания облицовки [1]. При этом при определенных условиях возможно возникновение нерегулярного отражения детонационной волны от оси симметрии заряда с формированием Маховской волны. Размеры области, сжимаемой Маховской волной, зависят от угла столкновения падающих волн, их амплитуды и сжимаемости среды, в которой происходит взаимодействие волн. Амплитуда Маховской волны всегда выше амплитуды падающей волны.

Если обеспечить формирование Маховской волны в предварительно сжатом, но не детонирующем ВВ, то параметры такой Маховской волны могут быть существенно повышены [2]. Нами было выполнено численное моделирование процесса огибания детонационной волной линзового узла из высокомодульной керамики, скорость звука в которой выше скорости детонации заряда ВВ. Моделирование выполнено с использованием ПО Ansys Autodyn. Для моделирования процесса инициирования и распространения детонации в предварительно сжатом волной без ударного фронта, прошедшей через линзовый узел, использовалось кинетическое соотношение Ли – Тарвера. Для сравнения выполнялось также моделирование поведения заряда ВВ в аналогичных условиях, но с линзой из инертного материала.

Моделирование показало, что процесс образования волны Маха при огибании керамической линзы реализуется в обоих случаях. Физической причиной образования Маховской детонационной волны является распространение сходящейся детонационной волны в заряде ВВ. Для повышения давления в Маховской волне в предварительно сжатом волной без ударного фронта ВВ за керамической линзой необходимо выбрать оптимальные параметры линзового узла, что будет являться предметом дальнейших исследований.

Список литературы

1. Физика взрыва. Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, переработанное. – В 2 т. – Т. 2. – М.: Физматлит. – 2002. – 656 с.
2. *I. A. Balagansky, K. Hokamoto, P. Manikandan, A. D. Matrosov, I. A. Stadnichenko, H. Miyoshi, I. A. Bataev, A. A. Bataev* Mach stem formation in explosion systems, which include high modulus elastic elements. *Journal of Applied Physics*. – 2011. – V. 110. – P. 123516.

Диспергирование пористого кремния, насыщенного окислителем

А. А. Карпова¹, В. М. Фрейман¹, Е. В. Шашков², А. Г. Зегря¹, Н. С. Воробьев²,
Г. Г. Савенков¹, У. М. Побережная¹, М. В. Байдакова¹, А. В. Нащекин¹, Д. А. Кириленко¹,
В. П. Улин¹, Г. Г. Зегря¹

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

²Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва

Впервые способность пористого кремния (ПК) к взрывчатому превращению (ВП) была обнаружена в 1992 году [1]. С этого момента были проведены весьма обширные исследования различных характеристик энергонасыщенных композитов (ЭНК) на основе ПК и окислителя: теплоты ВП, скорости и температуры горения, химической стабильности, чувствительности к иницированию различными воздействиями и т. д. [2].

«Классическим» видом временной зависимости интенсивности излучения световой вспышки, сопровождающей ВП ЭНК на основе ПК, является ее быстрое нарастание до максимального значения, а затем постепенный спад до нуля, прекращающийся после полного окисления продуктов ВП [3, 4]. Однако в 2021 году авторами работы [5] был зарегистрирован новый эффект, сопровождающий ВП ЭНК на основе ПК с перхлоратом бария, – полное исчезновение интенсивности световой вспышки на этапе ее снижения, длящееся десятки микросекунд. Эта особенность временной зависимости регистрируемого оптического сигнала возникает примерно через $0,5 \div 0,6$ мс после достижения интенсивностью световой вспышки своего максимального значения и завершается излучением короткого и мощного электромагнитного импульса. Для объяснения наблюдаемого эффекта авторами работы [5] было предложено усиление излучения световой вспышки за счет многократного рассеяния на продуктах взрывчатого превращения, занимающих случайное пространственное положение в воздушной среде. Как продолжение проведенных исследований [5], в настоящей работе представлены результаты экспериментов по регистрации временной зависимости интенсивности световой вспышки, сопровождающей ВП ЭНК на основе ПК и перхлората бария, дополненные характеристикой продуктов ВП методами рамановского рассеяния, рентгеноструктурного анализа, а также сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии.

Список литературы

1. McCord P., Yau S.-L., Bard A. J. Chemiluminescence of anodized and etched silicon: Evidence for a luminescent siloxene-like layer on porous silicon. *Science*. – 1992. – V. 257. – P. 68–69.
2. Handbook of porous silicon – L. Canham (ed.). Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, part of Springer Nature. – 2018.
3. Kovalev D., Timoshenko V. Yu., Künzner N., Gross E., Koch F. Strong explosive interaction of hydrogenated porous silicon with oxygen at cryogenic temperatures. *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – V. 87. – P. 068301.
4. Plummer A., Cao H., Dawson R., Lowe R., Shapter J., Voelcker N. H. The influence of pore size and oxidizing agent on the energetic properties of porous silicon. *Proc. of SPIE: Smart Materials, Nano- and Micro-Smart Systems V*, Melbourne. – 2008. – V. 7267. – P. 72670.
5. Зегря Г. Г., Шашков Е. В., Карпова А. А., Воробьев Н. С., Фрейман В. М., Зегря А. Г., Соломонов Ю. С. Лазерный эффект при взрыве пористого кремния. *Письма в ЖЭТФ*. – 2021. – Т. 114, № 4 – С. 263–268.

Оптимизация взрывчатых составов на основе перхлората тетраметиламмония

В. И. Колесов¹, Е. С. Манахова¹, А. С. Губин², М. Н. Терещенко², П. С. Чернавкин²

¹Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва

²Научно-исследовательский машиностроительный институт им. В. В. Бахирева, Москва

Существует необходимость в поиске новых перспективных энергосодержащих материалов (ЭМ) и их композиций в виде взрывчатых составов (ВС), которые могут продемонстрировать заметные преимущества по сравнению со штатными ВС. Повышение эффективности ВС возможно с помощью компонентов, содержащих в продуктах взрыва (ПВ) большое количество водорода, так как это снижает среднюю молекулярную массу газообразных ПВ и увеличивает скорость их истечения. Водород в продуктах взрыва также способен существенно увеличивать фугасное действие при расширении ПВ за счет его догорания в воздухе. ЭМ с большим количеством водорода интересны также в качестве компонентов порохов и твердых ракетных топлив (ТРТ), а также как источники водорода для топливных элементов специального применения.

Таковыми ЭМ с высоким содержанием водорода можно считать соли тетраметиламмония, в частности перхлорат (ТМАП). Однако его взрывчатые характеристики и поведение в смесях с другими компонентами изучены недостаточно.

Цель данной работы – изучение некоторых взрывчатых характеристик ВС на основе ТМАП. В процессе работы проведен термодинамический расчет характеристик ВС с ТМАП, оценена чувствительность ВС по копровой пробе, определена теплота взрыва ВС в калориметре с измерением объема и анализом состава газообразных ПВ ВС.

В результате показана возможность создания ВС с ТМАП, имеющих детонационную способностью и механическую чувствительность в диапазоне ТНТ – гексоген, с теплотой взрыва более 6 МДж/кг, содержание водорода в ПВ превышает 50% по объему.

Список литературы

1. *A. E. Fogelzang at al.* Combustion of Explosives, Data base «FLAME».
2. ICT Database of Thermochemical Values, Version 7.0. 2004
3. *S. R. Jain, K. C. Adiga* Thermochemistry and Lower Combustion Limit of Ammonium Perchlorate in Presence of Methylammonium Perchlorates. Combustion and Flame. – 1981. – V. 40 – P. 113–120.
4. *В. А. Коробан, В. П. Гук, Т. И. Смирнова, Б. С. Светлов* О влиянии заместителей в катионе на распад перхлоратов аммониевых оснований. Труды / Московский химико-технологический институт им. Д.И. Менделеева. Химическая физика конденсированных взрывчатых систем [Текст]: [Сб. статей]. – М.: МХТИ. – 1979. – Вып. 104. С. 44–51.
5. *А. Е. Фогельзанг, Б. С. Светлов, В. С. Опрышко, В. Я. Аджемьян* Исследование горения органических перхлоратов. ФГВ. – 1972. – № 2 – С. 257–272.
6. *B. N. Kondrikov, A. I. Sumin* Equation of state for gases at high pressure. Combust. Explos. Shock Waves. – 1987. – V. 23 – P. 105–113.

Заряды ВВ пониженной плотности: особенности возбуждения и распространения детонации

А. И. Левшенков

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва

Детонационная способность ЭМ является важной характеристикой как надёжности срабатывания зарядов, так и безопасности обращения с ЭМ. Смеси горючее/окислитель, а также индивидуальные ВВ пониженной мощности имеют оптимальные детонационные характеристики – минимальный критический диаметр и инициирующий импульс, а в ряде случаев – максимальную скорость детонации в области плотностей близкой или менее 1 г/см^3 . При производстве, хранении и перевозке ВВ находятся в насыпном состоянии и имеют пониженную плотность и повышенную детонационную способность. В литературе представленные сведения о детонационной способности бризантных ВВ пониженной плотности не систематизированы и редко касаются наиболее часто используемых ВВ.

В работе выбраны направления исследований детонационной способности ВВ пониженной плотности. Предложена альтернативная методика определения минимальных инициирующих зарядов. Показано, что минимальный инициирующий заряд по бризантным ВВ пониженной плотности существенно ниже, чем по прессованным ВВ. Определены скорости детонации низкоплотных зарядов из жидких ВВ со стеклосферой. Показано влияние эксплозифорной группы на реализацию детонационных параметров. Показано, что литые заряды инициирующего ВВ триацетонтрипероксида имеют пониженные взрывчатые характеристики по сравнению с прессованными. Показана возможность инициирования низкоплотных зарядов ВВ пиротехническими средствами без применения инициирующих ВВ.

Список литературы

1. *Хмельницкий Л. И.* Справочник по взрывчатым веществам (часть 2). – Москва. – 1961. – 842 с.
2. *Беляев А. Ф.* Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. – М: Наука. – 1968. – 255 с.
3. *Андреев К. К., Беляев А. Ф.* Теория взрывчатых веществ. Москва. – 1960. – 595 с.
4. *Шарнин Г. П., Фалыхов И. Ф.* Введение в технологию энергонасыщенных материалов. Казань. – 2005. – 392 с.
5. *Багал Л. И.* Химия и технология ИВВ. – М.: Машиностроение. – 1975. – 456 с.
6. *Левшенкова Л. Е., Левшенков А. И., Стовбур К. Н.* Экспериментальное исследование детонационной способности смесей жидких веществ со стеклосферой. Успехи в химии и химической технологии. – 2014. – Т. 28, № 2. – С. 75–79.
7. *Сумин А. И., Кондриков Б. Н.* Методические указания по использованию программного комплекса «Shock and detonation» для расчета ударноволновых и детонационных параметров конденсированных веществ. РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва. – 1994.
8. *Козак Г. Д., Кондриков Б. Н.* Особенности детонации нитробензола и пропаргилового спирта. ФГВ. – 1999. – Т. 35, № 1. – С. 89–97.

9. *F. Dubnikova, R. Kosloff, J. Almog, Yehuda Zeiri, R. Boese, H. Itzhnatky, A. Alt, Ehud Keinan* Decomposition of Triacetone Triperoxide Is an Entropic Explosion. *J. Am. Chem. Soc.* – 2005. – V. 127. – P. 1146–1159.
10. *А. Е. Фогельзанг, В. Ю. Егоршев, А. Ю. Пименов, В. П. Синдицкий, А. Р. Саклантйй, Б. С. Светлов* Исследование стационарного горения инициирующих взрывчатых веществ при высоких давлениях. *Докл. АН СССР.* – 1985. – Т. 282, № 6. – С. 1449–1452.

Уравнения состояния для построения ударных адиабат энергетических материалов на основе экспериментальных данных по изотермическому сжатию

М. А. Бирюкова¹, Д. В. Петров¹, Ю. М. Ковалев², Е. Б. Смирнов^{1,2}, М. А. Шестаков²

¹*Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забахина, Снежинск*

²*Южно-Уральский государственный университет, Челябинск*

Процессы, протекающие при действии ударных волн на энергетические материалы, представляют большой, как практический, так и теоретический интерес и являются объектом многочисленных исследований [1]. В данных исследованиях, с одной стороны, является проблема описания ударно-волнового разогрева энергетического материала, с другой стороны, проблема построения уравнения состояния кристаллического энергетического материала, которое может быть использовано в математических моделях многокомпонентных и многофазных средах. Для взрывчатых веществ (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, например в работе [2]. В данной работе, в отличие от работ [2, 3], был предложен алгоритм построения ударных адиабат ТАТБ и тэна на основании экспериментальных данных по их изотермическому сжатию [4, 5] в рамках более сложного уравнения состояния [6].

Для тестирования алгоритма пересчета экспериментальных данных по изотермическому сжатию на ударные адиабаты был выбран тэн. Выбор тэна для проведения тестового анализа экспериментальных и теоретических ударных адиабат связан с тем, что только для кристаллического тэна в литературе представлена экспериментальная ударная адиабата [7]. В результате было показано, что давления ударного сжатия, полученные на основании экспериментальных данных для кристаллического тэна [7] и построенных уравнений состояния, совпадают в пределах диапазона погрешности определения степени сжатия [5]. Следовательно, уравнения состояния могут быть применены для определения ударных адиабат кристаллических ВВ.

Список литературы

1. *Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортков В. Е.* Ударно-волновые явления в конденсированных средах. – М.: Янус-К, – 1966. – 408 с.
2. *Олинджер Б., Кейди Г.* Ударная сжимаемость ТЭНА, ТАТБ, СО₂ и Н₂О при давлениях до 10 ГПа, рассчитанная на основании экспериментальных данных по гидростатическому сжатию. Детонация и взрывчатые вещества. – М.: Мир. – 1981. – 203 с.
3. *Бирюкова М. А., Петров Д. В., Ковалев Ю. М., Смирнов Е. Б.* Построение ударных адиабат энергетических материалов на основе экспериментальных данных по изотермическому сжатию. В книге: Тезисы XVI Всероссийского симпозиума по горению и взрыву. Тезисы докладов. Черноголовка. – 2022. – С. 113–114.

4. *Stevens L. L., Velisavljevic N., Hooks D. E., Dattelbaum D. M.* Hydrostatic Compression Curve for Triamino - Trinitrobenzene Determined to 13.0 GPa with Powder X- Ray Diffraction. *Propellants, Explos. Pyrotech.* – 2008. – V. 33, N 4. – P. 286–295.
5. *Olinger B., Halleck P.M., Cady H.H.* The isothermal linear and volume compression of pentaerythritol tetranitrate (PETN) to 10 GPa (100 kbar) and the calculated shock compression. *J. Chem. Phys.* – 1975. – V. 62, N 11. – P. 4480–4483.
6. *Ковалев Ю.М.* Уравнения состояния для описания изотермического сжатия некоторых молекулярных кристаллов нитросоединений. *ИФЖ.* – 2020. – Т. 93, № 1. – С. 229–239.
7. *Marsh S. P.* *LASL Shock Hugoniot Data.* Los Angeles: University of California Press. – 1980. – 658 p.

Исследование функциональных характеристик энергонасыщенного материала предназначенного для газодинамического разрыва нефтяного пласта

А. А. Лачугин, А. С. Петров, А. А. Можеев, А. А. Марсов

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань

В ходе исследований выполнены расчет термодинамических характеристик продуктов сгорания энергонасыщенных материалов на основе коллоксилина. Удельное газообразование приблизительно одинаков для всех составов в пределах $1100 \div 1200$ л/кг. Определена чувствительность к удару, который составил 36%, что позволяет изготавливать заряды методом пресования. Изучили характеристики горения энергонасыщенных материалов на основе коллоксилина в условиях, имитирующих нефтяную скважину. Выявили среднюю скорость горения экспериментальных образцов в различных диапазонах давлений. Наиболее близким к промышленным образцам зарядов по скорости горения является состав коллоксилин/олеиновая кислота в соотношении 85/15, помещенные в герметичный корпус (33,4 мм/с в диапазоне давлений $0,8 \div 8,2$ МПа).

Состав продуктов газовой фазы, механизм и кинетика термического разложения перхлората аммония и пентаэритриттетранитрата

А. В. Станкевич, А. Х. Рудина, А. В. Соболевская, И. В. Чемагина

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

Состав продуктов реакций, механизм и кинетика медленного термического разложения является важной информацией при решении ряда технических задач: определение термодинамических свойств рабочего газа для энергетических и реакционных материалов (РМ), синтез новых веществ и материалов, оценка гарантийных сроков хранения.

При исследовании состава продуктов термического разложения веществ (РМ, полимеров, лекарственных препаратов, строительных смесей и наполнителей) активно применяются методы совмещенного термического анализа с одновременной регистрацией спектров поглощения в ИК диапазоне, а также масс-спектров с хроматографированием. Кроме того, известны и другие методы анализа состава продуктов газовой фазы, образующейся в результате химических реакций [1–4].

В настоящей работе приведен анализ свойств газовой фазы, образованной в результате медленного термического разложения перхлората аммония (ПХА) и пентаэритриттетранитрата (тэна). Установлена последовательность химических реакций и предполагаемая энергия активации процесса образования для каждой, определенной компоненты.

Список литературы

1. *Zhu Y.-L., Huang H., Ren H., Jiao Q.-J.* Kinetics of Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate by Tg/Dsc-MS-Ftir. *J. Energetic Mater.* – 2014. – V. 32. – P. 16–26.
2. *Mallick L., Kumar S., Chowdhury A.* Thermal decomposition of ammonium perchlorate—A TGA–FTIR–MS study: Part II. *Thermochimica Acta.* – 2017. – V. 653. – P. 83–96.
3. *Politzer P., Lane P.* Energetics of Ammonium Perchlorate Decomposition Steps. *J. Mol. Struct. Theochem.* – 1998. – V. 454. – P. 229–235.
4. *Brian D Roos, Thomas B Brill* Thermal decomposition of energetic materials 82. Correlations of gaseous products with the composition of aliphatic nitrate esters. *Combustion and Flame.* – 2002. – V. 128, N 1-2. – P. 181–190.

Синтез и термическая стабильность некоторых полиазотсодержащих производных [1,2,4]триазоло[4,3-*b*][1,2,4,5]тетразина

С. Г. Толщина¹, А. В. Коротина¹, Р. И. Ишметова¹, А. В. Станкевич^{1,2}, И. В. Чемагина²,
Г. Л. Русинов¹, В. Н. Чарушин¹

¹Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург

²Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

Производные [1,2,4]триазоло[4,3-*b*][1,2,4,5]тетразина (ТТА) некоторое время рассматриваются как перспективные энергетические материалы, и в будущем могут найти применение в различных областях при использовании энергии, образованной в результате химических превращений самоподдерживающегося разложения, например в авиа и автотранспорте [1–3]. Для понимания безопасности при реализации энергетического потенциала данного класса соединений необходимо учитывать их термическую стабильность, термодинамические свойства и кинетику процессов разложения.

В настоящей работе синтезированы одиннадцать полиазотсодержащих гетероциклических производных ТТА и проведены исследования их термической стабильности. Стоит отметить, что в исследуемом ряду соединений некоторые молекулы служат исходными для синтеза высокоэнергетических материалов, имеющих приемлемые характеристики по безопасности на уровне тринитротолуола и мощности на уровне гексогена. Например, 3,6-диамино[1,2,4]триазоло[4,3-*b*][1,2,4,5]тетразин, термически стабилен до 350 °С, а (3-амино[1,2,4]триазоло[4,3-*b*][1,2,4,5]тетразин-6-ил)гуанидин, стабилен до 320 °С. Полученные соединения имеют высокие показатели плотности от 1,56 до 1,91 г/см³, и оценочные взрывчато-энергетические характеристики, анализ которых выполнен методами классической термодинамики и гидродинамики.

Таким образом, получены и исследованы некоторые новые энергетические полиазотсодержащие соединения, которые могут быть использованы в качестве высокоэнергетических веществ, а также в качестве исходных компонентов для их синтеза.

Данное исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение с Институтом органической химии им. Зелинского РАН № 075-15-2020-803, 01.10.2020).

Список литературы

1. Luo Y., Zheng W., Wang X., Shen F. Nitrification Progress of Nitrogen-Rich Heterocyclic Energetic Compounds: A Review. *Molecules*. – 2022. – V. 27, N 5. – P. 1465.
2. Herweyer D., Brusso J. L., Murugesu M. Modern trends in «Green» primary energetic materials. *New Journal of Chemistry*. – 2021. – V. 45, N 23. – P. 10150–10159.
3. Pagoria P. F., Lee G. S., Mitchell A. R., Schmidt R. D. A review of energetic materials synthesis. *Thermochimica acta*. – 2002. – V. 384, N 1-2. – P. 187–204.

Численное моделирование газодинамических процессов в коаксиально-слоистых комбинированных изделиях из различных типов энергетических материалов

А. В. Станкевич, Д. В. Петров

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

Численное моделирование газодинамических процессов в изделиях сложной геометрии, состоящих из различных материалов, позволяет составлять простые инженерные схемы для дальнейшего анализа функциональных показателей систем и газодинамических процессов. Например, при создании нагружающих устройств в физике высоких плотностей энергии, анализе активности частиц и компонентов химических процессов при высоких давлениях и температурах близких к $1 \div 1,5$ эВ. Для выполнения таких численных экспериментов необходим набор уравнений состояния, кинетики реагирующих компонентов, упруго-пластики каждого материала, входящего в систему [1, 2].

В данной работе рассмотрена системная задача изучения процессов газовой динамики при взрывном течении, образованном продуктами превращения химически реагирующих смесей, расположенных в различных частях слоистых цилиндрических образцов: коаксиальные и планальные слои. Исследование проводилось расчётными методами конечных элементов по сеткам Вороного – Делоне в постановках Эйлера и Лагранжа. Динамическая коррекция сеток выполнялась по дискретным алгоритмам эрозии. Уравнения для моделирования процессов были взяты из известной литературы и баз данных, а также построены на основе маломасштабных экспериментов физической-химии. С учетом химической кинетики показан характер течения при формировании тройных (маховских) отражений в различных частях брикетов из энергетических материалов.

В результате моделирования составлены простые инженерные схемы для расчёта геометрии коаксиально-слоистых изделий из ВВ различного типа.

Список литературы

1. *Mader C. L.* Numerical Modeling of explosives and propellants. NW.: Taylor& Francis. – 2008. – 544 p.
2. *Фундаментальные проблемы моделирования турбулентных и двухфазных течений. Т.2: Численное моделирование.* – М.: Наука. – 2010. – 366 с.

Химическая совместимость и механизм взаимодействия компонентов смесей светочувствительных ВВ на основе тэна при термическом воздействии

А. В. Станкевич, А. Р. Бакиров, И. В. Чемагина

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

Оценка химической совместимости компонентов смесевых энергетических веществ является необходимым знанием при ответе на вопросы безопасности веществ. При этом, основной упор делают на термическую стойкость и характер изменения протекания химических реакций: константы скорости реакций, энергия активации и интенсивность процесса. Светочувствительные материалы [1, 2], как правило, создаются на базе высокоэнергетического вещества с добавками, поглощающими и преобразующими энергию электромагнитного излучения. Однако, в большинстве случаев такие добавки являются не только оптическими, но и термическими, механическими сенсibilизаторами для энергетического материала, что сильно увеличивает чувствительность к внешним воздействиям.

В данной работе химическая совместимость оценивалась методами термического, спектрального и дифракционного анализа композиций светочувствительных ВВ на основе пентаэритриттетранитрата. В качестве добавок адсорбентов ЭМИ использовались углеродные нанотрубки, нанодисперсные металлы: алюминий, медь, никель, титан, а также оксиды молибдена и меди. Механизмы взаимодействия компонентов определялись изоконверсионными методами с параллельными масс-спектрометрическими измерениями.

В результате исследований показан характер увеличения скорости протекания разложения энергетических материалов при термическом воздействии и общее снижение термостойкости. С учётом известных законов теплопроводности [3], построены дифференциальные уравнения кинетики протекания химических реакций термического разложения светочувствительных энергетических материалов. На основе построенных уравнений проведена оценка вклада сенсibilизаторов в направления протекания химических реакций и их роль в химических процессах.

Список литературы

1. *Зайцев Б. Н.* Лазерное взрывание материалов. – М.: «Onebook.ru». – 2014.
2. *Таржанов В. И., Сдобнов В. И., Зинченко А. Д., Погребов А. И.* Лазерное инициирование низкоплотных смесей тэна с металлическими добавками. ФГВ. – 2017. – Т. 53, № 2. – С. 118–125.
3. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика, Т. VII. Теория упругости: Учеб. пособ. Издание 4-е. испр. и доп. – М.: Наука. – 1987. – 248 с.

Фотолиз сверхчистого триаминотринитробензола в условиях низкоэнергетического облучения ультрафиолетом

А. В. Станкевич¹, М. С. Стрельцова¹, А. Х. Рудина¹, Б. П. Толочко²

¹Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забахина, Снежинск

²Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск

Многие органические материалы: молекулярные кристаллы, аморфно-кристаллические полимеры и гели при воздействии на них электромагнитного излучения претерпевают структурные и химические изменения, связанные с преобразованиями в молекулярном строении и межмолекулярных связях. Триаминотринитробензол (ТАТБ) является термостойким молекулярным кристаллом, в сверхчистом состоянии разлагается при высоких температурах > 350 °С, однако, при воздействии электромагнитного излучения меняет молекулярное строение [1–8], преимущественно с формированием фуразановых колец. В отличие от объёмного облучения [8], в случае низкоэнергетического воздействия [1–7] изменения происходят на поверхности и в толщинах не более $3 \div 17$ нм.

В данной работе рассмотрен механизм и проведены оценки кинетики фотохимических изменений в сверхчистом ТАТБ, получены значения энергии активации в зависимости от доли прореагировавшего продукта. Установлен цепной диффузионный механизм реакций фотолиза в ТАТБ. Облучение проводилось низкоэнергетическими фотонами $3,1 \div 3,3$ эВ, а общая поглощённая доза излучения составила 200 Грей. Для анализа структурно-химических изменений использовались методы рентгеновской дифракции и рассеяния, КР спектроскопии, диффузного отражения в БИК-УФ областях, ВЭЖХ и масс-спектрометрии.

Список литературы

1. *Sharma J., Hoffsommer J. C., Glover D. J., Coffey C. S., Santiago F., Stolovy A., Yasuda S.* Comparative study of molecular fragmentation in sub-initiated TATB caused by impact, UV, heat and electron beams. *Shock Waves in Condensed Matter*. Elsevier. – 1983. – P. 543–546.
2. *Firsich D. W., Guse M. P.* On the photochemical phenomenon in TATB. *J. Energ. Mater.* – 1984. – V. 2. – P. 205–214.
3. *Manaa M. R., Schmidt R. D., Overturf G. E., Watkins B. E., Fried L. E., Kolb J. R.* Towards unraveling the photochemistry of TATB. *Thermochim. Acta.* – 2002. – V. 384. – P. 85–90.
4. *Williams D. L., Timmons J. C., Woodyard J. D., Rainwater K. A., Lightfoot J. M., Richardson B. R., Burgess C. E., Heh J. L.* UV-induced degradation rates of 1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene (TATB). *J. Phys. Chem. A.* – 2003. – V. 107. – P. 9491–9494.
5. *Xiong Y., Liu J., Zhong F., Xu T., Cheng K.* Identification of the free radical produced in the photolysis of 1, 3, 5-triamino-2, 4, 6-trinitrobenzene (TATB). *J. Phys. Chem. A.* – 2014. – V. 118, N 34. – P. 6858–6863.
6. *Tian X., Wang X., Yu K., Sun J., Xiao D.* A new insight to the color change phenomenon of TATB: Structural color. *Propellants Explos. Pyrotech.* – 2017. – V. 42. – P. 1247–1251.

7. *Halasz A., Hawari J., Perreault N. N.* Photolysis of the Insensitive Explosive 1, 3, 5-Triamino-2, 4, 6-trinitrobenzene (TATB). *Molecules*. – 2021. – V. 27, N 1. – P. 214.
8. *Толочко Б. П., Михайленко М. А., Герасимов К. Б., Брызгин А. А., Гармашев А. Ю., Смирнов Е. Б., Станкевич А. В., Чемагина И. В.* Изменение константы скорости термического разложения ТАТБ после облучения релятивистскими электронами. Забабахинские научные чтения. – 2021. – С. 77.

Вопросы устойчивости продуктов быстропротекающих реакций фторирования бора, кремния и углерода

А. В. Станкевич

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

Химические реакции фторирования бора, кремния и углерода используются в различных областях науки и техники, например, при травлении кремниевых подложек сильными кислотами Льюиса или генерации импульсов лазерного излучения. Фундаментальные свойства бора – сильного восстановителя и фтора, – сильнейшего окислителя, определяют кинетику их взаимодействия, и характеризует реакции, как быстропротекающие [1]. Химия быстропротекающих процессов играет определяющую роль в фундаментальных вопросах изучения механизмов химических реакций в условиях высокого давления и температуры. Химическая активность компонентов реакций, а также их устойчивость, оценивается по термодинамическим потенциалам, полученным при решении задач классической термодинамики, молекулярной динамики и квантовой химии.

В данной работе рассмотрены вопросы устойчивости продуктов взаимодействия фтора с углеродом, кремнием и бором в условиях воздушной атмосферы, в вакууме и аргоне. Оценка устойчивости выполнялась методами классической термодинамики [2] на основе известных баз данных свойств продуктов реакций [3,4]. В результате были получены изотермы и изобары процессов взаимодействия исследуемых компонентов, состав продуктов реакций при различных давлениях и температурах, проведена оценка предельных скоростей звука в продуктах реакций и теплота реакций. Построены диаграммы Гиббса-Розебома для двухкомпонентных смесей. При анализе диаграмм выявлены наиболее устойчивые оксифториды и фториды бора, кремния и углерода.

Список литературы

1. *Сарнер С.* Химия ракетных топлив. – М.: Мир. – 1969. – 488 с.
2. *Синярев Г. Б.* Полные термодинамические функции и использование их при расчете равновесных состояний сложных термодинамических систем. Изв.вузов, Трансп. и энергетич. машиностр. – 1966. – №2.
3. NIST-JANAF Thermochemical Tables 2 (Journal of Physical and Chemical Reference Data Monographs).
4. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Справочник в 5 т., т.1 / Под ред. В.П. Глушко. – М.: ВИНТИ АН СССР. – 1971. – 265 с.

Секция 4

Динамические течения с химическими реакциями

Диффузионное горение в невесомости: результаты космических экспериментов «Зарево» и «Адамант»

С. М. Фролов

*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова РАН,
Москва*

Пожары считаются одними из самых опасных аварий на пилотируемых космических кораблях. На Международной космической станции (МКС) реализовано несколько программ экспериментов по диффузионному горению веществ в разном агрегатном состоянии в условиях микрогравитации. В недавних российско-американских экспериментах (2016–2021 гг.) с горением одиночных капель индивидуальных углеводородов (н-додекан, космический эксперимент «Зарево») и с горением газообразного этилена на пористой сфере (космический эксперимент «Адамант») обнаружен ряд новых явлений, таких как радиационное погасание диффузионного пламени и повторные вспышки самовозгорания, не наблюдаемых в условиях земной гравитации. В ФИЦ ХФ РАН разработаны модели диффузионного горения капель и газов, учитывающие детальную кинетику химических реакций в сочетании с процессами тепловыделения, теплопереноса, конвекции, сажеобразования и излучения. Модели основаны на нестационарных многомерных дифференциальных уравнениях сохранения массы и энергии в жидкой и газовой фазах с переменными теплофизическими свойствами в рамках концепции многокомпонентной диффузии в газовой фазе. Расчетные исследования горения капель н-додекана в воздухе и сферического пламени этилена на пористой сфере показали возможность радиационного погасания пламени, вызванного излучением продуктов реакции – в основном CO_2 , H_2O и сажи. В отличие от условий земной гравитации в условиях микрогравитации вокруг капли и пористой сферы образуется рыхлая сажевая оболочка, которая блокирует тепловой поток от пламени к капле и способствует погасанию пламени. Параметрические расчеты позволили определить условия сажеобразования в диффузионном пламени этилена: сажа образуется в области, где местные значения температуры газа и атомарного отношения C/O находятся в интервалах $1300 \div 1500$ К и $0,32 \div 0,44$. Для полного исключения сажеобразования необходимо обеспечить невыполнение одного из этих условий, что достигается тщательной организацией смесеобразования и горения. Причины повторных вспышек самовозгорания, наблюдаемых после радиационного погасания пламени – существование нескольких каналов самоускорения химических превращений для углеводородных горючих, проявляющихся при разных температурах и составах смеси. При погасании горячего пламени с уменьшением температуры промежуточных продуктов реакции в горючем газе могут накапливаться гидропероксиды, которые при достижении некоторой критической концентрации приводят к вспышкам «холодного» и/или «голубого» пламени. За этими вспышками может последовать повторная вспышка горячего пламени. Чтобы исключить подобные явления, необходимо принимать определенные меры, например, специальную организацию вентиляции помещений на космическом корабле. Надо иметь в виду, что наличие конвективных течений при вентиляции может, с одной стороны, исключить повторное возгорание после погасания пламени, а с другой – привести к эскалации пожара. Возможную эволюцию очагов возгорания можно проследить, используя имеющиеся в ФИЦ ХФ РАН вычислительные технологии.

Горючие смеси без «углеродного следа»

А. А. Васильев^{1,2}, В. А. Васильев¹¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Проанализированы газовые горючие смеси и монотоплива, состоящие только из атомов водорода и кислорода – водород/кислород, перекись водорода, озон. Особое внимание обращено на системы, в составе которых присутствует азот (воздух, закись азота, гидразин, аммиак, азоимид, ...). Отсутствие углеродных атомов в исходной системе обеспечивает не только отсутствие чистого углерода (сажи) и углеводородов в продуктах реакции, но и токсичного СО и парникового СО₂. Безуглеродными, но с токсичными продуктами горения, взрыва и детонации являются системы с хлором, силаном,

С точки зрения взрывобезопасности наиболее важны данные о критической энергии инициирования, позволяющие анализировать относительную опасность различных смесей. Критические энергии E^* определяются как минимальные энергии инициатора, обеспечивающего в исследуемой смеси распространение волн горения и детонации: чем меньше E^* , тем более опасна смесь.

В докладе обсужден ряд безуглеродных систем, используемых в практических приложениях. Представлены данные о параметрах горения, взрыва и детонации подобных систем в диапазоне от нижнего до верхнего концентрационных пределов, при разбавлении парами воды, инертными газами Ar или Ne. За стандартное состояние выбраны $P_0 = 10^5$ Па и $T_0 = 298$ К, рассмотрены также системы при изменении начальных давления и температуры. Определены практически все наиболее интересные и важные параметры горения, взрыва и детонации: скорость ДВ, давление, температура, плотность, массовая и звуковая скорости продуктов, их равновесный состав, параметры зоны индукции, размер ячейки, критические энергии инициирования ДВ для плоского, цилиндрического и сферического случаев симметрии, критические параметры дифракционного реинициирования, параметры быстролетающего тела, геометрические пределы распространения ДВ в каналах произвольного сечения и т.д.

Горючая смесь Н₂/О₂ является образцом экологической системы с идеализированной реакцией $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ и водой как экологическим продуктом при стехиометрическом соотношении между молекулами водорода и кислорода. При учете химического равновесия вода вблизи концентрационных пределов совместно с избыточным компонентом являются единственными продуктами реакции. Отличительной особенностью Н₂/О₂ системы являются скорость детонации D_0 и удельное энергосодержание Q , достигающие своих максимальных значений $D_0 = 3800$ м/с и $Q = 2255$ кал/г при мольных концентрациях $c(\text{H}_2) = 0,9$ и $c(\text{H}_2) = 0,85$ соответственно. Кроме этого, при любых концентрациях молекулярная масса продуктов всегда больше, чем у исходной смеси $\mu > \mu_0$.

Монотоплива Н₂О₂ и О₃ – особые вещества, способные самостоятельно реагировать с выделением энергии (реакции $\text{H}_2\text{O}_2 = \text{H}_2 + \text{O}_2$, $2\text{O}_3 = 3\text{O}_2$).

При переходе от топливно-кислородных смесей (ТКС) к топливно-воздушным (ТВС) в продуктах наряду с Н₂О появляются токсичные окислы азота NO, NO₂, N₂O₄,

Безуглеродными являются системы на основе гидразина N₂H₄ ($\text{N}_2\text{H}_4 = \text{N}_2 + 2\text{H}_2$), аммиака NH₃ ($2\text{NH}_3 = \text{N}_2 + 3\text{H}_2$), азотистоводородной кислоты HN₃ ($2\text{HN}_3 = \text{H}_2 + 3\text{N}_2$), закиси азота N₂O ($2\text{N}_2\text{O} = 2\text{N}_2 + \text{O}_2$), силана SiH₄, токсичная смесь Н₂+Cl₂=2HCl,

Работа выполнена в рамках планов фундаментальных исследований Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева (Проект 2.3.1.2.4. «Неклассические процессы горения и детонации как основа новых фундаментальных знаний и технологий») на 2021–2025 гг. при финансовой поддержке МинобрНауки РФ.

Двумерная дифракция волн горения и детонации

А. А. Васильев^{1,2}, А. А. Борискин¹, В. А. Васильев¹

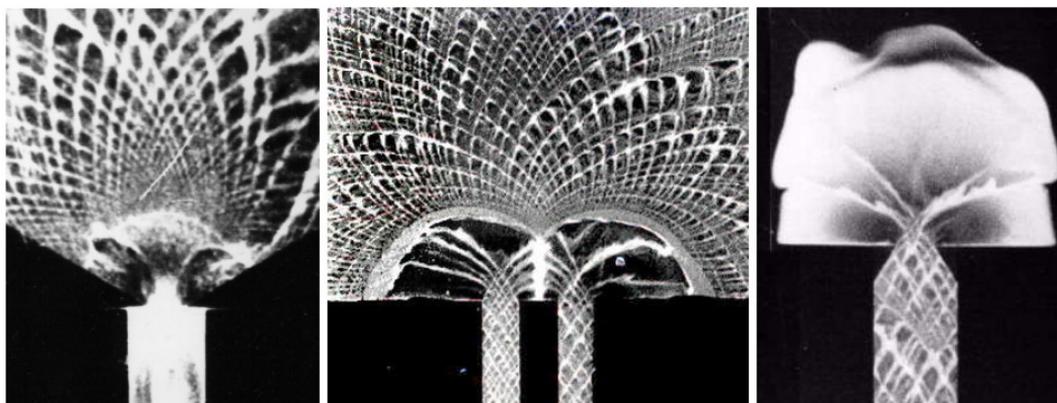
¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Термин «дифракция» как явление огибания световыми (электромагнитными) волнами различных препятствий успешно перешел из оптики в газодинамику течений с ударными волнами (УВ), волнами разрежения (ВР), неустойчивостями и турбулентностью. В области течений с химическими реакциями высокотемпературные струи активных частиц первоначально нашли применение как воспламенитель горючей смеси (один из внешних инициаторов наряду с электрическим или лазерным пробоем, зарядами ВВ, взрывающейся проволокой, высокоскоростным ударником...). Несколько позже такие струи, вытекающие через открытый торец трубы в объем горючей смеси, привлекли внимание исследователей и с научной точки зрения – для выявления физических механизмов возбуждения детонационных волн (ДВ) и динамики их трансформации при изменении граничных условий.

В докладе представлены результаты более удобной для экспериментальных исследований схемы двумерной дифракции. 2D-дифракция реализуется в «плоских» каналах между двумя параллельными пластинами при условии, что глубина такого плоского канала выбирается много меньшей его ширины и длины. Такое условие позволяет исключить эффект трехмерности многофронтной детонации и обеспечивает двумерность течения при изменении ширины канала. Кроме дифракции ДВ в данной работе представлены данные о практически не исследованной дифракции пламени. Методика дифракции позволяет получить важные с точки зрения взрывобезопасности данные о критической энергии инициирования. Критические энергии E^* определяются как минимальные энергии инициатора, обеспечивающего в исследуемой смеси распространение волн горения и детонации: чем меньше E^* , тем более опасна смесь. Данные об E^* позволяют анализировать относительную опасность различных смесей, а дифракционная методика позволяет оптимизировать условия инициирования смеси.

В докладе обсужден ряд схем дифракции волн горения и детонации (в том числе – пережатой ДВ) и наблюдаемых переходных режимов (в том числе – режимы полного срыва не только детонации, но и горения). Некоторые снимки приведены на нижеприведенных фото-снимках (ячеистые структуры – характерный признак детонационного режима).



Работа выполняется в рамках планов фундаментальных исследований Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева (Проект 2.3.1.2.4. «Неклассические процессы горения и детонации как основа новых фундаментальных знаний и технологий») на 2021–2025 гг. при финансовой поддержке МинобрНауки РФ.

Пределы непрерывной детонации двухфазных смесей керосин/вода – нагретый воздух

Ф. А. Быковский, С. А. Ждан, Е. Ф. Ведерников

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Сжигание смесей углеводородное топливо – воздух в детонационных режимах представляет важный теоретический и практический интерес. Результаты экспериментальных исследований непрерывной многофронтной детонации (НМД) в проточных кольцевых камерах сгорания (вариант воздушно-реактивного двигателя) для двухфазных смесей керосин-холодный или нагретый воздух представлены в [1, 2].

Цель настоящей работы – реализация и исследование режимов непрерывной детонации в проточной кольцевой камере сгорания диаметром 503 мм и длиной 600 мм (ДК-500) двухфазных смесей водотопливной эмульсии (ВТЭ; вода-керосин ТС-1) с горячим воздухом, предварительно нагретым огневым способом в форкамере от 600 до 1200 К. В экспериментах варьировались: температура T_p и удельные расходы g_δ нагретого воздуха, коэффициент избытка горючего ϕ , массовая доля воды в ВТЭ m_w .

Результаты экспериментов. При $m_w = 0,38$ в диапазоне удельных расходов воздуха через щель $g_\delta = 600 \div 1400$ кг/(с·м²) при $\phi = 0,53 \div 1,0$ реализованы режимы НМД с одной или двумя парами сталкивающихся поперечных детонационных волн (ПДВ). Частота вращения встречных ПДВ (рис. 1,а) составляла $f = 1,0 \pm 0,1$ кГц для одной пары детонационных волн и $f = 2,4 \pm 0,2$ кГц для двух пар ПДВ.

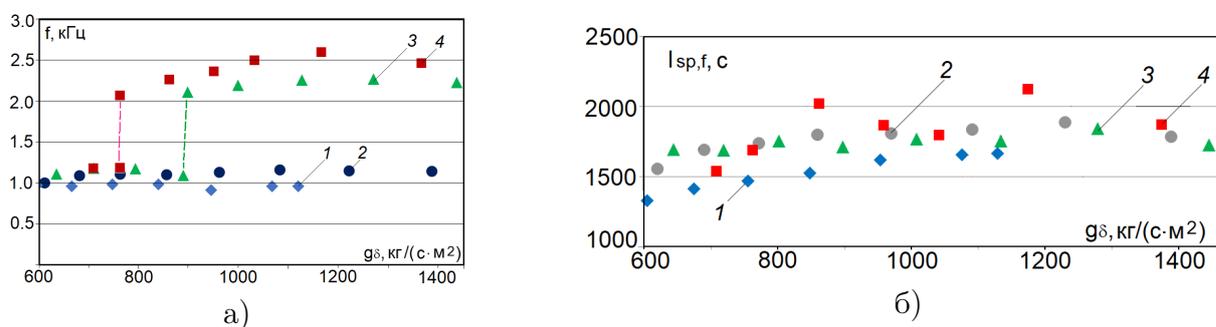


Рис. 1: Зависимости частоты ПДВ (а) и удельных импульсов (б) от удельного расхода подогретого воздуха g_δ ($m_w = 0,38$): 1 – $T_p = 600$ К, 2 – 800, 3 – 1000, 4 – 1200 К.

Нагрев воздуха способствует реализации детонационного сжигания ВТЭ. При температуре воздуха $T_p = 800$ К с увеличением параметра $m_w = (0 \rightarrow 0.67)$ определен в диапазоне $m_w = (0.38 \div 0.53)$ верхний предел существования режимов НМД по массовой доле воды в ВТЭ. По измерениям полного и статического давления на выходе из камеры сгорания определены удельные импульсы $I_{sp,f}$ при НМД (рис. 1,б) в зависимости от расхода и температуры нагретого воздуха, а также от параметров ϕ и m_w .

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Грант № 075-15-2020-806).

Список литературы

1. Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F. Continuous multifront detonation of kerosene–air mixture in an annular combustor with variations of its geometry. Shock Waves. – 2021. – V. 31, N 8. – P. 829–839.

2. *Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.* Непрерывная многофронтная детонация смесей керосина с нагретым в форкамере воздухом. *ФГВ.* – 2023. – Т. 59, №5. – С. 103–115. DOI:10.15372/FGV2022.9283.

Параметры пламен, взрывных и детонационных волн в газугольных смесях

А. В. Пинаев, П. А. Пинаев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

В угольных шахтах случаются выбросы угольного газа (метана с небольшим количеством водорода), образующего с воздухом горючую или взрывоопасную смесь. Если в этой смеси возбуждаются волны горения (ВГ), детонационные (ДВ) или взрывные волны, то поток газа поднимает слой угольной пыли и образует гетерогенную смесь. В связи с этим необходимо выяснить, какое сравнительное влияние на параметры волн оказывают угольный газ и газугольная взвесь. С этой целью экспериментально исследованы смеси CH_4/Air , $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Air}$, CH_4/O_2 , $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{O}_2$ и эти же смеси с взвесью угля, результаты оригинальны.

Эксперименты выполнены в вертикальной ударной трубе длиной L 6.75 м, диаметром d 70 мм ($L/d \approx 96$). Иницирование взрывных волн и ДВ осуществляли двумя секциями иницирования (СИ), ВГ иницировали искрой без СИ. Опыты проведены с порошком каменного угля, размер частиц $0 \div 200$ мкм. Порошок выдували равномерно в трубу из контейнера струёй исследуемой взрывчатой газовой смеси, среднеобъёмная плотность взвеси $\rho \approx 0,1 \div 0,5$ кг/м³.

За фронтом взрывных волн, ДВ и ВГ частицы угля воспламеняются и горят. С увеличением длины зоны реакции ДВ (например, при уменьшении начального давления газовой смеси) возрастает степень сгорания частиц угля и наблюдается усиление волн сжатия. Горение угольных частиц продолжается за зоной реакции. Водород даже в небольших концентрациях облегчает иницирование метановоздушной смеси, увеличивает интенсивность волн и интенсифицирует горение угольных частиц.

После отражения от торца трубы затухающих взрывных волн возможно возникновение самоподдерживающихся низкоскоростных режимов детонации. Доля сгоревшего угля в зоне реакции и за ней не превышает 20-30% и зависит от величины ρ . Получены данные о параметрах взрывных и детонационных волн непосредственно в газовых смесях $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{O}_2$ и $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Air}$ и в тех же газовых смесях с взвесью угля при варьировании интенсивности иницирующей волны. На параметры волн в гетерогенных смесях определяющее влияние оказывает метан. Проведено сравнение экспериментальных параметров детонации с термодинамическими равновесными расчётами.

В бедной по метану смеси 7% CH_4/Air волны горения меняют направление движения, скорость ВГ принимает положительные (при движении вниз) и отрицательные (при движении вверх) значения, частота колебаний пламени 31–33 Гц. Мгновенные значения скорости пламени $(-5) \text{ м/с} \leq V(l) \leq (+6, 2) \text{ м/с}$. Максимальные положительные скорости пламени больше, чем отрицательные. Усреднённая скорость пламени $\bar{V}(l) \approx 1 \text{ м/с}$. Протяжённость светящейся области пламени 5–20 см.

В смесях 7% CH_4/Air /уголь протяжённость пламени 20–30 см. Пламя распространяется со знакопеременной скоростью, мгновенные максимальные скорости $(-10) \text{ м/с} \leq V(l) \leq (+45) \text{ м/с}$, средняя скорость пламени $\bar{V}(l) \approx +(0, 4 - 0, 5) \text{ м/с}$. По сравнению с ВГ в той же газовой смеси яркость пламени возрастает в 50–100 раз из-за частиц угля, но это не приводит к росту скорости волны горения.

Детонационное разложение газообразных углеводородных топлив с получением водорода

А. А. Штерцер^{1,2}, И. С. Батраев^{1,2}, Д. К. Рыбин¹, В. Ю. Ульяницкий¹

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

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

В химической промышленности, нефтепереработке, металлургии, производстве полупроводников и др. отраслях промышленности широко используется водород. В последнее время потребность в нем возрастает в связи с развитием водородной энергетики и применением в качестве экологически чистого топлива на транспорте. В настоящее время 80–85% мирового производства водорода осуществляется паровым риформингом метана. Этот способ, хотя и наиболее дешевый среди других применяемых в промышленности, однако требует подвода большого количества тепловой энергии, поскольку он основан на эндотермической реакции метана и водяного пара в присутствии катализатора при высокой (800 °С) температуре.

В [1,2] предложен альтернативный способ получения водорода путем детонационного разложения ацетилен. В настоящей работе на импульсном газодетонационном аппарате (ИГДА) при начальном атмосферном давлении проведены исследования процесса детонации в смесях метана (с добавкой ацетилен), этилена, этана, пропилен, пропана и бутана с кислородом. Найдены верхние концентрационные пределы детонации для ствола ИГДА диаметром 26 мм и длиной 2 м и величина бустерных зарядов, необходимых для инициирования детонации на этих предельных режимах.

Сделана оценка характеристик ИГДА, как генератора водорода. На рис. 1 представлен состав и количество продуктов детонации указанных углеводородов.

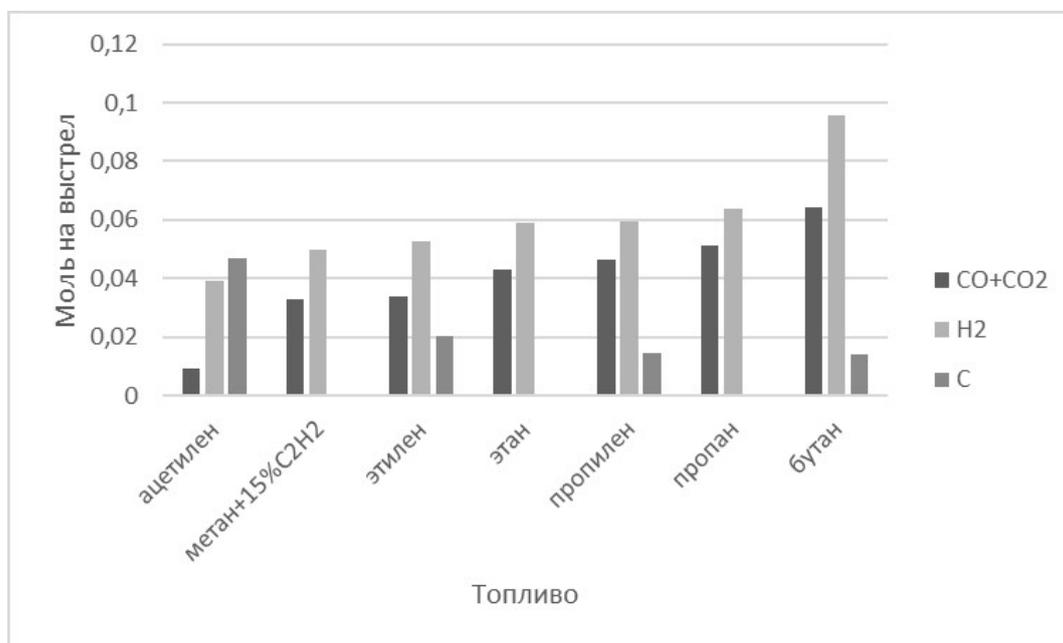


Рис. 1: Генерация водорода, твердофазного углерода и оксидов углерода за один выстрел ИГДА с диаметром ствола 26 мм и длиной 2 м.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (номер проекта 21-19-00390).

Список литературы

1. *Shtertser A. A., Ulianitsky V. Yu., Rybin D. K. et al.* Production of hydrogen and carbon black by detonation of fuel-rich acetylene-oxygen mixtures. *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2022. – V. 47. – P. 14039–14043.
2. *Штерцер А. А., Ульяницкий В. Ю., Рыбин Д. К., Батраев И. С.* Детонационное разложение ацетилена при атмосферном давлении в присутствии малых добавок кислорода. *ФГВ*. – 2022. – Т. 58, № 6. – С. 89–99.

Термопарные измерения теплового потока в импульсном газодетонационном аппарате

В. В. Пай¹, Д. К. Рыбин¹, В. Ю. Ульяницкий¹, С. В. Хаустов²

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

²Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

В данной работе проводились измерения теплового потока на металлическую поверхность в импульсном газодетонационном аппарате (ИГДА) планарными медь – константановыми термопарами при детонации ацетилен-кислородной смеси. Термопары были изготовлены из константановой фольги толщиной 180 ± 5 мкм, на которую газодетонационным способом был нанесен медный слой толщиной 25 ± 5 мкм.

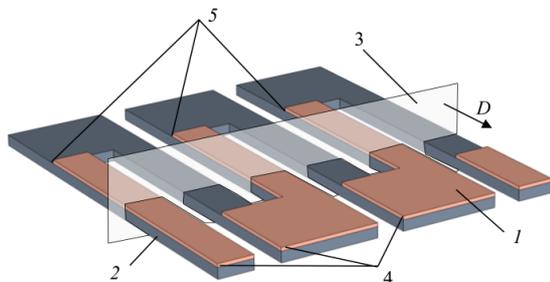


Рис. 1: Фрагмент термобатареи из трех термопар: 1 – медь, 2 – константан, 3 – фронт детонационной волны, 4 – «холодные» спаи, 5 – «горячие» спаи.

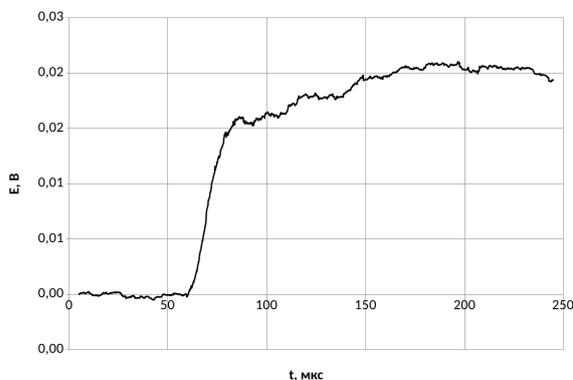


Рис. 2: Осциллограмма зависимости термо-ЭДС от времени.

Термобатарея, составленная из 16 термопар, имела чувствительность 250 ± 20 мкВ/град. Детонационная волна в газовой смеси, распространяясь со скоростью $D = 2,9$ км/с вдоль поверхности термопар (рис. 1), приводила к их нагреву, электрический сигнал (термо-ЭДС) с которых регистрировался с помощью осциллографа (рис. 2).

По измеренной зависимости термо-ЭДС от времени рассчитывались тепловые и электрические процессы, происходящие в двухслойной медь-константановой термопаре, что позволило вычислить тепловой поток от детонирующей смеси к поверхности термопар. Такие данные позволяют определить тепловые циклы технологических процессов в ИГДА при генерации водорода, получении наноразмерного углерода и детонационном напылении.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00942, <https://rscf.ru/project/23-29-00942/>.

Формирование вихря после подрыва ВВ в стволе

В. В. Никулин, Е. А. Чашников

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Известно, что выход ударной волны из ударной трубы нередко сопровождается возникновением вихревого кольца. Однако, для получения вихрей диаметром и скоростью порядков 1 м и 100 м/с, использование ударной трубы затруднительно ввиду громоздкости оборудования. В работе [1] для генерации подобных вихревых колец предложен метод подрыва взрывчатого вещества (ВВ) в цилиндрическом стволе, заглушенном с одного торца. Оказалось, что массы ВВ и запаса воздуха в стволе достаточно для образования вихря. Данный метод использован в [2] для изучения акустического шума, генерируемого отдельным вихрем. В экспериментах [1, 2] не происходило заметного изменения температуры газов, вытекающих из ствола. Представляет интерес исследовать случай, когда энергии взрыва достаточно для заметного увеличения их температуры. За счет нагрева, газ в струе ионизируется, его плотность становится ниже окружающей, поэтому процесс истечения не очевиден. Кроме того, исследование может прояснить механизм формирования вихревого кольца в процессе образования плазмоида [3], вызывающего значительный интерес в течение последнего десятилетия. В настоящей работе регистрируются теневые изображения истечения газообразных продуктов, образующихся после подрыва 40 мг ВВ в стволах диаметрами 42 и 5,8, длиной 136 и 30 мм, заглушенных с одного торца.

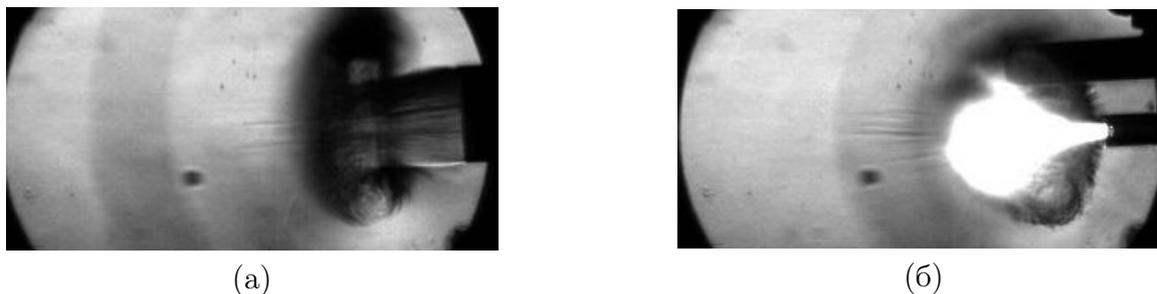


Рис. 1: Фотографии струй из стволов диаметром 42 (а) и 5,8 мм (б), полученных в ИАБ-452.

На фото видно, что струи следуют за ударными волнами. В случае (а), вихревое кольцо формируется сразу после выхода струи из ствола. Поперечный размер атмосферы вихря примерно в 2,3 раза больше диаметра ствола. В случае (б), из ствола вытекает яркая струя, материал которой локализуется в светящемся пузыре. Поперечный размер пузыря максимально примерно в 15 раз превышает диаметр струи. Вихревое кольцо становится видно после ослабления свечения. Таким образом, процессы истечения нагретых слабо и сильно до само свечения струй качественно различны, хотя в обоих случаях происходит локализация газообразных продуктов, вытекающих из ствола после взрыва.

Список литературы

1. Д. Г. Ахметов, М. С. Котельникова, В. В. Никулин, А. В. Пластинин, Е. А. Чашников, В. Ф. Копьев, М. Ю. Зайцев. Генерация крупномасштабных высокоскоростных вихревых колец при подрыве взрывчатого вещества. ФГВ. – 2019. – Т. 55, № 4. – С. 21–25.
2. Kopyev V., Zaitsev M., Akhmetov D. and Nikulin V. Aerodynamic noise generated by large-scale vortex ring. 25th International Congress on Sound and Vibration (ICSV 25). Hiroshima, Japan. Proceedings. – 2018. – V. 3. – P. 1493-1500. ISBN: 978-1-5108-6845-8.

3. *V. L. Bychkov, S. V. Anpilov, N. P. Savenkova, V. Stelmashuk, P. Hoffer.* On modeling of «plasmoid» created by electric discharge. *Journal of Physics: Conf. Series.* – 2018. – V. 996. – P. 012012. doi:10.1088/1742-6596/996/1/012012.

Исследование периода индукции воспламенения альтернативных топлив на ударной трубе

Л. С. Яновский^{1,2,3,4}, В. М. Ежов^{1,2}, Н. А. Червоная², М. А. Ильина^{1,2}, Д. В. Новаковский^{1,2}

¹Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка

²Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова, Москва

³Российская академия ракетных и артиллерийских наук, Москва

⁴Московский авиационный институт, Москва

Данные по периоду индукции воспламенения (ПИВ) углеводородов, полученные при температурах менее 1100 К и давлении, близкому к атмосферному, не представлены в литературе в виду сложности организации эксперимента [1].

Авторами проведены исследования ПИВ топливовоздушных смесей на ударной трубе в диапазоне температур 700 ÷ 2000К и давлений $P=0,9 \div 1,4$ атм. в падающих ударных волнах.

Воспламенение смеси определялось по концентрации радикала ОН с помощью фотоэлектронного умножителя. В качестве газа-толкателя использовался Не. Достоверность методики измерения ПИВ в падающих ударных волнах подтверждается сопоставлением полученных результатов в [2]. Получены зависимости ПИВ от температуры альтернативных топлив, таких как метановодородные, пропанбутановые смеси, а также смесей паров бензина, предельных углеводородов C_5-C_8 и метанола, этанола и изопропанола в стехиометрическом соотношении с воздухом.

Установлена высокая корреляция полученных значений ПИВ смесей паров углеводородов и спиртов с их значениями октановых чисел. Полученные данные по ПИВ могут быть использованы при проектировании энергоустановок, разработке требований к перспективным топливам и оценке пожаровзрывобезопасности альтернативных.

Исследования проведены в рамках госзадания № АААА-А19-119120690042-9.

Список литературы

1. *J. Huang, P. G. Hill, W. K. Bushe* Shock-tube study of methane ignition under engine-relevant conditions: experiment and modeling. *J. Combustion and flame.* – 2004. – N 136. – P. 25–42.
2. *Huang J., Hill P. G., Bushe W. K., Munshi S. R.* *Combust. Flame.* – 2004. – V. 136, N 6. – P. 25.

Режимы сверхзвукового горения, инициируемого в канале при пролете в нем тела со скоростью 5–10 М

В. А. Васецкий, В. М. Грищенко, В. В. Лещевич, О. Г. Пенязьков

Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск

Воспламенение газовых смесей за баллистической волной, создаваемой летящим со сверхзвуковой скоростью телом, впервые было реализовано в [1]. В последующем этот способ многократно использовался для фундаментальных исследований, так как в зависимости от соотношения параметров тела (размер, форма, скорость) и физико-химических параметров смеси (давление, реакционная способность) дает возможность наблюдать все известные режимы горения. В последних работах больше внимания уделялось вопросам инициирования и стабилизации сверхзвуковых режимов горения, что обусловлено возрастающим интересом к реализации детонационного сжигания топлива в ракетных двигателях. Накоплен значительный экспериментальный материал, который позволил подтвердить теоретически обоснованные критерии прямого инициирования [2, 3] и эмпирический критерий стабилизации детонации [4]. В меньшей степени остались изучены эффекты, возникающие при отражении баллистической волны от стенок объема, ограничивающего исследуемую газовую смесь. Как правило размеры баллистической трассы всегда выбирались так, чтобы отраженные волны не искажали течение в ближнем следе полета тела в момент наблюдения. В то же время в работе [3], ссылаясь на ранние эксперименты [5] отмечается, что даже при существенном уменьшении лобового сопротивления тела, можно все равно получить прямое инициирование детонации в области Маховского отражения баллистической волны от стенки трассы. С этой целью в данной работе в качестве трассы использовался канал квадратного сечения размером 35 мм при диаметре метаемого шарика 6 мм. Различные режимы горения фиксировались с высоким временным (время между кадрами 9 мкс) и пространственным разрешением с использованием одновременно регистрации собственного свечения из зоны реакции и градиента плотности теньевым методом. Эксперименты проводились для стехиометрической ацетилен-кислородной смеси, разбавленной азотом или аргоном для изменения параметров детонации и перспективной для практического применения стехиометрической водород-воздушной смеси. Начальное давление смеси в канале изменялось от 5 до 300 кПа, а скорость шарика от 1,8 до 3,1 км/с. Стационарные сверхзвуковые режимы горения были зафиксированы для скоростей шарика выше скорости детонации Ч-Ж при давлениях, ниже предсказываемых согласно известным критериям.

Работа выполнена при финансовой поддержке НАН Беларуси в рамках ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии», задание 2.13.

Список литературы

1. *Зельдович Я. Б., Шляпникох И. Я.* Воспламенение взрывчатых газовых смесей в ударных волнах. Докл. АН СССР. – 1949. – Т. 115, № 6. – С. 871–874.
2. *Васильев А. А.* Основные результаты исследований детонационного горения газовых смесей, возбуждаемого быстролетящим телом. ФГВ. – 1997. – Т. 33, № 5. – С. 86–102.
3. *Lee J. H. S.* Initiation of Detonation by a Hypervelocity Projectile. Advances in Combustion Science: In Honor of Ya. B. Zel'dovich. AIAA. – 1997. – V. 173. – P. 293–310.

4. *Kasahara J, Arai T, Chiba S, Takazawa K, Tanahashi Y, Matsuo A.* Criticality for stabilized oblique detonation waves around spherical bodies in acetylene/oxygen/krypton mixtures. Proc. Combust. Inst. – 2002. – V. 29. – P. 2817–2824.
5. *Benedick WB.* Review of large scale fuel-air explosion tests and techniques. In J.H.S. Lee and C.M. Guirao, editors, Fuel-Air Explosions. – 1982. – P. 507–552.

Взаимодействие ударных волн с границей раздела пузырьковых сред

А. И. Сычев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Изучен процесс трансформации ударных волн на границе раздела пузырьковых сред при переходе из пузырьковой среды с большей концентрацией в среду с меньшей концентрацией газовой фазы (в более плотную среду) и из пузырьковой среды с меньшей концентрацией в среду с большей концентрацией газовой фазы (в менее плотную среду).

Экспериментальные исследования проведены в вертикально расположенной ударной трубе с внутренним диаметром 40 мм и высотой 4,35 м, состоящей из секций высокого и низкого давления с разрывной диафрагмой между ними. Пузырьковые среды с объемными концентрациями газовой фазы β_1 и β_2 создавались в секции низкого давления посредством генерирования пузырьков газа в водоглицериновых растворах с объемной концентраций глицерина α двумя форсунками, расположенными в нижней и средней частях ударной трубы. Ударная волна в пузырьковой среде формировалась при сжигании горючего газа (ацетиленокислородная стехиометрическая смесь) в секции высокого давления, расположенной либо выше, либо ниже секции низкого давления.

При переходе в более плотную среду [1] ударная волна на границе раздела сред трансформируется: помимо прошедшей во вторую пузырьковую среду II ударной волны возникает отраженная от границы раздела сред ударная волна, распространяющаяся в пузырьковой среде I (рис. 1, а, б). Давление прошедшей и отраженной от границы раздела сред ударных волн возрастает с увеличением разности концентраций газовой фазы сред.

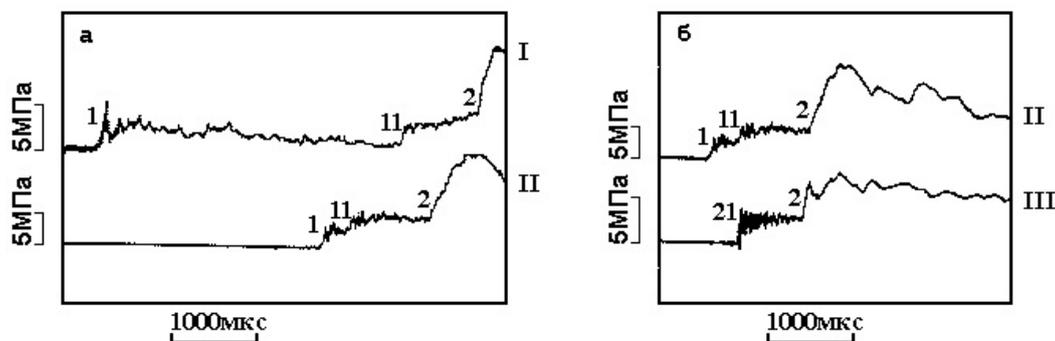


Рис. 1: Осциллограммы давления падающей (1), прошедшей через границу раздела сред (21), отраженной от границы раздела сред (11) и отраженной от торца ударной трубы (2) ударных волн. $\alpha = 0,25$, газ – N_2 ; $\beta_1 = 4\%$, $\beta_2 = 1\%$; расстояние от границы раздела сред до датчиков давления, м: I – (–0,665), II – (–0,070), III – 0,060.

При переходе в менее плотную среду падающая на границу раздела сред ударная волна распадается на две волны: отраженную в среду I волну разрежения и прошедшую в среду II ударную волну. Давление отраженной и прошедшей волн возрастает с увеличением концентрации β_1 (при $\beta_2 = \text{const}$) и снижается при увеличении концентрации β_2 (при $\beta_1 = \text{const}$).

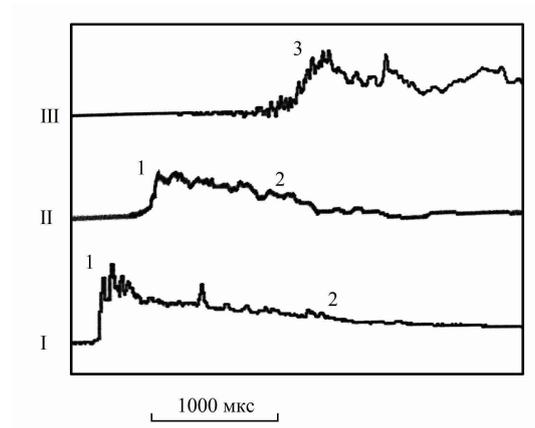


Рис. 2: Осциллограммы давления падающей (1), отраженной (2) и прошедшей (3) волн. $\alpha = 0,5$, газ – N_2 ; $\beta_1 = 1\%$, $\beta_2 = 7,5\%$; $p_1 = 3,4$ МПа, $p_2 = p_3 = 1,0$ МПа; расстояние от границы раздела сред до датчиков давления, м: I – $(-0,610)$, II – $(-0,410)$, III – $0,030$.

Таким образом, характер взаимодействия ударной волны с границей раздела сред определяется соотношением концентраций газовой фазы пузырьковых сред. Результаты расчета по формулам, следующим из решения задачи о распаде произвольного разрыва для стационарных ударных волн, согласуются с экспериментальными данными.

Список литературы

1. Сычев А. И. Трансформация ударных волн на границе раздела пузырьковых сред. ФГВ. – 2006. – Т. 42, № 2. – С. 97–104.

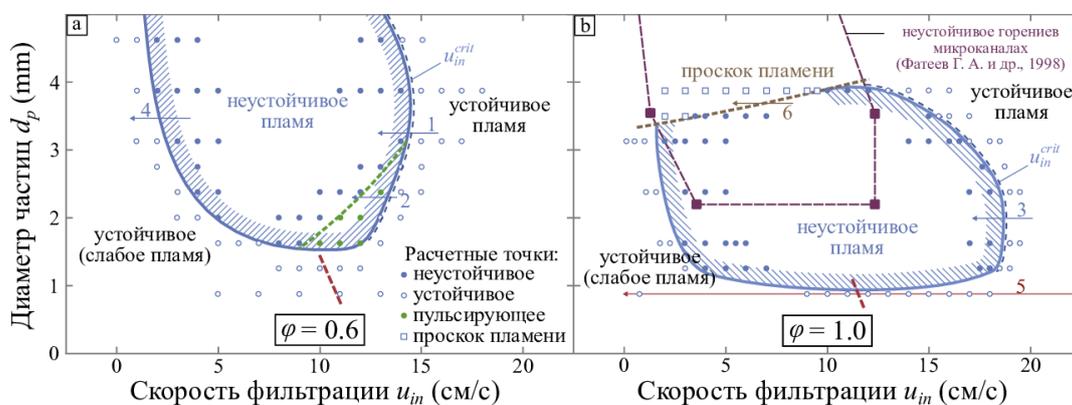
Динамика и механизмы пульсаций пламени в пористых средах

Д. С. Астахов^{1,2}, И. А. Яковлев¹

¹Томский научный центр СО РАН, Томск

²Томский государственный университет, Томск

Внутри пористых горелок при малой скорости фильтрации пламя склонно к неустойчивому, колебательному поведению со сложной динамикой из-за неравномерности пористой структуры, поля течения и температурного градиента, образующегося в результате рекуперации тепла [1]. В данной работе проводилось численное исследование в рамках подхода к моделированию в масштабе пор, посвященное рассмотрению механизмов и характеристик неустойчивого поведения пламени в двумерном нерегулярном зернистом слое, сгенерированном преобразованием Вороного с постоянным размером поровых каналов. Результаты демонстрируют, что колебания пламени могут быть связаны с повторяющимся затуханием и воспламенением (в литературе известные как FREI), что приводит к пульсациям скорости в соседних поровых каналах, где фрагменты стабильного пламени колеблются в следствии флуктуаций скорости течения смеси. Результаты параметрического моделирования с изменением диаметра частиц и скорости потока были обобщены на диаграмме режимов, показывающей переход между стабильным нормальным пламенем, FREI, и стабильным слабым пламенем со снижением скорости для двух значений эквивалентного соотношения $\varphi = 0,6$ и 1 . Между стабильным нормальным пламенем и FREI был обнаружен переходный пульсирующий режим, характеризующийся неполным угасанием [2], но существенным изменением скорости горения.



Список литературы

1. Ellzey J. L., Belmont E. L., Smith C. H. Heat recirculating reactors: Fundamental research and applications. Progress in Energy and Combustion Science. – 2019. – Т. 72. – Р. 32–58.
2. Yakovlev I., Astakhov D., Zambalov S., Fursenko R., Li J., Maznoy A. Transition to unstable oscillatory flames in porous media combustion. Combustion and Flame. – 2023. – V. 252. – Р. 112752.

Расчет детонации переобогащенных топливом газовых смесей

Е. С. Прохоров

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

На основе сформулированного унифицированного подхода к расчету равновесных состояний продуктов сгорания углеводородов при недостатке кислорода [1] представлена модифицированная модель детонации газовых смесей. С помощью этой модели удалось добиться вполне удовлетворительного согласования численного решения с экспериментальными данными для скорости фронта самоподдерживающейся (Чепмена – Жуге) детонации [2]. Это может служить основанием адекватности расчетов газодинамических параметров (давление, температура, плотность, массовая скорость и т.п.) продуктов детонации на фронте их реальным значениям.

Используя эти расчеты, численно исследована структура плоской детонационной волны, распространяющейся от жесткой стенки в переобогащенной топливом ацетиленокислородной смеси $n\text{C}_2\text{H}_2 + (1-n)\text{O}_2$. То есть, рассмотрены случаи ($n > 0,5$), когда концентрация ацетилена в смеси больше, чем у кислорода и в продуктах детонации возможно появление свободного углерода. Распределение параметров продуктов детонации за фронтом волны описывалось в виде автомодельного решения. Такие решения получены для различных соотношений топлива и кислорода. Эти решения отличаются друг от друга количественно (имеют различные максимальные и минимальные значения для параметров продуктов детонации), но при этом структура газодинамического течения за детонационным фронтом качественно не изменяется. Это можно объяснить отсутствием скоростной и температурной неравновесности между газом и частицами углеродного конденсата, по сути предполагаемой в унифицированном подходе к расчету равновесных детонационных течений.

Установлено, что полученные автомодельные решения обладают подобием, если газодинамические параметры продуктов детонации обезразмерить на их значения, которые реализуются на фронте волны. При обезразмеривании расчетные точки группируются около единых кривых. Предложены аналитические формулы для приближенного описания этих кривых с относительно небольшой погрешностью, которая в окрестности фронта стремится к нулю. Это позволяет проводить оценочные расчеты пространственно-временной эволюции газодинамического течения за детонационным фронтом, основываясь только на данных о значениях параметров детонации Чепмена – Жуге.

Список литературы

1. *Прохоров Е. С.* К расчету равновесных состояний продуктов сгорания углеводородов при недостатке кислорода. Сибирский физический журнал. – 2019. – Т. 14, № 4. – С. 74–81.
2. *Prokhorov E. S.* On melting temperature of carbon produced in detonation combustion of acetylene. J.Phys.: Conf. Ser. – 2022. V. 2233. – P. 012003.

Горение в сверхзвуковом потоке в двухсекционном канале при боковой подаче сжатого воздуха и водорода

В. П. Замураев, А. П. Калинина

*Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск*

Внутренние сверхзвуковые течения с инициируемыми в них процессами горения продолжают привлекать внимание исследователей. Рассматривается горение в сверхзвуковом потоке в канале, состоящем из двух секций постоянного сечения различного диаметра (у второй секции он больше). Сверхзвуковое течение в первой секции создается соплом на входе. Такая конфигурация была рассмотрена в эксперименте [1], в котором углеводородное топливо подавалось аксиально во входном сечении первой секции, а его горение инициировалось теплогазодинамическими импульсами, и в дальнейшем поддерживалось боковой подачей водорода, осуществляемой непосредственно перед входом во вторую секцию. Выполнено численное моделирование процесса с близкими параметрами. Задача решалась в осесимметричной постановке. Решались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса, замыкаемые $k - \epsilon$ моделью турбулентности с расширенной трактовкой пристеночных функций. Горение углеводородного топлива и водорода рассматривались в рамках упрощенной химической кинетики из одной реакции, что является возможным, так как области горения этих веществ не пересекаются. Истечение из канала происходило в атмосферу. Для осреднения результатов расчета применена процедура, описанная в [2]. С точностью до конфигурации щели (в эксперименте – круглое отверстие, в расчете – кольцевая щель), и длины канала, геометрия в расчете и эксперименте одинаковая. Исследована возможность организации горения в двух секциях канала.

Полученные численно распределения пристеночного давления для горения керосина без подачи водорода качественно совпадают с экспериментальными аналогами. При прекращении подачи газодинамических импульсов и последующей подаче водорода сохраняется трансзвуковое горение в первой секции, а во второй секции происходит горение водорода.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН (номер госрегистрации проекта 121030900260-6).

Список литературы

1. *Третьяков П. К.* Организация эффективного горения керосина в канале при больших числах Маха. ФГВ. – 2020. – Т. 56, № 3. – С. 42–47.
2. *Замураев В. П., Калинина А. П.* Горение этилена и керосина в сверхзвуковом потоке при низких числах Маха. ФГВ – 2022. – Т. 58, № 4. – С. 63–70.

Математическое моделирование гибридной детонации в водородно-воздушной смеси с частицами бора

А. А. Сыроватень, И. А. Бедарев, Д. А. Тропин

*Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск*

Исследования гибридной детонации обусловлены наличием множества взрыво- и пожароопасных ситуаций, возникающих на производствах, использующих частицы различных высокоэнергетических материалов [1]. В данном исследовании рассмотрена реагирующая водородно-воздушная смесь и газовзвесь горючих частиц бора. Бор широко используется в качестве добавочного компонента при производстве изделий, обладающих повышенной твердостью и прочностью, при получении высокоабразивных материалов, боросиликатного стекла [2]. Также посредством детонационного синтеза могут быть получены оксиды бора нанометрового диапазона размеров.

В работе выполнено математическое моделирование гибридной детонации реагирующей водородно-воздушной смеси с горючими частицами бора. Моделировалось пространство, заполненное смесью реагирующих газов и частицами бора, по которому пробегала плоская детонационная волна. В области за фронтом детонационной волны с некоторой задержкой воспламенения происходило воспламенение и горение частиц бора. Задача решалась в одномерной стационарной постановке в системе координат, связанной с фронтом волны. Математическая модель записана на основе принципов механики гетерогенных сред, когда считается, что фаза частиц является непрерывным континуумом. Для смеси в целом записаны уравнения законов сохранения массы, импульса и энергии. Для фазы частиц записаны дифференциальные уравнения для плотности, скорости и температуры. Модель включает приведенную одностадийную кинетику горения водородно-воздушной смеси [3] и PSU-модель горения бора [4].

В результате расчётов получены структуры волн детонации в газовзвеси, времена задержки воспламенения и горения частиц для их объемной концентрации $m_2 = 10^{-5} \div 10^{-3}$ и диаметра $d = 1 \div 20$ мкм. Показано, что максимальная скорость детонационной волны достигается при $m_2 = 1,25 \cdot 10^{-4}$, что соответствует стехиометрическому составу смеси.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда № 21-79-10083, <https://rscf.ru/project/21-79-10083/>

Список литературы

1. Федоров А. В., Хмель Т. А. Математическое моделирование детонации алюминиевой пыли в кислороде с учётом скоростной неравновесности частиц. ФГВ. – 1997. – Т. 33, № 6. – С. 80–91.
2. Crouch I. G., Franks G. V., Tallon C., Thomas S., Naebe M. Glasses and ceramics. The Science of Armour Materials – 2017. – P. 331–393.
3. Tropin D. A., Bedarev I. A. Problems of detonation wave suppression in hydrogen-air mixtures by clouds of inert particles in one- and two-dimensional formulation. Combustion Science and Technology – 2021. – V. 193, N 2. – P. 197–210.
4. Yeh C. L. and Kuo K. K. Ignition and Combustion of Boron Particles. Prog. Energy Combust. Sci. – 1996. – N 22. – P. 511–541.

Моделирование кинетики и расчет структуры детонационных волн в двухтопливных газовых смесях

П. А. Фомин, А. В. Троцюк, И. В. Тетервова

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Выполнено физико-математическое моделирование детонационного сгорания двухтопливных газовых смесей: $\text{CH}_4\text{--H}_2$, керосин– H_2 , $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{--H}_2$, CO--H_2 и $\text{CO--C}_6\text{H}_{14}$ с окислителем. Оно включало разработку комплекса обобщенных моделей кинетики для описания химических превращений и их верификацию в расчетах параметров и двумерной ячеистой структуры детонационных волн.

Практический интерес к исследованию детонации указанных бинарных смесей, содержащих тяжело- и легко детонирующие компоненты, связан с перспективами их технического использования (детонационные двигатели, энергетика, утилизация органических отходов ультраперегретым паром и т.д.). Моделирование детонации рассматриваемых смесей сдерживается сложностью химических превращений и отсутствием физически обоснованных и высокоточных обобщенных моделей химической кинетики, позволяющих описывать химическую реакцию без расчета ее детального химического состава.

Предлагаемые модели кинетики просты, физически обоснованы, обладают высокой точностью, описывают как течение реакции во времени, так и состояние химического равновесия, применимы во всем диапазоне концентраций реагирующих компонент внутри детонационных пределов и являются эффективной альтернативой детальным кинетическим схемам. Модели двустадийные (стадии индукции и основного тепловыделения). Сложные процессы в зоне индукции заменялись брутто-реакцией. В зоне основного тепловыделения использовалось одно кинетическое уравнение.

Разработанные кинетические модели для стехиометрических смесей $\text{CH}_4\text{--H}_2$, $\text{CO--C}_6\text{H}_{14}$ и CO--H_2 с воздухом успешно верифицированы на численных двумерных расчетах параметров и структуры ДВ, выполненных в рамках численного кода [1]. Результаты расчетов отражают основные качественные особенности детонационных структур, известные из эксперимента. Воспроизведена перестройка детонационных структур при изменении соотношения между горючими. Получены нерегулярные ячеистые структуры с хаотическим несогласованным движением основных поперечных волн, многочисленными вторичными поперечными волнами, составляющими иерархию уменьшающихся по размерам возмущений лидирующего ударного фронта, областями несгоревшей смеси на значительном расстоянии от переднего фронта волны, тонкой (ячеистой) структурой поперечных волн. Имеется хорошее соответствие рассчитанных и экспериментальных размеров ячейки при изменении соотношения между горючими.

Вычисления проведены с использованием комплекса MVS-10Q в МСЦ РАН, Москва.

Исследование выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда № 22-29-01307, <http://rscf.ru/project/22-29-0137/>.

Список литературы

1. *Fomin P. A., Trotsyuk A. V., Vasil'ev A. A.* Approximate model of chemical reaction kinetics for detonation processes in mixture of CH_4 with Air. *Combustion Science and Technology*. – 2014. – V. 186, N 10–11. – P. 1716–1735.

Численное исследование дожигания многофазных полидисперсных смесей продуктов разложения энергетических конденсированных систем в воздушном потоке

В. В. Берников, Д. А. Ягодников, К. В. Федотова

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва

В настоящее время численное моделирование позволяет получать необходимые данные по характеристикам рабочего процесса в энергосиловых установках (ЭСУ), сокращая объём и затраты на экспериментальную отработку. Сложность протекающих в камерах сгорания ЭСУ процессов диктует требования к детальному изучению фундаментальных основ смешения, воспламенения и горения в многофазных реагирующих турбулентных потоках. Широко используемые вычислительные пакеты, такие как, ЛОГОС, ANSYS, Star-CD, Flow Vision и пр. накладывают особые требования к вычислительным ресурсам, что часто приводит к существенным материальным и временным затратам и делает актуальной разработку авторских компьютерных кодов.

В данной работе создан алгоритм и процедуры численных расчетов с использованием собственного компьютерного кода на языке C++ для исследования рабочего процесса в проточном тракте постоянного сечения с различными способами подачи двухфазных продуктов первичного сгорания модельных энергетических конденсированных систем (ЭКС) в воздушный поток. Расчет течения многофазного реагирующего потока выполняется с помощью комбинированного метода Лагранжа-Эйлера, а также метода конечных объёмов 2-го порядка точности. Реализованы неструктурированные расчетные сетки с поддержкой как классических типов ячеек (тетраэдры, призмы и т.д.), так и полиэдрических ячеек с произвольным количеством граней. Для снижения чувствительности модели турбулентности к качеству сетки в пристеночной области и, в частности, к значению параметра y^+ в пристеночных ячейках, для задания переменных турбулентности применяется методика, описанная в [1]. В качестве алгоритма решения системы линейных уравнений выбран алгоритм LU-SGS, который используется в задачах газовой динамики с химически реагирующими потоками [2]. Расчет осуществляется параллельным методом на графическом ускорителе. В качестве постпроцессора применяется свободно распространяемая программа Paraview.

Результатами проведенных расчетов являются поля температур, скоростей, концентраций и полноты сгорания двухфазных продуктов первичного сгорания модельных ЭКС в воздушном потоке. Проведен анализ особенностей движения и горения частиц конденсированной фазы. Для верификации результатов численного моделирования с использованием собственного компьютерного кода проведена серия расчетов с использованием коммерческого пакета вычислительной гидрогазодинамики ANSYS Fluent. Основными направлениями отладки программы и изменений в математической модели являлись повышение точности моделирования физических процессов и стабильности расчета, а также увеличение скорости сходимости итерационного процесса. Сравнение результатов численных расчетов показало удовлетворительную сходимость.

Список литературы

1. *Esch T., Menter F. R.* Heat transfer prediction based on two-equation turbulence models with advanced wall treatment. Proceedings of Turbulence Heat and Mass Transfer. – 2003.

2. *Jian Shun Shuen and Seokkwan Yoon* Numerical study of chemically reacting flows using a lower-upper symmetric successive overrelaxation scheme. *AIAA Journal*. – 1989. – P. 1752–1760.

Влияние геометрических характеристик камеры сгорания на горение порошка алюминия в закрученном потоке

А. Ю. Крайнов, К. М. Моисеева, А. А. Митрофанов

Томский государственный университет, Томск

Доклад является продолжением работы по исследованию закономерностей горения порошка алюминия в канале с расширением при закрутке потока. Вопросы горения частиц алюминия в закрученном потоке, в частности, описаны в работах [1, 2]. В работе [2] численно показано, что в зависимости от угловой составляющей скорости подачи смеси на входе в канал фронт горения может формироваться в окрестности зоны подачи или быть вытянутым вдоль оси канала. Показано, что при высоких скоростях закрутки горящие частицы забрасывает за поворот канала, что приводит к формированию нагретых зон в газе и изменению формы пламени.

Целью настоящей работы являлось развитие результатов, представленных в работе [2]. Физико-математическая модель горения аэрозвеси порошка алюминия в камере с расширением при закрутке потока подробно представлена в работах [1, 2]. Схема канала приведена на рис. 1.

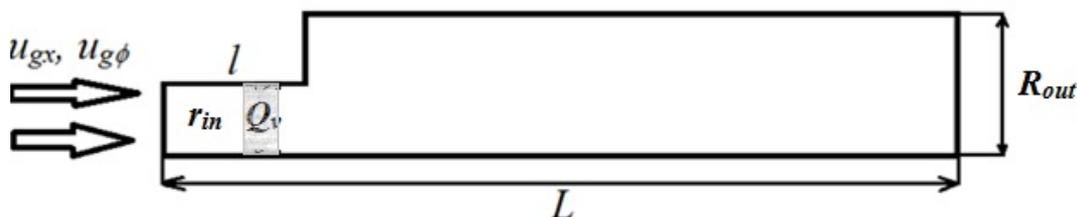


Рис. 1: Схема цилиндрической камеры сгорания с внезапным расширением. R_{out} – радиус выходного канала, r_{in} – радиус входного канала, l – протяженность входного канала, L – общая протяженность цилиндрического канала.

Продолжение работы связано с исследованием характеристик камеры сгорания и коэффициента закрутки потока на структуру фронта пламени. Исследованы закономерности сгорания порошка алюминия в зависимости от протяженности, l , и радиуса, r_{in} , входного канала.

Варьировался состав смеси (массовая концентрация и радиус частиц алюминия), а также компоненты скорости подачи газозвеси на вход в канал, u_{gx} , $u_{g\phi}$. Из численного решения определялась форма фронта горения, характеристики установившегося фронта пламени, степень окисления порошка алюминия при горении газозвеси.

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования (проект № FSWM-2020-0036).

Список литературы

1. Егоров А. Г. Горение дисперсного алюминия в потоке воздуха. Монография. – 2008. – 305 с.
2. Moiseeva K. M., Krainov A. Y., Krainov D. A. Combustion of aluminum powder-air suspension in a swirl flow. Eurasian Phys. Tech. J. – 2021. – V. 18, N 2. – P. 47–55.

Расчет инициации горения в осесимметричных каналах на основе кинетической модели мностадиной реакции водородо-воздушной смеси

С. Н. Мартюшов

Московский авиационный институт, Москва

Было проведено усовершенствование алгоритма [1], основанного на использовании системы уравнений кинетики для 11 химических реакций реагирующей водородо-воздушной смеси из 9 компонент. Модернизация заключалась в отдельном вычислении потоков компонент смеси в одномерном операторе шага на основе строго противопоточной разностной схемы. В полном алгоритме шага по времени на один двойной шаг для газовой динамики использовалось несколько (5, ..., 50) шагов решения системы уравнений кинетики. В качестве модельной решалась задача инициации горения на стационарной ударной волне в плоском канале. За небольшой интервал времени расчета удалось получить устойчивый рост концентрации H_2O в смеси при одновременном уменьшении концентрации O_2 (как критерий возникновения реакции горения). Разработанная модификация была использована для расчета течений горения в каналах с сужениями. Для трех таких конфигураций получено устойчивое воспламенение в областях каналов непосредственно за сужениями. Для построения криволинейных регулярных расчетных сеток использовался алгоритм, предложенный в [2]. Предполагается дальнейшее использование предложенного модифицированного алгоритма, в том числе для расчета трехмерных задач горения водородо-воздушных смесей.

Список литературы

1. *Мартюшов С. Н.* Расчеты горения водорода в осесимметричных областях. Сборник статей Межвузовский научный конгресс «Высшая школа: Научные исследования». – М.: Инфинити. – 2022. – С. 149–158.
2. *Martyushov S. N.* Construction of Calculation Grids on the Basis of Poisson Equation Decision in Proc. of. 15th IMACS World Congress on Scientific Comput., Modelling and Appl. Maths. – 1997. – V. 2. – P. 191–198.

Секция 5

Обработка и синтез материалов при динамическом воздействии

Новые подходы к созданию металлических и металлокерамических материалов энергией взрыва

В. И. Лысак, С. В. Кузьмин

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

Взрывные технологии широко используются для обработки материалов и получения металлических слоистых композиционных материалов. В первую очередь, к этим технологиям относится сварка металлов взрывом, которая в силу присущих ей особенностей является одним из самых эффективных, а в ряде случаев единственно возможным путем создания высококачественных биметаллических и многослойных композиционных материалов различной структуры и назначения.

Одним из новых подходов, развиваемых в Волгоградской научной школе, является применение ультразвука при сварке металлов взрывом. Для реализации этого процесса к неподвижной пластине подключали генератор ультразвуковых колебаний через концентратор-волновод и в момент детонации заряда ВВ прикладывали к удаленному от точки инициирования торцу метаемой пластины ультразвуковое воздействие частотой $14 \div 25$ кГц и амплитудой $7 \div 25$ мкм. Нами впервые установлено, что генерирование ультразвуковых колебаний в свариваемых пластинах при их высокоскоростном соударении приводит к существенному изменению условий формирования взрывосварного соединения, что проявляется, в первую очередь, в уменьшении размеров образующихся волн и количества локальных литых включений. В определенном диапазоне частоты колебаний также наблюдается некоторый рост прочности сварного соединения, а также вовлечение в сдвиговую пластическую деформацию более глубоко расположенных слоев металла и более равномерное распределение максимальных сдвигов по толщине свариваемых пластин. Впервые выявленное подобное явление можно объяснить проявлением акустопластического эффекта, который заключается в значительном снижении предела текучести металла при наложении ультразвуковых колебаний.

Еще одним новым научным направлением, развиваемым в Волгоградской научной школе, является применение взрывных технологий для получения высококачественных металлокерамических композитов из смесей порошков тугоплавких карбидов с металлами, так называемые твердые сплавы. Взрывная обработка порошков позволяет одновременно достигать и высоких давлений, достаточных для уплотнения порошков до практически беспористого состояния, и температур, необходимых для образования прочного соединения между компонентами порошкового материала. Это исключает необходимость последующего спекания прессовки, что позволяет использовать для получения композитов термодинамически несовместимые компоненты, такие как $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ti}$, WC-Ti или SiC-Ti . Нами впервые показано, что свойства получаемых металлокерамических порошковых композитов (пористость и твердость) зависят соответственно от двух главных параметров процесса: максимального давления и максимальной температуры разогрева порошковой смеси в процессе ударно-волновой обработки. Вполне закономерно, что с увеличением давления пористость прессовки монотонно снижается, причем тем больше, чем больше содержание металлической связки в смеси. Температура же разогрева влияет на твердость материала. При этом наблюдается скачок твердости в интервале температур $500 \div 600$ °С ($0,35 \div 0,4 T_{\text{пл}}$. карбида хрома), и одновременно меняется характер излома образцов с межкристаллитного на транскристаллитный, т.е. образуются прочные связи между карбидными частичками и металлической матрицей по твердофазному механизму.

Полученные научные результаты легли в основу ряда новых технических и технологических решений, реализованных на практике.

Наноалмазы динамического синтеза в технологиях настоящего и будущего

А. Я. Вуль, А. Т. Дидейкин, А. Е. Алексенский, А. В. Швидченко

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

Синтез нано- и микрокристаллических алмазов можно осуществить, подвергая действию взрывной волны графит или смесь графита и металла катализатора, помещенных в закрытую ампулу. Именно такой, так называемый динамический синтез алмаза был осуществлен первоначально в СССР и США. Исключение графита из процесса синтеза алмазов – является несомненным преимуществом детонационного синтеза.

Появление общедоступных публикаций в этой области следует отнести к 1988 году, когда в журналах «Доклады Академии наук» и Nature были опубликованы приоритетные статьи [1, 2]. Подробности захватывающей истории открытия детонационного синтеза алмазов разными группами можно найти в историческом обзоре [3].

В докладе будет представлен обзор последних российских и зарубежных работ, посвященных процессам синтеза алмазных наночастиц с помощью ударных волн из различных углеродных материалов.

Основное внимание будет уделено результатам, полученным сотрудниками ФТИ им. А. Ф. Иоффе в тесной кооперации с исследователями из Японии, Израиля, Германии, Франции и Италии [4–7].

Будут рассмотрены многочисленные примеры применения алмазных наночастиц динамического синтеза и проанализированы перспективы их использования в технологиях будущего.

Исследования были выполнены в рамках проекта ФТИ им. А. Ф. Иоффе № 0040-2019-0013 и поддержаны грантами российских и зарубежных фондов.

Список литературы

1. *Лямкин А. И., Петров Е. А., Ершов А. П., Сакович Г. В., Ставер А. М., Тутов В. М.* Доклады АН. – 1988. – Т. 302. – С. 611.
2. *Greiner N. R., Philips D. S., Johnson J. D., Volk F.* Nature. – 1988. – V. 333. – P. 440.
3. *Даниленко В. В.* ФТТ. – 2004 – Т. 46. С. 581.
4. *Kruger A. et al.* Carbon. – 2005. – V. 43, – P. 1722.
5. *Gridnev I. D. et al.* Bull. Chem. Soc. Jap. – 2014 – V. 87. – P. 693.
6. *Bosak A. et al.* Materials. – 2020. – V. 13, N 15. – P. 3337.
7. *Panich A. M. et al.* Diam. Relat. Mater. – 2023 – V. 131. – 109591.

Теория и практика детонационного синтеза наноалмаза, применение детонационных наноалмазов

В. Ю. Долматов

Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог», Санкт-Петербург

В обзорной лекции показаны существующие модели структуры детонационных наноалмазов (ДНА), изображения различных видов ДНА в зависимости от исходных взрывчатых веществ (ВВ), рассмотрены основы взрывчатого разложения ВВ, параметры, влияющие на выход ДНА. Показаны современные представления о возможных механизмах образования наноалмазов. Введено понятие удельной мощности ВВ, возможность прогнозной оценки выхода ДНА при взрыве ВВ в зависимости от их элементного состава, скорости детонации, удельной мощности и давления в плоскости Чепмена-Жуге. Показан процесс синтеза ДНА из индивидуальных, бинарных и тройных зарядов ВВ, установлен оптимальный экономичный диапазон выхода ДНА в $6,0 \div 8,2\%$ мас. Допирование происходит в процессе детонационного синтеза при внесении элементов, их неорганических или органических соединений в состав зарядов взрывчатых веществ (ВВ). Для внедрения в кристаллическую структуру полученных ДНА используют бор, фосфор, кремний, литий, германий, сурьму.

Представлена сопоставительная характеристика алмазов статического и детонационного синтеза, составы неочищенного детонационного углерода – алмазная шихта (АШ) и ДНА, размеры алмазных ядер. Показана идентичность ДНА вне зависимости от используемых ВВ и условий синтеза. Определен объем кластера ДНА и первичного «неразрушаемого агрегата» в $3,5 \times 10^6 \text{ \AA}^3$.

Показано многообразие областей применения ДНА: гальванические процессы (с хромом, никелем, алюминием и др. металлами), приведены физико-механические характеристики покрытий, даны результаты полирования различных материалов ДНА, эффекты от использования ДНА в полимерных композициях, топливных системах, увеличение урожайности сельскохозяйственных культур, эффект от использования АШ и ДНА в смазочных композициях. Даны основные направления использования ДНА в медицине, биологии, косметологии.

Для получения высокоресурсных электрохимических металл-алмазных покрытий (хром, никель, цинк, медь, серебро, золото) автором получены и использованы ДНА, допированные бором, фосфором и кремнием. Показано, что использование допированных ДНА приводит к существенному возрастанию адгезии металлической пленки к матрице, микротвердости, износу и коррозионной стойкости с сохранением приемлемого переходного сопротивления в случае серебра, меди и золота. При анодном оксидировании алюминия также увеличивается микротвердость, падает пористость, повышается коррозионная устойчивость и износостойкость.

При использовании ДНА в порошковой металлургии усиливаются прочностные свойства изделий при сохранении их пластичности.

Показано, что ДНА действуют как классические антиоксиданты, воздействуя на злокачественные опухоли. Приведены данные по выводу из организма ДНА, наиболее эффективным органом для этой цели являются легкие.

Приведены обобщающие выводы по всем направлениям исследования и применения ДНА.

Промышленное получение детонационных алмазов и исследование их СВОЙСТВ

С. А. Курепин¹, О. А. Ухабин¹, А. С. Смирнов^{1,2}, А. Я. Вуль³

¹ Государственный научно-исследовательский институт машиностроения им. В. В. Бахирева, Дзержинск

² Самарский государственный технический университет, Самара

³ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

Исследования твердых компонент продуктов детонации ВС ТНТ/гексоген, выполненные в конце 70-х годов XX века в ИГиЛ СО АН СССР под руководством В. М. Титова [1], стали основой промышленной технологии производства ультрадисперсных алмазов (наноалмазов), реализованной в НПО «Алтай» (г. Бийск). Практически одновременно в филиале ИФХ АН СССР (г. Черноголовка) была создана технология синтеза поликристаллических алмазных порошков микронных размеров, получаемых из твердых продуктов детонации взрывчатых смесей, содержащих в своем составе от 10 до 30 % графита [2].

Эта технология, включающая взрывной синтез алмазосодержащей шихты из гексоген-графитовой смеси (ГГС), обогащение, очистку от примесей и классификацию получаемых порошков, реализована в АО «ГосНИИмаш», осуществляющим в настоящее время их промышленный выпуск (марка ДРМ).

Производство сопровождается исследованиями особенностей процесса синтеза, обогащения и применения получаемой продукции. Исследования формирования алмазной фазы в продуктах детонации проводились при помощи синхротронной методики по договору с ИГиЛ СО РАН. Проведены исследования по управлению дисперсностью получаемых порошков путем совершенствования конструкции зарядов ГГС. С участием заинтересованных предприятий промышленности ведется большая работа по подбору рецептур паст и суспензий, используемых при шлифовке поверхностей ответственных деталей из материалов различной твердости.

Список литературы

1. *Титов В. М., Анисичин В. Ф., Мальков К. Ю.* Исследование процесса синтеза ультрадисперсного алмаза в детонационных волнах. ФГВ. – 1989. – Т. 25, № 3. – С. 117–126.
2. US Patent # 4 483 836, November 20, 1984 Adadurov, et al. Method of producing diamond and/or diamond-like modifications of boron nitride.

Эволюция формирования кристаллитов и зерна в процессе детонационного получения наноалмазов

Е. А. Петров

Бийский технологический институт Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова, Бийск

В работе исследовались наноалмазы (НА) и поликристаллические наноалмазы (ПНА), полученные при детонации зарядов тринитротолуола с гексогеном и гексогена с графитом соответственно. Оценивались размеры кристаллитов рентгеноструктурным анализом, зернистость частиц по данным измерения удельной площади поверхности, устойчивые агломераты в водной суспензии. Показана эволюция размеров частиц и микроструктуры НА и ПНА, как в продуктах первичного синтеза (ППС), так и после химического обогащения.

Наноалмазы образуются в зоне химической реакции, остальные углеродные структуры продолжают расти в волне Тейлора. При изменении массы ВВ от 0,1 до 2,0 кг размеры кристаллитов, параметры решетки, содержание кристаллической фазы не изменяются. В зависимости от мощности, гетерогенности и пористости ВВ были получены наноалмазы с размерами кристаллитов $1,25 \div 32,4$ нм. Чем больше кристаллиты, тем выше доля кристаллической фазы и ниже микроискажения кристаллической решетки [1]. Размеры кристаллитов для НА и ПНА примерно равны, а зернистость отличается на порядок, что подтверждает поликристаллическую структуру ПНА. По данным элементного анализа и ИК-спектроскопии в ПНА в отличие от НА отсутствует азот [2]. Образование кристаллитов ПНА, происходит в графитовой частице, а поликристаллическая структура формируется в процессе обогащения. Этим можно объяснить более высокое содержание углерода и низкие значения микронапряжений для ПНА по сравнению с НА.

Параметры решетки НА и ПНА по сравнению с природным алмазом сжаты и микронапряжены, содержание аморфной фазы достигает 76%. Энтальпия образования, рассчитанная по теплоте сгорания, составляет $2560 \div 2950$ кДж/кг и многократно превышает значения для кристаллического алмаза. Избыточная энергия и аморфная фаза всегда присутствуют и в ППС. В практическом плане эти особенности проявляются в увеличении кристаллитов и зерна НА и ПНА при химическом обогащении, по сравнению с их размерами в ППС из которых они были выделены [3]. Увеличение размеров тем больше, чем выше температура процесса. Анализ показал, что увеличение размеров кристаллитов и зерна происходит за счет перекристаллизации аморфной фазы и формированием поликристаллов. При газофазном обогащении на воздухе с высоким темпом нагрева, были получены НА с размером кристаллитов 33,5 нм и размером зерна 90 нм [3].

Энергетическое воздействие на алмазные порошки (прокаливание, ультразвук) приводит к увеличению кристаллитов и зерна для НА и разрушению поликристаллической структуры для ПНА [3]. В водной суспензии НА и ПНА образуют устойчивые агломераты с размером $0,5 \div 100$ мкм и $0,5 \div 10$ мкм соответственно. Результаты могут быть полезными для технологии синтеза и практического применения детонационных наноалмазов.

Список литературы

1. *Петров Е. А., Ветрова А. А.* Кинетические и масс-энергетические аспекты детонационного получения наноалмазов. углеродские сообщения. – 2021. – Т. 68, № 10. – С. 59–65.
2. *Петров Е. А.* Кинетические аспекты детонационного получения наноалмазов. Южно-Сибирский научный вестник. – 2022. – Т. 44, № 2. – С. 99–105.

3. *Соловьева К. Н., Колесова А. А., Петров Е. А. и др.* Текстура поверхности и субструктура промышленных детонационных наноалмазов. Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – Т. 34, № 6. – С. 96–100.

Сравнительный анализ химического состава и структуры ультрадисперсных алмазов, полученных в различных условиях детонационного синтеза и очистки

А. В. Станкевич¹, Е. А. Петров^{2,3}, А. В. Соболевская¹, А. Р. Бакиров¹, А. А. Ветрова³

¹Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забахина, Снежинск

²Федеральный научно-производственный центр «Алтай», Бийск

³Бийский технологический институт Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова, Бийск

Ультрадисперсные алмазы (УДА), получаемые методами детонационного синтеза, находят широкое применение в различных областях науки и техники. Однако, условия их синтеза и отклонения от стационарности процессов детонации позволяют получать формы алмазов различные по структуре, строению и химическому составу [1]. С целью более тонкого понимания процессов формирования различных форм УДА, в том числе и нитридных [2] необходимы глубокие аналитические подходы и способы измерения энергетических состояний химических элементов. На сегодняшний день известно получение нитридных форм углерода не только в волне горения [2], но и в детонационных процессах [2, 3].

В данной работе проведены исследования химического и фазового состава, а также строения УДА, полученных при детонационном синтезе из смесей тротила с гексогеном и гексогена с графитом. Очистка проводилась смесью серной и хлорной кислот. Совмещённый теоретико-экспериментальный анализ энергии колебательных состояний молекулярных фрагментов показал присутствие в образцах незначительного количества азиновых фрагментов. Экспериментальное измерение колебательных состояний проводилось методами ИК-Фурье спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения и спектроскопии комбинационного рассеяния отражённого света. Для сравнительного анализа использовались образцы УДА по ТУ 2-037-677-94, после глубокой озоновой очистки [4,5]. В образцах сравнения данных колебательных состояний выявлено не было. Кроме того, проведён комплекс структурных исследований методами рассеяния и дифракции рентгеновского излучения.

В результате выявлены корреляционные зависимости микроморфологии частиц УДА, а также их химического состава от исходных продуктов и реактивов. Азиновые фрагменты в УДА образуются, предположительно через стадии образования аммиака и дициана [2] при взрывчатом превращении CHN и CHNO веществ.

Список литературы

1. Петров Е. А. Кинетические аспекты детонационного получения наноалмазов. Южно-сибирский научный вестник. – 2022. – № 4. – С. 99–105.
2. Stankevich A. V., Tolshchina S. G., Korotina A. V., Rusinov G. L., Chemagina I. V., Charushin V. N. Mechanism, Kinetics and Thermodynamics of Decomposition for High Energy Derivatives of [1,2,4]Triazolo[4,3-b][1,2,4,5]tetrazine. *Molecules*. – 2022. – V. 27. – P. 6966.
3. Kashkarov A. O., Prueel E. R., Ten K. A. et al. Detonation synthesis of non-agglomerated metallic nanoparticles deposited on carbon supports. *JPCS*. – 2019. – V. 1147, N 1. – P. 012037.

4. *Чухаева С. И.* Получение, свойства и применение фракционированных наноалмазов. Физика твердого тела. – 2004. – Т. 46, № 4. – С. 611.
5. *Филатов Л. И., Чухаева С. И., Детков П. Я.* Способ очистки ультрадисперсных алмазов. Пат. №20077476 РФ, С 01 В 31/00. РФЯЦ–ВНИИТФ. 20.04.1997. Б. № 11. 10 с.

Механизм образования различных форм нитрида углерода в волне горения и детонации

А. В. Станкевич^{1,2}, С. Г. Толщина¹, А. В. Коротина¹, Г. Л. Русинов¹

¹Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург

²Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

Путь к нитриду углерода [1] и созданию масштабных методов синтеза оказался весьма интересным, как с химической и физической точки зрения, так и с точки зрения способов получения [2]. На сегодняшний день известно большое количество различных модификаций нитрида углерода сформированного на основе гептазиновых или триазиновых фрагментов [2, 3].

В данной работе предпринята попытка систематизировать данные о механизмах образования различных форм нитрида углерода в волне горения и детонации с упором на механизмы термического разложения исходных компонентов. Общепринятый подход формирования нитрида углерода структуры графита ($g-C_3N_4$) посредством пиролиза меламина широко используется в практике изготовления фотокатализаторов [2–5] различного химического состава и базируется на реакции отщепления молекулы аммиака от триазиновых циклов с последующей полимеризацией. Однако, это не единственный путь формирования нитрида углерода, существует термобарический метод с перегруппировкой sp^2-sp^3 межатомарных связей углерода [6], а также метод конденсации из газовой фазы путём присоединения молекул дициана [7]. Подобный механизм может быть реализован в результате протекания химических реакций в форме горения и детонации с последовательным разложением вещества, сжатием газовой фазы и поликонденсацией нитрида углерода в графитовой или алмазной форме. Причём, на предполагаемой фазовой диаграмме, образование алмазного нитрида углерода возможно при давлениях свыше 55 ГПа.

Показаны возможные пути и механизмы образования различных форм нитрида углерода в волне горения и детонации при реакциях в полиазотсодержащих соединениях.

Данное исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение с Институтом органической химии им. Зелинского РАН № 075-15-2020-803, 01.10.2020).

Список литературы

1. Корсунский Б. Л., Пенекин В. И. На пути к нитриду углерода. Успехи химии. – 1997. – Т. 66, № 11. – С. 1003–1014.
2. Lotsch B. V., Schnick W. From Triazines to Heptazines: Novel Nonmetal Tricyanomelaminates as Precursors for Graphitic Carbon Nitride Materials. Chem. Mater. – 2006. – V. 18. – P. 1891–1900.
3. Thomas A., Fischer A., Goettmann F., Antonietti M., Müller J.-O., Schlögl R., Carlsson J.M. Graphitic carbon nitride materials: variation of structure and morphology and their use as metal-free catalysts. Journal of Materials Chemistry. – 2008. – V. 18, N 41. – P. 4893–4908.
4. Matsumoto S., Xie E.-Q., Izumi F. On the validity of the formation of crystalline carbon nitrides, C_3N_4 . Diamond and Related Materials. – 1999. – V. 8. – P. 1175–1182.

5. *Axet M. R., Durand J., Gouygou M., Serp P.* Chapter Two – Surface coordination chemistry on graphene and two-dimensional carbon materials for well-defined single atom supported catalysts. *Advances in Organometallic Chemistry.* – 2019. – V. 71. – P. 53–174.
6. *Кравченко О. В., Бурдина К. П., Трашин С. А., Кузяков Ю. Я., Леднев В. Н., Вороница Р. Д., Зоров Н. Б.* Термобарический синтез объемных образцов кристаллического нитрида углерода. *Вестн. моск. ун-та. сер. 2. химия.* – 2006. – Т. 47, № 4. – С. 266–268.
7. *Stankevich A. V., Tolshchina S. G., Korotina A. V., Rusinov G. L., Chemagina I. V., Charushin V. N.* Mechanism, Kinetics and Thermodynamics of Decomposition for High Energy Derivatives of [1,2,4]Triazolo[4,3-b][1,2,4,5]tetrazine. *Molecules.* – 2022. – V. 27. – P. 6966.

Изучение морфологии наночастиц металлов, образованных методом детонационного синтеза

Н. А. Хлебановский^{1,2}, А. О. Кашикар¹, К. А. Тен¹, Е. Ю. Герасимов³, Б. Л. Мороз³

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

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

³*Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск*

В данной работе приводятся результаты опытов по детонационному синтезу наночастиц металлов и их исследования методами ПЭМ, РФА и МУРР.

Оксалаты железа и меди, и ацетаты меди равномерно смешивались с порошками тэна и гексогена и затем изготавливались заряды двух типов – прессованные и насыпные. Соединения металлов в ходе термического разложения за детонационным фронтом являлись источниками свободных атомов металлов и их оксидов, из которых формировались наночастицы, предположительно по диффузионному механизму [1]. При разлёте продуктов детонации, их морфология, в том числе и содержащихся в них наночастиц металлов, может значительно меняться, например при взаимодействии со стенками взрывной камеры. Для минимизации влияния этого процесса заряды помещались в массивные ледяные оболочки.

В работе исследовалась зависимость морфологии наночастиц металлов от состава и структуры используемых взрывчатых составов. Сохраненные продукты детонации были охарактеризованы методами просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, рентгенофазового анализа и малоуглового рентгеновского рассеяния. Был проведён сравнительный анализ результатов.

В результате была выявлена зависимость распределения по размерам частиц от плотности ВВ, и показано, что доля порошка прекурсора при массовой доле в образце до 6% слабо влияет на размеры наночастиц металлов. Основной вклад в изменение распределения наночастиц металлов по размерам вносит исходная плотность взрывчатых составов.

Список литературы

1. *Б. П. Толочко, А. П. Чернышев, К. А. Тен и др.* Физико-химическая модель детонационного синтеза наночастиц из карбоксилатов металлов. ФММ. – 2008. – Т. 105, № 2. – С. 145–151.

Получение сплавов Cu – 10 мас. % Al с неравновесной структурой и исследование их свойств

*А. А. Ондар^{1,2}, Д. В. Дудина^{1,3}, А. В. Ухина¹, В. Ю. Ульяницкий³, М. А. Есиков³,
А. Г. Анисимов³*

¹*Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

³*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

Сплавы с неравновесной структурой перспективны с точки зрения получения материалов с новыми свойствами. Такие сплавы могут быть получены спеканием порошковых смесей в условиях быстрого нагрева.

Электроискровое спекание (ЭИС) представляет собой спекание порошков при пропускании постоянного электрического тока в импульсном режиме и приложении одноосного давления. Исследование структурных и фазовых превращений в системе Cu–Al в условиях электроискрового спекания представляет интерес, как с фундаментальной, так и прикладной точки зрения. В данной работе для сравнительного анализа порошковые смеси Cu–Al также спекали в условиях печного нагрева (ПН) и горячего прессования (ГП).

Исследованы фазовый состав, микроструктура и свойства сплавов Cu–10 мас.% Al, полученных ЭИС, ГП и ПН порошковых смесей. В условиях ЭИС при 480 °С в сплавах образуются интерметаллиды Cu₂Al и Cu₉Al₄ и твердые растворы Cu(Al). Показано, что размер частиц алюминия и время выдержки при максимальной температуре оказывают существенное влияние на фазовый состав и микроструктуру спеченных сплавов. Проведен сравнительный анализ фазового состава, микроструктуры и твердости сплавов, полученных ЭИС, ГП и ПН. Исследовано влияние предварительного прессования порошковой смеси на фазовый состав сплава.

Для реализации модельных экспериментов в слоистых системах Cu/Al методом детонационного напыления сформированы слои меди и алюминия на стальной подложке. В докладе будут представлены результаты исследования межфазных взаимодействий в напыленных слоях, подвергнутых нагреву в условиях пропускания электрического тока и горячего прессования.

Остаточные напряжения в детонационных покрытиях, обусловленные наклепом

В. Ю. Ульяницкий, Д. К. Рыбин, А. Ю. Ларичкин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

В деталях с порошковыми покрытиями, нанесенными методами газотермического напыления (детонационное, плазменное, газопламенное, холодное газодинамическое и др.) практически всегда присутствуют остаточные напряжения [1,2]. Они складываются из двух компонент. Одна обусловлена наклепом, связанным с ударом высокоскоростных частиц (дробеструйная обработка) по обрабатываемой поверхности и приводящем к появлению сжимающих напряжений. Вторая носит термическую природу, приводит к появлению растягивающих напряжений и связана с усадкой при остывании напыляемых частиц на подложке. Цель настоящей работы заключалась в изучении напряжений, связанных с первой компонентой – наклепом, и разработке подхода для их прогнозирования. Остаточные напряжения определялись экспериментально по прогибу тестовых стальных полосок после дробеструйной обработки (метод Альмена) [3].

Наклеп тестовых полосок производили на установке детонационного напыления CCDS2000, выполняя выстрелы порциями сфероидизированных частиц SiO_2 в режимах, не приводящих к формированию покрытия. Использовалась стеклянная дробь для дробеструйной обработки и очистки поверхностей, производитель компания SAPI (г. Тула) с твердостью частиц 47 HRC (500 HV). На основе экспериментальных данных получены инженерные формулы для определения зависимости глубины наклепа δ и средних остаточных сжимающих напряжений σ в наклепанном слое металлической пластины от размера бомбардирующих мишень частиц, их плотности и скорости, а также от прочности материала пластины:

$$\delta = 1,93 \cdot D \cdot \nu \sqrt{\rho/\sigma_{0,2}}, \quad (1)$$

где D – диаметр частиц, ρ – плотность частиц, ν – скорость частиц, $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести обрабатываемого материала, и

$$\sigma = k\sigma_{0,2} \left[1 - \exp \left(-a \cdot \frac{m}{\rho_s \delta} \right) \right], \quad (2)$$

где m – масса частиц, соударявшихся с единицей поверхности детали, ρ_s – плотность материала обрабатываемой детали, δ – толщина наклепанного слоя, рассчитанная по формуле (1), k и a – числовые коэффициенты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (номер проекта 22-29-00485 <https://rscf.ru/project/22-29-00485/>).

Список литературы

1. *Rybin D. K., Batraev I. S., Dudina D. V., Ukhina A. V., Ulianitsky V. Yu.* Deposition of tungsten coatings by detonation spraying. *Surf. Coat. Technol.* – 2021. – V. 409. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126943>.
2. *Clyne T. W., Gill S. C.* Residual Stresses in Thermal Spray Coatings and Their Effect on Interfacial Adhesion: A Review of Recent Work. *J. Therm. Spray Tech.* – 1996. – V. 5, N 4. – P. 401–418.

3. *Guagliano M.* Relating Almen intensity to residual stresses induced by shot peening: a numerical approach. *J. Mater. Process. Technol.* – 2001. – V. 110. – P. 401–418.

Соударение микро и нано-частиц с преградой и образование интерметаллидного покрытия

С. П. Киселев, В. П. Киселев

*Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск*

В докладе представлены результаты численного моделирования соударения микро и наночастиц с преградой при условиях ХГН [1]. В рамках упругопластической модели с учетом теплопроводности методом SPH решена задача о соударении микрочастицы алюминия (Al) диаметром 20 мкм с преградой титана (Ti) со скоростью 550 м/с [2]. Показано, что при соударении не происходит плавления микрочастицы Al. Максимальный нагрев Al происходит вблизи контактной границы Al-Ti и не превосходит 200 °С.

Для объяснения механизма образования адгезии (прилипания частицы к преграде) методом молекулярной динамики (МД) была решена задача о соударении наночастицы диаметром 10 нм с преградой со скоростью 550 м/с. Были рассмотрены два случая соударения наночастицы с преградой. В первом случае моделировалось соударение наночастицы Al с преградой Ti, а во втором – соударение наночастицы Ti с преградой Al. При соударении также не происходило плавления в наночастице и преграде. В результате соударения возникала прочная интерметаллидная химическая связь между наночастицей и преградой. Для оценки прочности соединения методом МД проводилось моделирование отрыва наночастицы от преграды. Было показано, что в обоих случаях разрушение происходит в материале Al, а область интерметаллида между Al и Ti остается неразрушенной. Обнаружено, что во втором случае прочность соединения наночастицы Ti с преградой Al лучше, чем в первом случае соединения наночастицы Al с преградой Ti.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН.

Список литературы

1. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. Под ред. В.М. Фомина. – Москва : Физматлит, 2010. – 535 с.
2. Киселев С. П., Киселев В. П., Ворожцов Е. В. Численное моделирование методом сглаженных частиц процесса соударения частицы алюминия с преградой из титана. ПМТФ. – 2022. – Т. 63. № 6. – С. 150–165.

Инициирование реакций подвижным источником энергии

А. Г. Князева, О. Н. Крюкова, М. А. Анисимова, Ю. А. Чумаков

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

В условиях поверхностной обработки материалов, нанесения покрытий, создания изделий в 3D – технологиях с использованием смесей компонентов, способных к химическим взаимодействиям, возникают задачи, подобные задачам теории горения и взрыва. Так, в условиях инициирования реакций движущимся лазерным или электронным лучом химические реакции начинаются после создания теплового пограничного слоя достаточных размеров и аккумуляирования в смеси достаточного количества тепла. После инициирования реакции могут распространяться самостоятельно с формированием узкой зоны реакции, в управляемом режиме с достаточно широкой зоны реакции, которая обеспечивается бегущим внешним воздействием или в форме спонтанного превращения, которое реализуется уже после того, как источник тепла покинет обрабатываемый образец [1]. Подобные режимы реализуются и в условиях ЛОМ [2] – создания ламинированных объектов. В теории горения известны работы, посвященные инициированию взрыва в условиях трения. Для выработки критериев инициирования реакций установления стационарных и квазистационарных режимов в условиях современных технологий предприняты специальные исследования, в которых использовался опыт теории горения и взрыва. Для образцов конечных размеров, например, вводится время полупревращения, соответствующее времени превращения среднеинтегральной концентрации реагентов в продукты. Для поиска критериев установления квазистационарных режимов используются разные термодинамические характеристики – избыток энтальпии, запас тепла в прогревом слое, производство энтропии и др. Применительно к синтезу композитов из смесей TiAl, Ti-CuO, Al-CuO, Ti-Al-Fe₂O₃, Al-TiO₂ в условиях лазерных технологий предложено обобщение моделей теории горения и взрыва с реакционными ячейками, в отличие от которых при описании кинетики используются редуцированные схемы реакций и исследуется эволюция сопутствующих синтезу напряжений и деформаций. Т.е., осуществлен переход к двухуровневым моделям [3], примеры которых содержатся в [4, 5].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 22-11-00100, <https://rscf.ru/project/22-11-00100/>.

Список литературы

1. *Bakinovskii A. A., Knyazeva A. G., Krinitcyn M. G., Kryukova O. N., Pobol I. L., Fedorov V. V., and Rajczyk J.* Electron Beam Assisted Deposition of Ni–Al Coatings onto Steel Substrate. *Journal of SHS*. – 2019. – V. 28, N 4. – P. 245–255.
2. *Knyazeva A., Travitzky N.* Modes of adhesive bonding layer formation during roll motion in the process of laminated object creation. *HighTempMatProc..* – 2023. – V. 27, N 1. – P. 67–96.
3. *Knyazeva A. G.* O A two-level approach to describing the process of composite synthesis. *Rev. Adv. Mater. Technol.* – 2022. V. 4, N 3. – P. 7–16.
4. *Kryukova O. N., Knyazeva A. G.* Two-level model controlled synthesis of a composite on a substrate. *Multiscale Science and Engineering*. – 2023. <https://doi.org/10.1007/s42493-023-00091-6>
5. *Knyazeva A. G., Anisimova M. A.* Two-level model of composite synthesis on a substrate from a powder mixture of TiO₂ and al. 1. Model description and simple examples. *Nanoscience and Technology: An International Journal* – 2023. – V. 14, N 3. – P. 73–102.

Сварка взрывом малопластичных сталей

Б. С. Злобин, В. В. Киселев, А. А. Штерцер, И. С. Батраев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

При сварке взрывом (СВ) малопластичных материалов требуется уменьшать деформации, чтобы избежать трещинообразования. Эксперименты показали, что физико-механические свойства соударяющихся материалов, в частности твердость, оказывают существенное влияние на размер волн [1, 2]. С другой стороны, сварку твердых непластичных материалов приходится выполнять при более высоких скоростях точки контакта V_K и углах соударения γ поскольку, как отмечают авторы большинства работ, в которых определяется положение нижней границы сварки взрывом, положение этой границы СВ прежде всего определяется прочностными характеристиками материала. Чаще всего за величину, характеризующую динамическую прочность материала, принимают твердость по Виккерсу HV [3, 4]. В этих условиях увеличение размеров волн часто приводит к трещинообразованию. Поэтому наилучшим решением для малопластичных материалов является сварка без волнообразования на границе соединения.

Зона безволновой сварки имеет на $V_K - \gamma$ диаграмме левую и правую границы. Левая связана с переходом от отсутствия к наличию сварки, а правая с переходом от безволновой к волнообразной границе соединения. В проведенных экспериментах по сварке взрывом стальных пластин как не термообработанных, так и подвергнутых закалке и имеющих разную твердость и пластичность, определялось положение на $V_K - \gamma$ диаграмме границ области СВ с безволновой границей соединения в зависимости от твердости свариваемых пластин.

Сварка производилась в диапазоне углов соударения пластин $\gamma = 10^\circ \div 13^\circ$. Твердость HV стальных пластин изменялась в диапазоне от 1300 МПа до 6400 МПа. Из каждого образца изготавливался макрошлиф для определения формы границы соединения. В качестве граничных значений начала волнообразования принимались значения V_K при которых сваренные образцы имели границу соединения с участками как прямолинейной, так и волнообразной формы

Экспериментально показано, что увеличение твердости оказывает слабое влияние на положение границы волнообразования на $V_K - \gamma$ диаграмме (правая граница) и сильнее влияет на положение левой границы этой зоны – границы сварки. Вследствие этого с увеличением твердости стальных пластин диапазон значений V_K при которых происходит сварка без волнообразования сужается.

Проведенные испытания на прочность сварного соединения не выявили различия в прочности образцов с волновой и прямолинейной границей соединения.

Список литературы

1. Злобин Б. С., Киселев В. В., Штерцер А. А., Пластинин А. В. Использование эмульсионных взрывчатых веществ в экспериментальных исследованиях течений в зоне соединения при сварке взрывом. ФГВ. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 114–121.
2. Злобин Б. С., Киселев В. В., Штерцер А. А. О влиянии механических свойств материалов на волнообразование при сварке взрывом. ФГВ. – 2019. – Т. 55, № 4. – С. 74–81.
3. Дерibas А. А., Захаренко И. Д. О поверхностных эффектах при косых соударениях металлических пластин. ФГВ. – 1974. – Т. 10, № 3. – С. 409–423.
4. Захаренко И. Д., Злобин Б. С. Влияние твердости свариваемых материалов на положение нижней границы сварки взрывом. ФГВ. – 1983. – Т. 19, № 3. – С. 170–174.

Сварка взрывом титана с алюминиево-магниевыми сплавами и особенности разрушения соединений

М. П. Королев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Е. В. Кузьмин

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

Алюминиево-магниевые сплавы с высоким содержанием магния (АМг5, АМг6) плохо свариваются взрывом в разнородных сочетаниях. Это означает, что из-за узости диапазона свариваемости получить соединение между материалами не всегда представляется возможным, а механические свойства этих соединений оказываются невысокими. Причины плохой свариваемости алюминиево-магниевых сплавов остаются неизвестными до сих пор. Установление этих причин позволило бы разработать технологические меры для получения прочных соединений, а также способствовало бы лучшему пониманию процессов, обуславливающих явление сварки взрывом.

Увеличение содержания магния в алюминиевых сплавах приводит к повышению твердости, пределов текучести и прочности. Исходя из существующих представлений о сварке взрывом, следует ожидать, что увеличение механических свойств повлияет на положение нижней «энергетической» границы области свариваемости пары.

Был проведен эксперимент по сварке ВТ1-0 со сплавами АМг2, АМг3, АМг5, целью которого было определение положения нижней «энергетической» границы области свариваемости различных алюминиево-магниевых сплавов с титаном. Образцы сваривали при режимах, близких к нижней границе области свариваемости, энергию пластической деформации W_2 изменяли в диапазоне $0,39 \div 1,0$ МДж/м². Все соединения АМг2 с титаном были равнопрочными и разрушались по основному металлу, соединения АМг3 также имели высокую прочность, но в ряде случаев разрушение происходило по границе между материалами. Соединения АМг5 с титаном имели низкую прочность при большом разбросе значений и разрушались по границе. На основании результатов исследования поверхностей разрушения слоёв, разделенных в ходе испытаний, был сделан вывод о том, что равнопрочное соединение между титаном и АМг5 образовывалось не по всей площади поверхности контакта.

В следующей части эксперимента сваривали соединения ВТ1-0 со сплавами АМг2, АМг3, АМг5, АМг6 при режимах, близких к верхней границе области свариваемости, при $W_2 = 1,2 \div 1,65$ МДж/м². В этой части эксперимента все соединения АМг2 с титаном также были равнопрочными, прочность соединений АМг3 с титаном была на уровне основного металла, однако при $W_2 = 1,54 \div 1,65$ МДж/м² произошло резкое снижение прочности. Часть соединений АМг5 и АМг6 с титаном разрушилось после сварки, а сохранившиеся соединения имели низкую прочность. Изучение поверхностей разрушения несварившихся образцов и соединений АМг5 и АМг6, разрушенных при испытаниях на отрыв слоёв, выявило схожий характер разрушения. На поверхности титанового слоя оставалась прослойка алюминиевого сплава, занимавшая до 90% площади титана, строение поверхности которой говорило о хрупком характере разрушения. Исходя из этого, был сделан вывод, что слабым местом соединения является не граница между материалами, а приграничная область алюминиевого сплава. Изучение зёрненного строения алюминиевого сплава в этой области показало, что на границе с титаном формируется прослойка толщиной около 5 мкм, состоящая из рекристаллизованных зёрен с размерами около 0,5 мкм. Разрушение соединений происходит в значительной мере по границе между этой прослойкой и основным металлом со структурой вытянутых зёрен, а рекристаллизованная прослойка при разрушении остаётся на титановом слое.

Работа выполнена при финансовой поддержке ВолгГТУ в рамках научного проекта №15/463-22.

Определение теплового потока от ударно сжатого газа перед точкой контакта к поверхности пластин при сварке взрывом

С. В. Хаустов¹, В. В. Пай², С. В. Кузьмин¹, В. И. Лысак¹, А. Д. Кочкалов¹

¹Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

При сварке взрывом в промежутке между пластинами образуется область ударно-сжатого газа, нагретого до нескольких тысяч градусов, обеспечивающего конвективный теплообмен с поверхностями свариваемых пластин и оказывающего влияние на тепловую ситуацию на границе соединения, приводя к увеличению количества оплавленного металла и параметров волнового профиля. При этом, время воздействия ударно-сжатого газа возрастает с увеличением размеров свариваемых пластин.

В работе определен тепловой эффект предварительного подогрева пластин перед точкой контакта при их обтекании сверхзвуковым газовым потоком в условиях сварки взрывом при скоростях детонации $1,8 \div 2,5$ км/с. Для этого в зазоре на различном расстоянии от начала сварки ($0,4 \div 1,3$ м) размещались батареи малоинерционных медь-константановых планарных термопар позволяющих регистрировать термо-ЭДС в течение всего времени воздействия ударно-сжатого воздуха в зазоре. Термопары были изготовлены из константановой фольги толщиной ~ 200 мкм, на которую электролитическим способом наносилась медь толщиной ~ 3 мкм. Тепловой поток от ударно-сжатого газа к поверхности медных слоев термобатареи находился решением обратной тепловой задачи по известной зависимости температуры границы «медь-константан» определенной экспериментально. Полученные таким образом значения теплового потока позволяют определить температуру предварительного подогрева свариваемых взрывом пластин в зависимости от их размеров еще до их соударения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00942, <https://rscf.ru/project/23-29-00942/>.

Исследование параметров ударно-сжатого газа, образующегося в зазоре между соударяемыми пластинами в процессе сварки взрывом

Н. Н. Ниёзбеков¹, А. Ю. Малахов¹, И. В. Денисов¹, И. В. Сайков¹, Д. В. Шахрай²,
В. А. Сосиков²

¹Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мер-
жанова РАН, Черноголовка

²Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской
химии РАН, Черноголовка

При сварке взрывом на воздухе в зазоре между пластинами образуется ударно-сжатый газ (УСГ), оказывающий влияние на вид и свойства границы соединения (волнообразный или прямолинейный вид границы соединения, наличие зон перемешивания и плавлений, механические свойства).

Целью настоящей работы было определение параметров УСГ в зазоре при получении биметалла алюминиево-магниевый сплав АМг6+коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т в процессе сварки взрывом.

Теоретический расчет параметров УСГ (давление, плотность, температура и длина) проводили по методике, представленной в работе [1]. Давление, плотность и температура в области УСГ составили $6,72 \cdot 10^6$ Па, $9,02$ кг/м³ и 2645 К соответственно. Согласно расчету, длина УСГ увеличивается по мере движения точки контакта. На длине $0,3$ м длина УСГ составляет около $0,028$ м при времени воздействия около 11 мкс. Расчетные данные для области УСГ подтверждаются экспериментальными результатами скоростной фотосъёмки сварочного зазора. Было установлено, что высокотемпературная область УСГ движется впереди точки контакта (рис. 1.) со скоростью 3200 м/с тем самым, опережая фронт детонации взрывчатого вещества (2700 м/с).

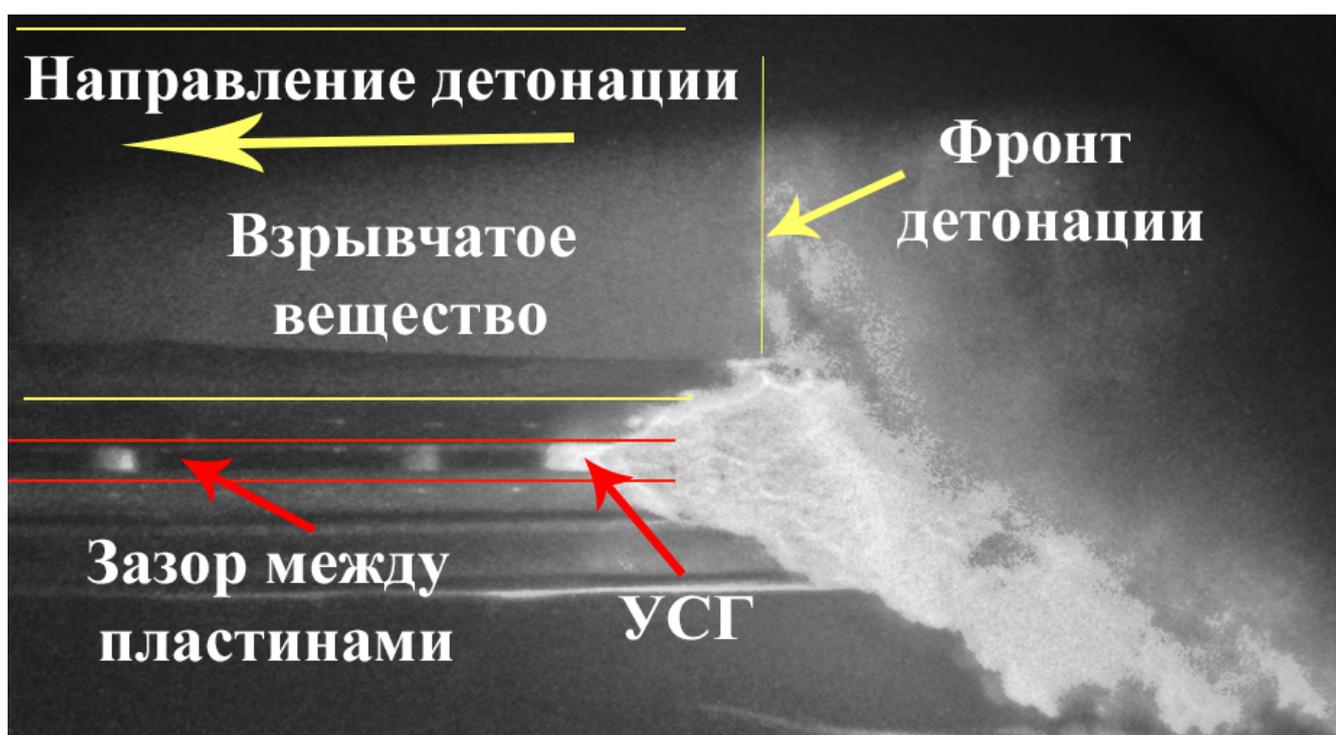


Рис. 1: Фотокадр с изображением процесса сварки взрывом

Таким образом, установлено, что результаты скоростной фотосъемки зазора в процессе сварки взрывом подтверждают данные, полученные расчётным методом. Исходя из результатов ясно, что высокотемпературная область УСГ может значительно влиять на процесс сварки взрывом и приводить к нагреванию поверхностных слоев еще до момента соударения пластин.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00446, <https://rscf.ru/project/23-19-00446/>.

Список литературы

1. *Pervukhin L. B., Pervukhina O. L.* Interaction of impact-compressed gas in the welding gap with the welded surfaces in explosive welding. *Welding International*. – 2017. – V. 31, N 6. – P. 457–461.

Особенности формирования структуры и свойств создаваемых высокоэнергетическими методами композиционных материалов сталь+алюминий

Е. В. Кузьмин, М. П. Королев, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

Существующее многообразие методов изготовления композиционных материалов, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки, не позволяет в полной мере удовлетворить требования научно-технического прогресса. Развитие отраслей промышленности, создающих наукоемкую продукцию для предприятий электрометаллургии, энергетики и нефте- и газодобывающих и перерабатывающих производств, связано с инновациями в сфере получения новых материалов (в частности, композитов) и оптимизации процессов их изготовления. В настоящее время в мировой науке отчетливо наблюдаются следующие пути решения данной проблемы: разработка и внедрение качественно новых материалов или технологий их получения, либо придание известным материалам ряда уникальных эксплуатационных свойств. Одним из направлений повышения технологичности изготовления композиционных материалов является разработка технологий, основанных на воздействии на материалы несколькими высокоэнергетическими источниками энергии, в результате чего создается возможность получения уникальных свойств, как самих материалов, так и их соединений, которые невозможно достичь внешними источниками энергии иной природы [1].

Ранее была разработана методика получения высококачественных композитов нового типа, основанная на высокоскоростном соударении металлических пластин в условиях нагружения скользящей детонационной волной с одновременным воздействием на соударяющуюся систему ультразвуковых волн. Результаты проведенных исследований показывают целесообразность применения ультразвука в ходе взрывного нагружения, выражающееся в повышении качества получаемых соединений и расширения области свариваемости соединяемых металлов. Изменение характеристик зоны соединения указывает на то, что диссипация энергии после соударения происходит по разным механизмам, следовательно, меняется энергетический баланс процесса формирования соединения [2].

В данной работе рассмотрена возможность применения ультразвука при сварке взрывом алюминия со сталью для улучшения качества соединений и расширения их области свариваемости. Показано, что воздействие акустических колебаний на неподвижную стальную пластину при сварке взрывом алюминия со сталью способствует уменьшению количества оплавленного металла на границе соединения. При сварке взрывом алюминия со сталью, участки оплавленного металла, образующиеся на границе между материалами, имеют структуру мелкодисперсной механической смеси твердого раствора железа в алюминии с включениями частиц интерметаллида $FeAl_3$. Наличие прослойки оплавленного металла с подобной структурой и толщиной до $18 \div 19$ мкм не приводит к снижению прочности соединения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00217, <https://rscf.ru/project/22-79-00217/>.

Список литературы

1. *Лысак В. И., Кузьмин С. В.* Сварка взрывом. – М.: Машиностроение-1. – 2005. – 544 с.
2. *Kuz'min E. V., Lysak V. I., Kuz'min S. V., Korolev M. P.* Influence of structure formation and properties of bimetal produced by ultrasound-assisted explosive welding. *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Т. 71. – Р. 734–742.

Особенности структурообразования границ раздела кристаллических и аморфных пластин при магнитно-импульсной сварке

Д. В. Лазуренко¹, А. Г. Анисимов², А. А. Иванников³, Н. С. Попов³

¹Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Металлические стекла являются перспективными материалами конструкционного назначения, что обусловлено повышенным комплексом их физико-механических характеристик. Однако их применение ограничено низкой термической стабильностью и малыми габаритами получаемых заготовок. При этом металлические стекла могут эффективно использоваться для армирования материалов с металлической матрицей [1]. Выбор метода производства композитов такого типа должен производиться с учетом обеспечения минимального нагрева, который может приводит к кристаллизации аморфной структуры и снижению комплекса свойств. Таким методом является сварка высокоскоростным соударением, в частности сварка взрывом или магнитно-импульсная сварка. В то время, как сварка взрывом аморфных и кристаллических пластин уже в какой-то мере изучена [2], магнитно-импульсная сварка применяется для формирования соединений такого типа довольно редко. В связи с этим интерес представляет изучение особенностей формирования аморфно-металлических композиций данным методом.

В работе были сформированы трехслойные пакеты, состоящие из поликристаллических титановых пластин и фольг из быстрозакаленных сплавов. Были изучены структурные особенности границы раздела между аморфными и кристаллическими заготовками, формирующиеся при высокоскоростном соударении. С использованием результатов конечно-элементного моделирования были проанализированы процессы, происходящие при различных режимах соударения пластин. Было показано, что соединение данным методом обеспечивает сохранение аморфного состояния быстрозакаленных сплавов. В локальных зонах границ раздела происходят процессы механического перемешивания поверхностных слоев свариваемых заготовок. При этом кристаллизации в зонах перемешивания также не происходит, что обеспечивается низким нагревом поверхностных слоев в процессе соударения. Таким образом, можно заключить, что магнитно-импульсная сварка является эффективным методом формирования аморфно-кристаллических композиций, позволяющим сохранить разупорядоченное состояние быстрозакаленного сплава. Основным направлением исследований в данной области является обеспечение качественного сварного соединения по всей площади заготовок.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-23-00953, <https://rscf.ru/project/22-23-00953>.

Список литературы

1. Scudino S., Surreddi K. B., Sager S. et al. Production and mechanical properties of metallic glass-reinforced Al-based metal matrix composites. *Journal of Materials Science*. – 2008. – V. 43. – P. 4518–4526.
2. Chiba A., Kawamura Y., Nishida M., Yamamuro T. Explosive Welding of ZrTiCuNiBe Bulk Metallic Glass to Crystalline Cu Plate. *Materials Science Forum*. – 2011. – V. 673. P. 119–124.

Получение неравновесных твердых сплавов взрывным прессованием смесей порошков без спекания

В. О. Харламов, А. В. Крохалев, Д. Р. Черников, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

В настоящее время твердые сплавы чаще всего получают путем прессования исходных смесей порошков тугоплавких карбидов с металлами и спекания. Это накладывает определенные ограничения на подбор состава материалов, связанные, прежде всего, с химической совместимостью компонентов сплавов. При этом, как правило, используются квазиэвтектические системы, такие, например, как WC-Co. Отличительной особенностью подобных систем является появление жидкой фазы при температурах, существенно меньших, чем температуры плавления исходных компонентов сплава, что собственно, и обеспечивает качественное спекание, и практически полное восстановление исходного фазового состава при охлаждении.

Весьма интересной с научной точки зрения является возможность обойти данное ограничение путем использования при компактировании порошковых смесей карбидов с металлами энергии взрыва. Взрывная обработка порошков позволяет одновременно достигать и давлений, достаточных для уплотнения порошков до практически беспористого состояния, и температур, достаточных для сварки структурных компонентов порошкового материала в единое целое, что исключает необходимость последующего спекания прессовки. Отказ от операции спекания твердых сплавов позволяет использовать для их получения компоненты, являющиеся несовместимыми с точки зрения термодинамики, такие, как Cr₃C₂-Ti, WC-Ti или SiC-Ti, т.е. использовать системы, исходный состав которых принципиально отличается от равновесного.

Получение твердых сплавов и покрытий из смесей порошков карбидов и металла взрывным прессованием предполагает решение двух основных задач: уплотнение порошковой смеси и формирование прочных поверхностей раздела между компонентами порошкового покрытия и между покрытием и основой.

Представлены основные закономерности компактирования порошковых смесей карбида хрома и карбида кремния с титановой связкой при взрывном прессовании; выявлены условия, обеспечивающие получение плотности прессовок, близкой к плотности монолитного материала. Исследованы основные закономерности формирования и особенности тонкого строения межфазных границ в порошковых материалах на основе карбида хрома и карбида кремния с титановой связкой; выявлены условия, обеспечивающие получение консолидированных твердых сплавов на стадии прессования.

Уплотнение порошковых смесей карбидов с металлами при взрывном прессовании происходит за счет движения материала частиц компонента смеси, имеющего не высокую акустическую жесткость, вне зависимости от его прочностных свойств и пластичности: титана в смеси Cr₃C₂-Ti или карбида кремния в смеси SiC-Ti. Использование взрывного нагружения смесей порошков карбидов с металлами обеспечивает возможность получения консолидированных твердых сплавов из компонентов, не образующих традиционно используемую в практике порошковой металлургии квазиэвтектическую систему. При этом их фазовый состав не изменяется, соответствует фазовому составу исходных порошковых смесей и является термодинамически неравновесным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 23-13-00354).

Получение метастабильных водород-сорбционных материалов системы Ti-Fe с помощью взрывного прессования и спекания

*А. В. Крохалев, В. О. Харламов, Д. Р. Черников, О. О. Тужиков, В. И. Лысак,
С. В. Кузьмин*

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

Исследована возможность получения термодинамически неравновесных материалов на основе системы Ti-Fe, перспективных для водородной энергетики [1]. Взрывное нагружение и последующее спекание при 1100 °С с охлаждением на воздухе порошковой смеси, с соотношением титана и железа, равным 62/38, приводит к образованию двухфазной структуры (рис. 1, а). Сплав состоит из интерметаллического соединения TiFe, Ti₂Fe и сопутствующих примесей (соединений титана с кислородом, азотом и углеродом). При увеличении содержания титана в изначальной порошковой смеси до 70% приводит к получению трехфазной структуры, состоящей из Ti₂Fe, эвтектики TiFe+β-Ti (рис. 1, б).

Материал, с соотношением Ti-Fe, равным 70/30 ат.%, после термической обработки с нагревом до 1100 °С и последующим быстрым охлаждением в потоке аргона, имеет практически однофазную структуру Ti₂Fe с примесями оксикарбонитрида титана (рис. 1, в).

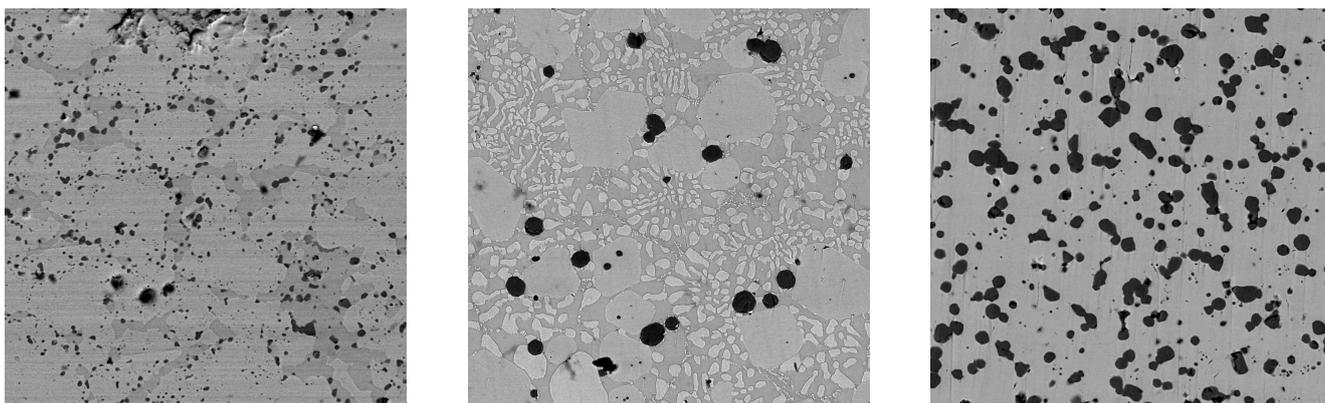


Рис. 1: Структуры материалов с различным соотношением Ti и Fe: 62/38 ат.% (а), 70/30 ат.% (б), полученных с охлаждением на воздухе и 70/30 ат.% (в), полученных с охлаждением в потоке аргона.

Работа выполнена при финансовой поддержке ВолгГТУ в рамках научного проекта №6/464-22.

Список литературы

1. А. В. Крохалев, В. О. Харламов, Д. Р. Черников, О. О. Тужиков, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак Исследование влияния содержания титана на водородсорбционные свойства материалов системы «титан-железо». Известия ВолгГТУ. Сер. Metallургия. – 2022. – Т. 266, № 7. – С. 7–12.

Изменения структуры алюминия в зоне соударения со стальным шариком, движущимся со сверхзвуковой скоростью

*А. Е. Макаренко¹, И. С. Кульбакин¹, Л. И. Квеглиц¹, А. Г. Анисимов² Б. П. Толочко³,
Н. И. Разумов³*

¹Восточно-Казахстанский университет им. С. А. Аманжолова, Усть-Каменогорск

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

³Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск

Актуальность. Для увеличения срока службы деталей машин и агрегатов, работающих в условиях абразивного износа, часто используются износостойкие покрытия, полученные путем наплавки. В последнее время становится все более перспективным применение износостойких сплавов, содержащих алюминий как основной легирующий компонент. Сплавы на основе алюминия и железа формируют твердые растворы, интерметаллические соединения и эвтектику. Хотя свойства этих фаз в системе алюминий-железо различны, присутствие таких фаз может существенно ухудшить механические свойства сплавов и сделать их малоприменимыми в промышленности. Однако, сплавы, содержащие фазу Fe_2Al_7 в отожженном состоянии, и сплавы с интерметаллидной фазой Fe_3Al имеют высокую прочность, особенно при сжатии.

Цель. Цель данной работы: изучение фазового состава слоя, образовавшегося на стальном шарике при пробивании им двух пластин дюралюминия со скоростью 815 м/с (первая пластина) и 550 м/с (вторая пластина).

Результаты. На рисунках 1,2 приведены изображения, полученные в растровом электронном микроскопе со сваренных участков стального шарика и дюралюминия с различными увеличениями.

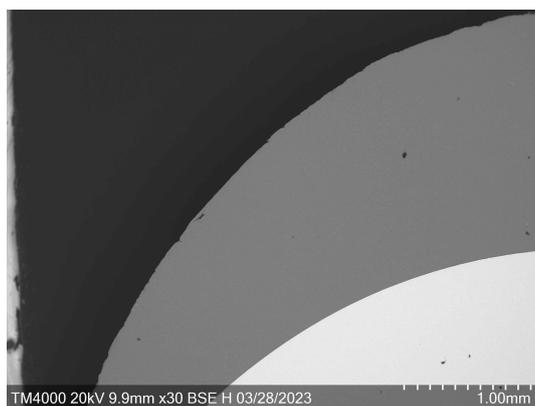


Рис. 1: Изображение в растровом электронном микроскопе Hitachi TM4000 поперечного среза стального шарика (белый цвет), покрытого слоем, налипшим от дюралюминиевой пластины (серый цвет).

Рентгенофазовый анализ. Рентгенофазовый анализ на дифрактометре «Bruker» деформированного образца дюралюминиевой пластины, спаянной со стальным шариком, выявил образование фазы Fe_3Al .

Al, %	Mn, %	Fe, %
91,33	2,40	6,27

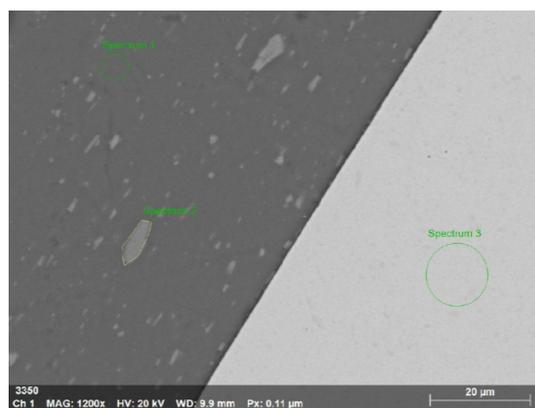


Рис. 2: Изображение в растровом электронном микроскопе Hitachi TM4000 поперечного среза стального шарика (белый цвет), покрытого слоем, налипшим от дюралюминиевой пластины (серый цвет). Использован спектральный микроанализ. В таблице приведены данные, полученные от налипшего участка.

1. Обнаружены продукты механохимических реакций в результате взаимодействия стального шарика, прошедшего через дюралевые пластины со сверхзвуковой скоростью.
2. С помощью растровой электронной микроскопии и микроанализа выявлен anomalно быстрый массоперенос частиц стального шарика в дюралюминий.
3. Рентгенофазовый анализ деформированного образца дюралюминиевой пластины, спаянной со стальным шариком, выявил образование фазы Fe_3Al .
4. Предполагается возможность упрочнения поверхности за счет налипания высокопрочных слоев при высокоскоростном соударении.

Список литературы

1. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. – Новосибирск: Наука. – 1980. — 224 с.

Схождение медных толстостенных оболочек под действием взрыва

*В. И. Зельдович¹, А. Э. Хейфец¹, И. В. Хомская¹, Д. Н. Абдуллина¹, С. В. Балмушкин²,
А. Ю. Симонов², Г. В. Куликов²*

¹Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург

²Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

Металлографическим методом исследован процесс схождения медных толстостенных цилиндрических оболочек под действием взрыва. Цилиндрические толстостенные оболочки из меди М1 были подвергнуты взрывному нагружению. Размеры оболочек и детали нагружения представлены в таблице 1.

Таблица 1: Размеры оболочек и характеристики взрывного нагружения

Номер оболочки	Диаметр/толщина, мм	5/К	Длина, мм	Толщина слоя ВВ, мм	Толщина корпуса, мм	Толщина прокладки, мм
1	60/8	0,266	250	2	20	5
2			300	3		

Средний участок оболочек был окружен слоем ВВ. Толщина слоя была разной для нагружаемых оболочек. Для задержки разлета продуктов взрыва, система была окружена корпусом из стали 10. Между поверхностью оболочек и слоем ВВ располагали прокладки из пенопласта, для сглаживания формы ударного импульса. Детонационная волна создавала на поверхности оболочек ударную волну, под действием которой происходило инерционное схождение оболочки к оси симметрии. В работах [1–3] схождение оболочек под действием скользящей детонации осуществляли с использованием кольцевой системы инициирования ВВ. Для такого способа инициирования требуется свободный доступ к торцу оболочки, что осложняет его применение. В настоящей работе инициирование накладного ВВ было выполнено из восьми точек, равномерно расположенных по окружности на цилиндрической поверхности оболочек. Этот способ более простой для практического применения.

Было установлено, что при неполном схождении на внутренней поверхности оболочки образовалось восемь выступов, то есть произошла потеря устойчивости гладкого фронта деформации. Предложен механизм образования выступов, основанный на действии маховских волн с большой амплитудой давления, возникающих в оболочке при взаимодействии соседних ударных волн. Образование и развитие выступов способствует схождению оболочки в цилиндр.

Установлено, что высокоскоростная деформация меди при схождении оболочек осуществляется преимущественно двойникованием. В наружных зонах оболочек двойникование преобладает. Во внутренних зонах двойников меньше. В процессе схождения температура внутренней части оболочек повышается, и это приводит к изменению механизма деформации. Обнаружены участки локализованной деформации внутри и вокруг выступов, что связано с данным методом инициирования взрыва.

Список литературы

1. Зельдович В. И., Хейфец А. Э., Фролова Н. Ю., Дегтярев А. А., Смирнов Е. Б., Шорохов Е. В. Металлографическое исследование схождения медных цилиндрических оболочек при различной интенсивности взрывного нагружения. ФММ. – 2021. – Т. 122, № 6. – С. 608–613.

2. Зельдович В. И., Фролова Н. Ю., Хейфец А. Э., Долгих С. М., Гаан К. В., Шорохов Е. В. Деформационные и термические процессы, происходящие при высокоскоростном схлопывании массивной цилиндрической оболочки из меди. ФММ. – 2018. – Т. 119, № 6. – С. 573–581.
3. Зельдович В. И., Фролова Н. Ю., Хейфец А. Э., Хомская И. В., Дегтярев А. А., Шорохов Е. В., Смирнов Е. Б., Долгих С. М., Коваль А. В. Деформационные явления при сжатии металлических цилиндрических оболочек. Потеря устойчивости. ФГВ. – 2019. – Т. 55, № 4. – С. 92–102.

Секция 6

Экспериментальные методики и научное оборудование

Лазерно-интерферометрическая диагностика быстропротекающих процессов

*А. Ю. Гармашев, Д. В. Петров, Е. А. Козлов, А. В. Павленко, В. И. Таржанов,
Д. П. Кучко, М. А. Ральников, Е. Б. Смирнов, А. В. Бочков*

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

Проведение газодинамических экспериментов невозможно без диагностики исследуемого явления. Точность и информативность средств диагностики определяет качество, прогностические способности разрабатываемых и верифицируемых на экспериментальных результатах расчетно-теоретических моделей поведения вещества. С момента создания в 60-х годах прошлого столетия источников когерентного оптического излучения – лазеров, в научном мире начали активно развиваться лазерно-интерферометрические методы диагностики быстропротекающих процессов. Эти методы обладают такими необходимыми для исследователя достоинствами, как прецизионность, быстродействие, квазинепрерывность регистрируемой информации, помехозащищенность датчиков, отсутствие возмущающего действия на зондируемый объект и, в последнее время, многоканальность. Всё это определило актуальность развития лазерной интерферометрии в ведущих мировых научно-исследовательских центрах и по сей день.

Ядерный центр на Урале не стал исключением и уже более 30 лет занимается разработкой, совершенствованием и внедрением метода в практику газодинамического эксперимента. В докладе приведены этапы становления лазерно-интерферометрической диагностики в РФЯЦ–ВНИИТФ, в том числе во взаимодействии с другими институтами, опыт применения в исследованиях динамических явлений, её текущее состояние и перспективы развития.

Методики исследования детонационных свойств энергетических материалов ИГиЛ СО РАН

Э. Р. Прууэл

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

В докладе представлено описание ряда экспериментальных методик и методик численного моделирования использующихся в ИГиЛ СО РАН для комплексного исследования детонационных свойств энергетических материалов.

- Методика рентгеновской микротомографии. Используя методику многоакурсной томографии удастся восстановить внутреннюю структуру плотности заряда с пространственным разрешением 3 мкм, это позволяет оценить однородность заряда и определить количество неоднородностей – потенциальных горячих точек.
- Исследование протяженности зоны химической реакции и энерговыделения: определение давления датчиком на основе манганина; определение яркостной температуры методом пирометрии; определение массовой скорости методом лазерного гетеродинного интерферометра.
- Определение метательных характеристик по разлету цилиндрической оболочки.
- Определение полей газодинамических характеристик детонационного течения и уравнения состояния продуктов взрыва.
- Методика малоуглового рентгеновского рассеяния, позволяющая непосредственно во взрыве исследовать формирование или изменения свойств конденсированной фазы. Методика успешно применяется для исследований кинетики формирования конденсированного углерода при детонации взрывчатых веществ с недостатком кислорода и определения степени реагирования металлических добавок.
- Методика численного моделирования параметров плотных реагирующих газов для определения параметров Чепмена – Жуге.

Разрабатываемые методики частично дублируют друг друга, что позволяет оценить систематические ошибки подходов, и получить всестороннюю информацию о детонационных характеристиках исследуемых энергетических составов.

Разработка детектора для изучения быстропротекающих процессов на пучке синхротронного излучения

*В. М. Аульченко¹, А. А. Глушак^{1,3,4}, В. В. Жуланов¹, А. Н. Журавлев^{1,3}, В. А. Киселев^{1,3},
В. Н. Кудрявцев^{1,2}, П. А. Пимин^{1,3}, В. М. Титов¹, Л. И. Шехтман^{1,2,4}*

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

³ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

⁴Томский государственный университет, Томск

В настоящее время в ИЯФ СО РАН ведется разработка детектора для изучения быстропротекающих процессов на основе кремниевого микрополоскового сенсора, DIMEX-Si. Новый детектор позволит значительно превзойти все основные параметры газового детектора DIMEX-G, который более 15 лет используется на станциях «Субмикросекундная диагностика» на накопителе ВЭПП-3 и «Экстремальное состояние вещества» на ВЭПП-4 в ИЯФ СО РАН. Максимальный поток синхротронного излучения, который может быть зарегистрирован в линейном режиме на DIMEX-Si, достигает 10^5 фотонов/канал от каждого сгустка электронов в накопителе, в отличие от DIMEX-G, где эта величина ограничена 2000 фотонов/канал/сгусток. Частота записи кадров повышена с 10 МГц до 50 МГц, а пространственное разрешение с 250 мкм до 100 мкм. Все эти характеристики подтверждены измерениями на малоразмерном прототипе детектора. В настоящее время ведется разработка полноформатного детектора DIMEX-Si для Станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» ЦКП СКИФ.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение 075-15-2022-1132 от 01.07.2022 г.).

Текущее состояние разработки однокоординатного твердотельного микрополоскового детектора рентгеновского излучения

В. М. Аульченко¹, А. А. Глушак^{1,2,3,4,5}, В. В. Жуланов^{1,2}, В. М. Титов¹, Л. И. Шехтман^{1,2,3}

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

³Томский государственный университет, Томск

⁴ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

⁵Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

В Институте ядерной физики СО РАН разрабатывается однокоординатный детектор рентгеновского излучения для динамических дифракционных экспериментов на строящемся источнике синхротронного излучения четвертого поколения в центре коллективного пользования «СКИФ». Для того, чтобы достичь пространственного разрешения лучше 100 мкм для фотонов с энергией 3 ÷ 30 кэВ, необходимо использовать твердотельные микрополосковые или матричные сенсоры из кремния или арсенида галлия в сочетании со специализированными интегральными микросхемами регистрации. В качестве регистрирующего элемента в первой версии прототипа детектора SciCODE был применен сенсор на основе арсенида галлия с шагом полосок 50 мкм [1]. В новой версии прототипа используется кремниевый сенсор также с шагом полосок 50 мкм. Детектор работает в режиме прямого счета фотонов и обеспечивает пространственное разрешение лучше 100 мкм при нагрузках до 1 МГц/канал. Для регистрации сигналов в детекторе разработана специализированная интегральная схема SciCODE8. SciCODE8 имеет 8 электронных каналов регистрации, которые могут регистрировать отдельные фотоны и сортировать их в соответствии с их энергией. Для прототипа детектора также были разработаны проект для управляющей ПЛИС и программное обеспечение. Были проведены измерения основных параметров электроники детектора. Кроме этого, разработана и отправлена в производство 64-канальная специализированная интегральная микросхема SciCODE64, в которую на основе результатов тестирования 8-канального прототипа SciCODE8 были внесены необходимые изменения.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение 075-15-2022-1132 от 01.07.2022 г.).

Список литературы

1. *Aulchenko V., Glushak A., Shekhtman L., Titov V., Zhulanov V.* One-Dimensional Detector for Diffraction Experiments at a Synchrotron Radiation Beam. *Physics of Particles and Nuclei Letters.* – 2022. – V. 19, N 5. – P. 493–496.

Экспериментальные исследования внутрибаллистических характеристик модельного ракетного двигателя твердого топлива методом рентгенографии

*Д. А. Ягодников¹, В. Н. Зайцев¹, И. В. Лоханов¹, А. О. Новиков¹, И. А. Ларионов²,
А. Ю. Грязнов², Н. Н. Потрахов²*

¹Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

Вопросы бесконтактной диагностики внутрикамерных процессов ракетных двигателей твердого топлива являются актуальными в процессе отработки модельных образцов и различных серийных испытаний готовых изделий. Существуют различные способы мониторинга таких процессов, основанные на регистрации акустических полей и излучения истекающей из сопла продуктов сгорания в широком диапазоне длин волн, включая оптический и рентгеновский диапазоны. Среди методов диагностики внутрикамерных процессов большой практический интерес представляет рентгеновская дефектоскопия, которая остается практически единственным методом, позволяющим исследовать процессы, протекающие при высоких температурах в замкнутом объеме.

Цель работы заключается в экспериментальном исследовании внутрикамерных процессов и определении внутрибаллистических характеристик модельного ракетного двигателя твердого топлива рентгенографическим методом с использованием аппаратно-программного комплекса, разработанного в Российской Федерации.

Объектами исследования в данной работе являлся модельный РДТТ Е-5-0 с торцевым зарядом из дымного пороха с диаметром критического сечения 3,4 мм. В качестве регистраторов и первичных измерительных преобразователей использовались малогабаритный источник рентгеновского излучения серии РАП, серийно производимый «ЭЛТЕХ-Мед», имеющий рабочее напряжение до 150 кВ, ток до 500 мкА и обладающим фокусным пятном менее 100 мкм, что позволяет обеспечивать большую глубину резкости. В качестве детектора использовался динамический рентгеновский детектор производства компании «ПРОДИС. НДТ» с размер пикселя 50 мкм, чувствительной областью 2944 × 2304 пикселей и скоростью сканирования до 30 кадров в секунду.

В процессе испытания РДТТ Е-5-0 с помощью рентгенографии визуализирован процесс выгорания твердого топлива и изучены особенности взаимодействия продуктов сгорания с внутренней поверхностью соплового блока и стенки камеры сгорания, изготовленной из технического картона, иллюстрирующие ее выгорание и изменения геометрии проточной части.

Определенная по перемещению горячей поверхности, не имеющей резкой границы раздела с продуктами сгорания, линейная скорость горения (~ 21 мм/с), удовлетворительно согласуется со значением (19,3 мм/с), полученным при диагностике указанного РДТТ с помощью оптических волноводов на основе и интерферометра Маха – Цендера.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госпрограммы фундаментальных исследований Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 0705-2020-0044.

Спиральный генератор высоковольтных импульсов с разделённой в пространстве индуктивной и ёмкостной частью

Е. И. Пальчиков^{1,2}, А. М. Рябчун^{1,2}, А. Г. Параскун^{1,2}

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

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

В работе рассматриваются новые модификации спиральных генераторов, ранее предложенных Фитчем и Хауэллом в 1961–1964 годах, и Белкиным и Жарковой в 1961 году [1]. Данные генераторы являются предельно простыми устройствами, которые запасают электрическую энергию при одном, относительно низком напряжении, а разряжают запасенную энергию в виде короткого электрического импульса с более высоким напряжением. Созданные компактные генераторы наносекундных высоковольтных импульсов, предполагается использовать для изготовления портативных импульсных рентгеновских аппаратов с взрывной эмиссией электронов для регистрации быстропротекающих процессов.

Для повышения КПД и нормальной работы генератора необходимо чтобы импеданс и время срабатывания ключа были много меньше импеданса и времени прохода сигнала по полосковой линии. К сожалению, волновое сопротивление двухшинной спиральной линии, индуктивность катушки генератора, выходная ёмкость, выходная индуктивность, жестко связаны между собой и не поддаются отдельному регулированию.

Для решения отмеченных проблем предлагается профилировать длинную линию спирального генератора (рис. 1). На двухшинной линии сделаны вырезы в форме меандра, которые разделяют в пространстве индуктивную и ёмкостную часть генератора вдоль оси катушки.

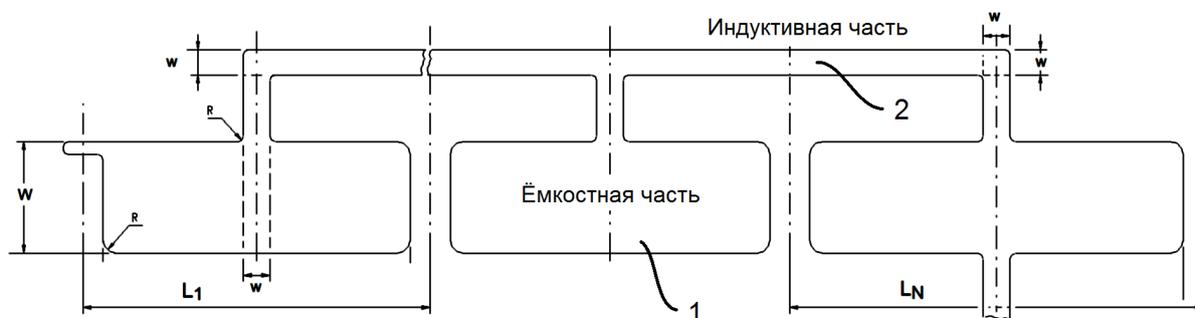


Рис. 1: Форма проводников двухшинной линии.

В результате убираются, и снижаются противоречия описанные выше. Конструкция позволяет отдельно регулировать параметры генератора (такие как волновое сопротивление линии, индуктивность катушки генератора, выходную ёмкость), оптимизировать КПД совместно с габаритами и весом аппарата. Индуктивную часть внутри и снаружи можно окружить ферритовым магнитопроводом. Индуктивность ёмкостной части можно сделать предельно малой. Это позволяет убрать влияние витка, через который ток вынужден течь в нагрузку, сделать приемлемой работу генератора с обычным (а не с рекордно малым по импедансу) разрядником. В результате повышается КПД и уменьшаются габариты – как спирального генератора, так и генератора Белкина-Жарковой.

В работе исследуются изготовленные спиральные генераторы с профилированными в виде меандра шинами, предложенные нами в патенте [2]. В результате профилирования волновое сопротивление длинной двухшинной спиральной линии повышается в три раза.

Исследованы два вида генераторов: классический спиральный генератор (11+12 витков), а также модифицированный генератор Белкина (11+13 витков).

Размеры генераторов: длина – 180 мм, внешний диаметр – 65 мм, внутренний диаметр – 40,5 мм. Толщина намотки 5 мм. Изоляция намотки рассчитана на 100 кВ. Форма проводящих шин в виде меандра (рис. 1) получена химическим травлением фольгированного лавсана. Применяются магнитопроводы из феррита ВМП – 200. Емкость генераторов по входу 20 нФ, выходная ёмкость 40 пФ. Время нарастания импульса от нуля до максимального напряжения составляет 60 нс. КПД генератора составляет 27 %. Генераторы состоят всего из двух деталей – разрядника и спирали. Измеренные коэффициенты трансформации не менее $k = 12,5$, что при зарядке двухшинной линии до 10 кВ позволяет сделать импульсный рентгеновский аппарат на рабочее напряжение не менее 100 кВ.

Предложены теоретические модели для различных модификаций генераторов с разделённой в пространстве индуктивной и ёмкостной частью. Корректность предложенных теоретических моделей проверена в сравнении с экспериментальными данными. Разработанные компактные генераторы высоковольтных импульсов позволяют изготовить импульсные рентгеновские аппараты для регистрации быстропротекающих процессов – предельно малых размеров и предельно простых по конструкции.

Список литературы

1. Пальчиков Е.И., Рябчун А.М., Красников И.Ю. Модифицированный спиральный генератор высоких напряжений для питания импульсного рентгеновского аппарата. ЖТФ. – 2012. – Т. 82, № 2. – С. 136–146.
2. Пальчиков Е.И. Спиральный генератор высоковольтных импульсов. Патентная заявка, приоритет № 2021120420 А от 09.07.2021, МПК – H05G 1/24, публ. 09.01.2023 Бюл. № 1. https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWA/000/002/021/120/420/A_20230109_2021120420/document.pdf.

Применение радиоволнового метода регистрации для определения относительной метательной способности бризантных взрывчатых веществ

*Г. А. Гребёнкин, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, К. М. Просвирнин, И. Г. Галиуллин,
И. А. Ахлюстин, К. В. Еганов, К. М. Мирошкин, А. С. Гремитских*

*Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина,
Снежинск*

В газодинамической практике РФЯЦ–ВНИИТФ проведение экспериментов по метанию пластин взрывчатыми веществами (ВВ) является очень распространенным и значимым для оценки и контроля качества параметров серийно изготавливаемых ВВ. Данные, полученные в экспериментах, также необходимы для численного моделирования детонации.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование процесса метания стальной пластины продуктами взрыва ВВ с использованием радиоволнового метода регистрации в условиях методики М-60.

Экспериментально процесс метания пластины исследуется в условиях методики М-60 с использованием электроконтактных датчиков, традиционно применяемой для оценки метательного действия ВВ.

Использование системы электроконтактных датчиков имеет ряд недостатков: невозможность непрерывного и невозмущающегося наблюдения разгона пластины во всем диапазоне измерений, а также трудоемкость в изготовлении.

Регистрация процесса движения пластины с применением радиоволновой методики позволяет избавиться от вышеперечисленных недостатков. В настоящей работе для регистрации движения пластины был использован радиоинтерферометр с длиной волны зондирующего излучения 3 мм.

Данные радиоволнового метода существенно более информативны, так как ведется процесс непрерывного наблюдения разгона пластины во всем диапазоне измерений, в отличие от электроконтактной методики, которая имеет дискретный метод записи полета пластины и влияние самих датчиков на полет пластины.

По результатам проведенных экспериментов рассчитывалась величина относительной метательной способности, которая как с применением электроконтактного, так и радиоволнового методов регистрации находится на одном уровне.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения радиоволнового метода регистрации для исследования метательной способности ВВ.

Регистрация откольных явлений в медном лайнере, метаемом при взрыве бризантного взрывчатого вещества на основе октогена

И. Г. Галлуллин, А. Ю. Гармашев, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, Д. П. Кучко, К. М. Просвирнин, Д. Г. Панкратов, К. М. Еганов, А. В. Воробьев, А. С. Гремитских

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

Регистрация скорости движения свободных и контактных поверхностей при проведении ударно-волнового эксперимента немаловажна при построении и уточнении уравнений состояний продуктов взрыва исследуемых взрывчатых веществ (ВВ).

С развитием непрерывных во времени и невозмущающих методов регистрации быстропротекающих процессов, таких как радиоволновая и лазерная интерферометрия, при проведении экспериментов по метанию металлических пластин (лайнеров) появилась возможность определения не только скорости их полета, но и исследование деформационно-прочностных свойств в динамических экспериментах, например упругопластического поведения, откольной и сдвиговой прочности материалов.

В настоящей работе проведены эксперименты по определению скорости движения медной пластины диаметром 200 мм и толщиной 4 мм, метаемой продуктами взрыва детонирующего ВВ на основе октогена диаметром 200 мм и толщиной 30 мм, который в свою очередь инициировался плосковолновым генератором.

Регистрация процесса полета медного лайнера осуществлялась одновременно двумя невозмущающими методиками – аппаратными комплексами радиоволновой и лазерно-гетеродинной методик (ЛГМ, PDV), при этом были синхронно задействованы три одноканальных радиоинтерферометра и один 16-канальный лазерный интерферометр ЛГМ. Регистрация процесса полета медного лайнера осуществлялась на базе полета от 0 до 50 мм в пяти точках зондирования – осевой области ($R = 0$ мм, где R – радиус образца ВВ, лайнера) и на удалении от оси на $R = 20, 40, 60, 80$ мм.

По результатам экспериментов отмечена хорошая согласованность радиоволновой и лазерно-гетеродинной методик для каждой области регистрации, что позволило получить зависимости скорости полета медного лайнера от времени и пройденного пути. Характер полученных зависимостей позволил увидеть явление откола, происходящего в медной пластине толщиной 4 мм.

Регистрация массовой скорости перемещения молекулярных пучков продуктов разложения вещества

А. В. Станкевич

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск

Исследования в области физики молекулярных пучков привели к появлению внушительного набора методов оценки их параметров и свойств. Учитывая важность применения кластеров и молекулярных пучков в физико-химической диагностике материалов и покрытий, медицине, синтезе новых материалов для микроэлектроники, выполнении процедур травления и проведения химического анализа строения веществ, стоит подчеркнуть целесообразность развития методов определения массовой скорости молекулярных пучков продуктов реакций разложения веществ, находящихся в различном термодинамическом состоянии.

Развитие методов регистрации массовой скорости перемещения молекулярных пучков неразрывно связано не только с оценкой поля ионизации, времяпролётной диагностикой, но и использованием метода гармонического осциллятора в различных его вариациях [1–3].

В данной работе показано создание методики определения массовой скорости перемещения молекулярных пучков продуктов разложения вещества. На основе пьезоэлектрических датчиков. Создан диагностический стенд по оценке скоростей перемещения газовых потоков, содержащих различные кластеры и пучки. Величина скорости газового потока (или пучка молекул и атомов) определялась скоростью изменения резонанса гармонического осциллятора, как правило, резким снижением резонансной частоты.

Целью дальнейших исследований является оценка применимости модернизированной нами модели Фойгта для оценки вязкоупругой части газового потока с характеристикой сконденсированных продуктов реакции.

Список литературы

1. *Miller J. G. Bolef D. I.* Sensitivity enhancement by the use of acoustic resonators in cw ultrasonic spectroscopy. *J. Appl. Phys.* – 1968. – V. 39, N 10. – P. 4589–4593.
2. *Lu C. S. Lewis O.* Investigation of film-thickness determination by oscillating quartz resonators with large mass load. *J. Appl. Phys.* – 1972. – V. 43, N 11. – P. 4385–4390.
3. *Voinova M. V. Rodahl M. et al.* Viscoelastic Acoustic Response of Layered Polymer Films at Fluid-Solid Interfaces: Continuum Mechanics Approach. *Physica Scripta.* – 1999. – V. 59. – P. 3.

Три режима работы малогабаритного дискового взрывомагнитного генератора с плоскими модулями для исследований в области высоких плотностей энергии

А. М. Глыбин, П. Н. Гуськов, Б. Т. Егорычев, А. В. Ивановский, К. Н. Климущин, В. Б. Куделькин, В. И. Мамышев, Ю. И. Матцев, В. В. Павлий, С. М. Полошко, Н. И. Ситникова, К. С. Торопов, З. С. Цибиков, Е. В. Шаповалов

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

В докладе представлено эволюционное развитие дисковых взрывомагнитных генераторов (ДВМГ) микросекундных импульсов электромагнитной энергии, работа которых основана на преобразовании энергии взрыва в электромагнитную энергию (магнитной кумуляции). Описаны принцип работы ДВМГ и эксперименты по отработке ДВМГ малого класса с плоскими дисковыми модулями. Сравниваются временные зависимости экспериментальных и рассчитанных импульсов тока и их производные. Представлен облик экспериментального стенда на основе 30-элементного ДВМГ малого класса с плоскими модулями.

Приводится информация о трех режимах работы экспериментального стенда на основе 30-элементного ДВМГ малого класса с плоскими модулями для исследования свойств материалов при высоких плотностях энергии.

Возможность достижения термоядерного зажигания при магнитном сжатии высокотемпературной замагниченной плазмы током дискового взрывомагнитного генератора

А. В. Ивановский, В. И. Мамышев

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

Одно из направлений достижения термоядерного зажигания – сжатие разогретой замагниченной плазмы лайнером. Концепция развивается в США на установке Z (проект MagLIF). Для достижения зажигания необходимо создать импульс тока амплитудой 60 МА и более. Установка Z реализует ток до 25 МА. Создание установок на порядок более мощных дело будущего. Наряду с этим взрывомагнитные генераторы уже сегодня реализуют требуемые токи, но с более длительным временем нарастания. В работе на основании проведенных расчетов сжатия горячей замагниченной плазмы обсуждаются возможности достижения зажигания с применением современных дисковых взрывомагнитных генераторов.

Применение дисковых взрывомагнитных генераторов для исследования ударной сжимаемости веществ

*В. К. Баранов, А. М. Буйко, С. Ф. Гаранин, А. М. Глыбин, А. Г. Голубинский, Н. В. Егоров,
А. Н. Ерофеев, А. В. Ивановский, Д. А. Ирничев, В. А. Карепов, К. Н. Климущкин,
В. Б. Куделькин, С. Д. Кузнецов, В. И. Мамышев, Ю. И. Матцев, С. М. Полошко,
Н. И. Ситникова, К. С. Торопов, З. С. Цибиков, Е. В. Шаповалов, В. А. Яненко*

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

Описана методика экспериментального исследования ударной сжимаемости веществ, реализуемой цилиндрическим лайнером-ударником, ускоряемым током дисковых взрывомагнитных генераторов. Большая энергия магнитного поля при токах в десятки мегампер позволяет разогнать лайнера сантиметровых размеров и нагружать макроскопические мишени. В совокупности с высокой однородностью лайнера, характерной для разгона магнитным полем, это дает возможность в одном эксперименте нагружать большое количество мишеней выполненных из различных материалов и получать точки на адиабате Гюгонио с процентной погрешностью.

Расчёты безударного сжатия металлов до 40 Мбар при магнитной имплозии лайнеров от дисковых взрывомагнитных генераторов

А. М. Буйко

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

При магнитной имплозии цилиндрических лайнеров – под действием импульсных токов $16 \div 70$ МА, азимутальных магнитных полей $16 \div 20$ МГц – возможны безударные сжатия металлов до давлений $10 \div 40$ Мбар [1–5]. Рассматривались преимущественно двухслойные лайнеры, внутренний слой которых – исследуемый металл (Cu, Ta, W), а в прилегающем наружном слое (Al, Cu) течёт ток и формируется магнитное давление.

В экспериментах [1] на Z-машине США были прецизионно измерены скорости имплозии Al-, Al/Cu- и Al/Ta-лайнеров, что позволило новым экспериментально-расчётным методом получать изэнтропы металлов до давлений 10 Мбар с точностью несколько процентов.

Аналогичный подход был использован в расчётах [2–5] имплозии лайнеров в устройствах с дисковым взрывомагнитным (магнитно-кумулятивным) генератором диаметром 400 мм. Так, при имплозии Cu/W-лайнера радиусами 20, 18,25, 18,0 мм были получены безударные давления в вольфраме до 40 Мбар [5], что обеспечивалось увеличением магнитных полей до 20 МГц и, особенно, гидродинамической кумуляцией при глубокой имплозии лайнера, до радиуса 0,35 мм.

В настоящей работе приводятся расчёты таких лайнерных устройств – с учётом уточнений [4] их моделирования, – при возможных в них токах и при различном описании лайнеров.

Список литературы

1. *Lemke R. W., Dolan D. H., Dalton D. G. et al.* Probing off-Hugoniot states in Ta, Cu, and Al to 1000GPa compression with magnetically driven liner implosions. *J. Appl. Phys.* – 2016. – V. 119. – P. 015904.
2. *A. M. Buiyko* Some Promises of Magnetic Implosion of High-Velocity Liners in the ALT-3 Driver. *IEEE Transactions on Plasma Science.* – 2018. – V. 46, N 10. – P. 3512.
3. *V. A. Karepov, S. D. Kuznetsov* On possibility to use systems based on disk explosive magnetic generators to study properties of copper and aluminum under shockless compression. 11th International Conference on Dense Z-Pinches, Beijing, China. – 2019.
4. *A. M. Buiyko, G. G. Ivanova, I. V. Morozova* Simulations of ALT-like explosive magnetic devices for ramp compression of materials by magnetically imploded liners. *Matter and Radiation at Extremes.* – 2020. – N 5. – P. 047402.
5. *A. М. Буйко* Возможности безударного сжатия металлов до 40 Мбар при имплозии лайнеров от дисковых взрывомагнитных генераторов. Материалы международной конференции «XV Забабахинские научные чтения». РФ, Снежинск. – 2021. – С. 112.

Анализ гидридов титана до и после ударноволнового нагружения

*В. И. Колесов¹, Е. С. Манахова¹, А. С. Губин², М. Н. Терещенко², П. С. Чернавкин²,
И. А. Базуров³, М. С. Анисимов³*

¹Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва

²Научно-исследовательский машиностроительный институт им. В. В. Бахирева, Москва

³Центральный научно-исследовательский институт химии и механики, Москва

Одной из задач водородной энергетики является разработка выгодных и безопасных способов хранения водорода, с возможностью его быстрого извлечения и использования. Возможным решением данной проблемы может быть использование твердотельных накопителей водорода, например гидридов и дейтеридов титана, которые выделяют водород контролируемым образом при высоких температурах и давлениях. Гидриды переходных металлов (Титан, цирконий и др.) относятся к соединениям, обладающим высокой термической и химической стойкостью. Известные способы получения чистого водорода из гидридов переходных металлов требуют продолжительного нагрева при температуре свыше 400 – 600 °С. В тоже время для решения некоторых практических задач представляет интерес процесс разложения гидрида титана при интенсивных механических воздействиях. С этой целью проведены исследования гидрида титана при ударе на вертикальном копре, а также при воздействии ударной волны.

Для изучения механизма этого явления нужно иметь простую и надежную методику анализа содержания водорода как в исходных гидридах, так и в подвергшихся ударно-волновому воздействию, при котором происходит частичный распад соединений.

Одной из возможных методик анализа оказалась волюмометрия, в которой оценивается выделение водорода по химической реакции между кислотой и вышеописанными гидридами. Методика не требует сложного оборудования, но дает при определенных условиях достаточно быстрое и точное содержание водорода (дейтерия) в образце. Главным условием точного анализа является проведение анализа в бескислородной атмосфере, разумеется, при учете температурных и барометрических поправок.

Методика верифицирована с помощью ТГА анализа тщательно вакуумированных образцов в среде аргона. ТГА анализ является точным методом оценки содержания водорода и дейтерия в образцах, но требует длительной подготовки образцов и специальной калибровки оборудования. Показана возможность разложения гидрида титана при внешнем воздействии в широком диапазоне давлений. Произведена оценка степени разложения гидрида титана описываемыми в работе методами.

Список литературы

1. *И. В. Шагно, З. Н. Шевцова, П. И. Федоров, С. С. Коровин* Химия и технология редких и рассеянных элементов. Часть II. – 2-е изд. – М: Высшая школа. – 1976. – 360 с.
2. Химическая энциклопедия: В 5 т.: т. 4: Полимерные-Трипсин / Редкол.: Зефиоров Н. С. (гл. ред.) и др. – М.: Большая Российская энцикл. – 1995. – 639 с.
3. Водород в твердых образцах. Аналитическая методика HORIBA Jobin Yvon. Аналитика и контроль. – 2007. – Т. 11, № 1. – С. 52–58.

Применение методики динамических испытаний как способа оценки сопротивляемости материалов и их сварных соединений внештатным нагрузкам

О. В. Глибенко

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург

Применение любого материала в конструкции основывается на том, что такой материал прошёл проверку, в основе которой лежит моделирование физических процессов, происходящих с ним во время эксплуатации. Наиболее сложнопрогнозируемыми как с точки зрения развития самой ситуации, так и с точки зрения поведения материала в составе конструкции, является оценка его поведения при внештатной ситуации природного или техногенного характера. Отдельный вопрос занимает изучение поведения сварных соединений, применяемых в реальных конструкциях, при внештатных ситуациях.

Существующие нормы и правила, предъявляемые классификационными обществами к качеству материалов, как правило, не включают в себя такие оценки. При этом конструктору уже на стадии проектирования требуется понимать и учитывать не только статические, циклические, ветро-волновые, температурные нагрузки, но и другие их виды, например ледовые; нагрузки, возникающие при обрушении конструкций и т.п.

Большинство существующих данных по поведению материалов при высокоскоростном воздействии на них были получены путём проведения испытаний по методу Гопкинсона и его разновидностям, а также при испытаниях образцов мембранного типа, классифицируемых как Hydraulic Bulge Test. Следует отметить, что применение результатов таких испытаний в расчётах прочности и надёжности конструкции при динамическом деформировании без учёта масштабного эффекта, влияния изгибной и мембранной компонент деформации на общую картину не корректно. К одному из способов оценки поведения конструкционных материалов и их соединений в натуральных толщинах при внештатном нагружении можно отнести динамические испытания, позволяющие моделировать внештатные ситуации. Испытания позволяют проводить исследования на образцах габаритами 1500,0 × 1500,0 мм в условиях двухосного нагружения. Испытания проводятся по методике, суть которой изложена в [1], а также патенте [2].

Наибольший интерес при проведении динамических испытаний представляет изучение поведения сварных узлов. Особенностью методики является то, что она позволяет оценивать не прочность сформированного сварного узла, а его деформационную способность, что с точки зрения оценки сопротивляемости конструкции внештатной нагрузке несомненно, более корректно.

Были проведены исследования различных сварочных материалов и установлено, что металл сварного шва при двухосном динамическом нагружении начинает деформироваться раньше основного металла, и, по сути, вовлекает его в процесс деформации. «Отставание» основного металла, вовлекаемого в процесс деформирования, от металла шва составляет от 1,0 до 2,5 % (в зависимости от толщины образца и формы усиления шва).

Список литературы

1. Глибенко О. В., Вихарева И. В., Фомина О. В., Ильин А. В. Исследование изменения структуры и механических свойств высокопрочной азотсодержащей аустенитной стали после динамического нагружения. «Проблемы черной металлургии и материаловедения». – 2017. – № 4. – С. 56–65.

2. Патент № 2756992, Бюллетень № 28, 08.10.2021. Способ испытания конструкционных материалов при динамическом воздействии и устройство для его осуществления.

Секция 7

Задачи промышленности и безопасность

Моделирование распространения ударной волны от взрыва углеметановоздушной смеси в канале с разветвлениями

А. Ю. Крайнов, К. М. Моисеева

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

При добыче угля на стенках угольных шахт осаждается угольная пыль, способная поддерживать или усиливать пламя и взрывную волну при аварийном взрыве метана. При добыче угля в шахте из разгруженных угольных пластов и отбитого угля выделяется адсорбированный метан. При недостаточном проветривании возможно возникновение взрывоопасной концентрации метана в воздухе и воспламенение горючей смеси.

Исследование горения угольной пыли в метановоздушной среде проводится с целью определения влияния ее горения на величины поражающих факторов при аварийной ситуации в шахте, таких как ударная волна, скоростной напор, загазование рудничной атмосферы продуктами сгорания. Исследования проводятся с использованием специальных постановок экспериментов [1–3], с использованием экспериментальных данных для формулировки математической модели и последующей ее валидации [3], и проведения анализа возможных аварийных ситуаций с использованием сформулированной модели и созданного расчетного пакета [4].

Целью данной работы является моделирование распространения ударной волны и горения взвеси угольной пыли в разветвленном канале и сравнение с экспериментальными измерениями интенсивности ударной волны, приведенными в [2].

Расчеты проведены с использованием математической модели [3]. Получена динамика распространения ударной волны в разветвленном канале, с геометрическими размерами из [2]. Определены величины полного давления в точках расстановки датчиков давления в фиксированных местах канала при проведении экспериментов, из [2]. Полученные результаты расчетов с удовлетворительной точностью согласуются с экспериментальными данными из [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 21-71-10034, <https://rscf.ru/project/21-71-10034/>.

Список литературы

1. *Leilin Zhang, Qianyi Yang, Biming Shi, Yihui Niu & Zheng Zhong.* Influences of a Pipeline's Bending Angle on the Propagation Law of Coal Dust Explosion Induced by Gas Explosion. *Combustion Science and Technology.* – 2021. – V. 193, N 5. – P. 798–811.
2. *Yihui Niu, Leilin Zhang, Biming Shi, Qianyi Yang & Zhen Zhong.* Methane–Coal Dust Mixed Explosion in Transversal Pipe Networks. *Combustion Science and Technology.* – 2021. – V. 193, N 10. – P. 1734–1746.
3. *Моисеева К. М., Пинаев А. В., Васильев А. А., Крайнов А. Ю., Пинаев П. А.* Исследование горения углеметановоздушной взвеси в длинном закрытом канале. *ФГВ.* – 2022. – Т. 58, № 5. – С. 54–63.
4. *Крайнов А. Ю., Лукашов О. Ю., Моисеева К. М., Колегов Г. А.* Влияние горения угольной пыли на интенсивность ударной волны от аварийного взрыва метана в шахте. *Уголь.* – 2022. – № 9 (1158). – С. 73–78.

Моделирование процесса тепломассопереноса в композиционных материалах при зажигании частицами, нагретыми до высокой температуры

Д. П. Касымов, В. В. Перминов, Е. Г. Голубничий, А. С. Якимов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

Лесные и городские пожары приводят к большим материальным потерям, превращая в дым и пепел жилые и промышленные здания. Довольно часто огонь от вторичных источников зажигания (нагретых до высокой температуры частиц неметаллов или металлов [1]) перебрасывается на деревянные строения в городах и поселках. Факторами, влияющими на воспламенение строительных материалов (СМ), может быть кондуктивный перенос тепла от нагретых частиц.

Цель исследования – создание физико-математической модели в трехмерной постановке зажигания СМ из древесины (см. рис. 1). Моделируется случай, когда «нагретые» частицы, образованные во время пожара, могут скапливаться в углах зданий, на крышах, жилых помещений и приводить к их воспламенению.

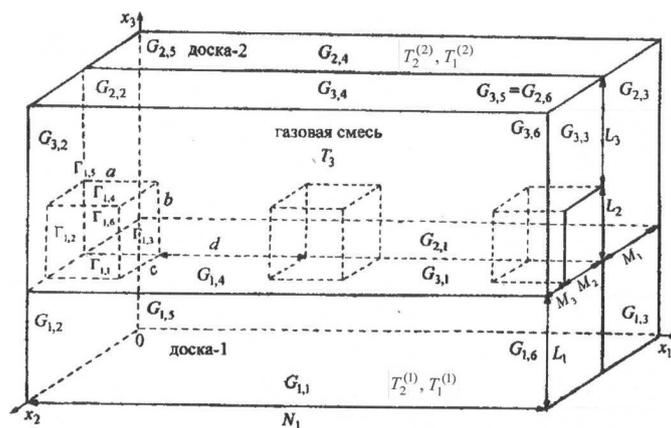


Рис. 1: Схема тепломассообмена уголка СМ с «нагретыми» частицами.

Предполагается, что воздушная среда, окружающая нагретые частицы и СМ уголка не продувается и на первом этапе исследования течение внутри уголка отсутствует.

Математически, предлагаемая модель с учетом допущений из [2, 3], сводится к решению краевой задачи [4] в сопряженной постановке.

На рис. 2 дано распределение температуры доски-2 в сечении $S_{2*} = \{x_1 = N_1, x_3 = L_1 + L_2 + L_3\}$ (см. рис. 1) по поперечной переменной x_2 в различные моменты времени: 25 (1), 26 (2), 26,16 (3) с. Сплошные кривые отвечают температуре газовой фазы ($T_2^{(2)}$), штриховые кривые – температуре каркаса древесины ($T_1^{(2)}$). Из анализа рис. 2 следует, что по мере прогрева уголка СМ «нагретыми» частицами увеличивается температуры внутри реагентов в сечении S_{2*} и наблюдается резкий рост температуры газовой фазы ($T_2^{(2)}$) при $t_* = 26,16$ с. Режиму зажигания отвечают кривые, имеющие максимум температуры T_* .

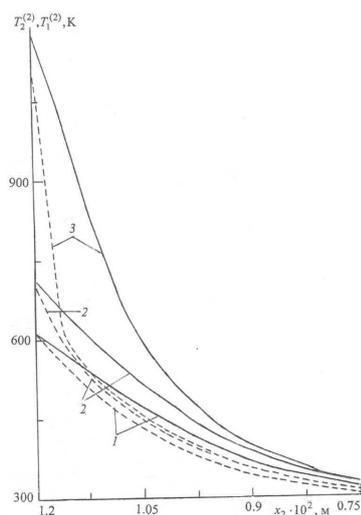


Рис. 2: Зависимость температуры газовой фазы $T_2^{(2)}$ (сплошные кривые) и каркаса $T_2^{(1)}$ (штриховые кривые) доски-2 от поперечной переменной x_2 в сечении S_{2*} в различные моменты времени: 1–25 с, 2–26 с, 3–26,16 с.

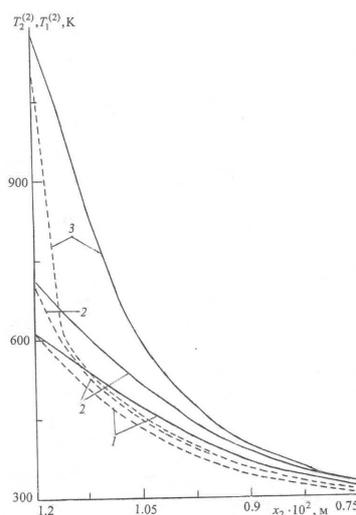


Рис. 3: Зависимость безразмерной концентрации компоненты двуокиси углерода $c_4^{(2)}$ доски-2 (сплошные кривые), кислорода $c_3^{(2)}$ (штриховые кривые) и окиси углерода $c_1^{(2)}$ (штрихпунктирные кривые) от координаты x_2 в сечении S_{2*} в те же самые моменты времени, что и на рис. 2.

На рис. 3 представлены распределения концентраций компонентов двуокиси углерода, окиси углерода и кислорода в проницаемом реагенте (доска-2) по координате x_2 , в сечении S_{2*} . Сплошные кривые отвечают $c_4^{(2)}$, штриховые кривые – $c_1^{(2)}$, штрихпунктирные кривые – $c_3^{(2)}$ в те же моменты времени, что и на рис. 2. Как видно из рис. 3 при $t = t_*$ имеет место резкий рост концентрации углекислого газа в сечении S_{2*} в результате тепловыделения от реакции окисления CO [3, 4].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 22-21-00068).

Список литературы

1. Кузнецов Г. В., Барановский Н. В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2009. – 301 с.
2. Глухарева М. И., Дроздов Н. П., Ермакова Л. А. и др. Справочник лесохимика. М.: Лесная промышленность. – 1974. – 376 с.
3. Гришин А. М., Якимов А. С. Математическое моделирование процесса зажигания древесины. Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т. 20, № 4. – С. 473–486.
4. Касымов Д. П., Перминов В. В., Голубничий Е. Н., Якимов А. С. Моделирование зажигания строительных материалов частицами, нагретыми до высокой температуры. Все грани математики и механики. Сборник статей Всероссийской молодежной научной конференции. Томск – 2022. – С. 43–52.

Методика определения норм загрузок ВМ для стальных кабин

В. А. Залозный, Я. И. Запорожченко

Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог», Санкт-Петербург

Расширение производства на предприятиях нашей отрасли влечёт потребность в использовании быстровозводимых, лёгких и дешёвых, но при этом безопасных помещений для работы с взрывчатыми материалами. Наиболее привлекательными материалами для таких помещений являются стальные листы и другие конструкционные изделия из стали. Помещения и кабины необходимо предварительно рассчитать на безопасность при взрыве ВМ. Основой расчёта на безопасность является проверка кабины на прочность. Известные модели, в основном, нацелены на расчёт железобетонных кабин. Для расчёта стальных кабин они применимы только в узком диапазоне задач и не обладают достаточной точностью.

В работе представлена инженерно-аналитическая модель воздействия взрыва заряда ВМ на стены кабин. Модель была сравнена с известной инженерной моделью и верифицирована экспериментом.

Представленная инженерно-аналитическая (полуаналитическая) модель состоит из двух частей:

1. Аналитический расчёт предельной прочности стен кабины, основанный на уравнениях деформации двумерных оболочек и энергетической модели движения с аппроксимацией оболочки линейным осциллятором.
2. Инженерный расчёт импульса воздушной ударной волны, проходящей на стены, который основан на уравнениях Садовского.

Модель можно использовать для решения как прямой, так и обратной задачи расчёта нормы загрузки кабин. Методика позволяет учитывать геометрические параметры кабины и свойства материала стен кабины, а также позволяет получить более точные и детализированные результаты по сравнению с инженерной методикой. Применение разработанной модели позволяет существенно повысить точность расчётов нормы загрузки стальных кабин и провести более полный анализ её конструкции.

Модель верифицирована в ходе экспериментов, в результате которых были получены предсказанные результаты.

Список литературы

1. *Ткаченко О. П.* Специальные главы механики деформируемых тел : учеб. Пособие / О. П. Ткаченко, В. А. Рукавишников – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС. – 2006. – 60 с.
2. *Феодосьев В. И.* Сопrotивление материалов: Учеб. для вузов (Сер. Механика в техническом университете; Т.2). – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 1999. – 592 с.
3. *Минаев О. А.* Расчет защитных устройств на действие импульса взрыва. Москва : ЦНИИ-ИНТИ. – 1980. – 40 с.
4. *Бирбраер А. Н.* Экстремальные воздействия на сооружения / А. Н. Бирбраер, А. Ю. Роледер. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. – 2009. – 594 с.

5. *Шамин В. М.* Расчет защитных сооружений на действие взрывных нагрузок / В. М. Шамин. – М. : Стройиздат. – 1989.
6. *Драгунов Ю. Г.* Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. / и др. Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко – М. – 2014. – 1216 с.
7. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. Пособие по обследованию и проектированию зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок.

Распыление дезактивирующих аэрозолей с помощью энергии ВЭМ

О. И. Гаенко, И. Е. Конюхов, Е. В. Муравлев, О. Б. Кудряшова, С. С. Титов

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск

В связи с усиливающейся опасностью экологических угроз, технологических выбросов, террористических атак с применением вредных и опасных веществ встает задача дезактивации таких веществ в воздухе и на поверхностях помещений. Другая современная проблема – это распространение биологических аэрозолей, несущих опасные вирусы и микробы, возникшие естественным путем или в результате применения биологического оружия. Один из способов решения проблемы – распыление специальных дезактивирующих аэрозолей, действующих физическим или химическим путем на облако опасных веществ. Распыление таких аэрозолей возможно, в том числе, с помощью применения энергии ВЭМ. Преимущества такого способа распыления: облако дезактивирующего аэрозоля создается очень быстро, а частицы имеют развитую поверхность [1]. В работе [2] представлена математическая модель работы импульсного распылителя, использующего энергию ВЭМ, а в работе [3] показаны предварительные результаты по распространению частиц «взрывного» аэрозоля в пространстве.

В данной работе приводится математическая модель и эксперимент по распространению взрывного аэрозоля. Учитываются особенности распространения аэрозоля, созданного взрывным способом: скорость создания облака, малый размер частиц, возмущение воздуха газами-продуктами реакции ВЭМ. В эксперименте фиксируется изменение концентрации частиц в пространстве и их размеров со временем, а также относительная масса осажденных на поверхностях камеры частиц.

Расчеты показывают, что время и направление (пол, стенки, потолок) осаждения аэрозоля существенно зависят от размеров частиц. Так, например, частицы оксида титана с диаметром меньше 8 мкм скорее осядут на стенки, чем на пол. Установлено, что распространение облака частиц при взрывном распылении нельзя рассматривать в приближении броуновской диффузии из-за значительного возмущения воздуха газами-продуктами реакции. Найден эффективный коэффициент диффузии и связанные с ним свободные параметры модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда научного фонда (код проекта 22-69-00108, <https://rscf.ru/project/22-69-00108/>).

Список литературы

1. *Kudryashova O. B., Stepkina M. Y., Korovina N. V., Antonnikova A. A., Muravlev E. V., Pavlenko A. A.* Atomization of nanopowders for adsorption of toxic substances. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2015. – V. 88, N 4. – P. 833–838.
2. *Kudryashova O., Sokolov S., Zhukov I., Vorozhtsov A.* Mathematical Model of the Pulse Generation of Decontaminating Aerosols. *Materials*. – 2022. – V. 15, N 22. – P. 8215.
3. *Kudryashova O. B., Korovina N. V., Pavlenko A. A., Arkhipov V. A., Muravlev E. V.* Aerosol cloud propagation in a closed space. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2015. – V. 88, N 3. – P. 568–574.

Воспламенительные композиции на основе малотоксичных компонентов

В. А. Козлов, М. В. Казутин, Н. В. Козырев

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск

В пиротехнических составах первичного воспламенения, массово применяемых в настоящее время для снаряжения электрических средств инициирования, используются соединения свинца, наиболее часто – тринитрорезорцинат и тиоцианат (роданид). Последние являются высокотоксичными веществами, относятся к первому классу опасности по ГОСТ 12.1.007-76 и имеют очень низкие величины предельно допустимых концентраций (ПДК) в воздухе: сотые и тысячные доли миллиграмма на кубический метр. В связи с общемировой тенденцией к ужесточению экологических требований в производственной и бытовой сфере, актуальна задача создания воспламенительных композиций, не содержащих соединений свинца.

Целью работы является поиск малотоксичных рецептур воспламенительных составов, предназначенных для снаряжения электровоспламенителей «мостикового» типа. Рассматриваются смеси типа «окислитель-горючее» на основе хлората калия KClO_3 . Показано, что в качестве горючих компонентов целесообразно использовать соединения с положительной или нулевой энтальпией образования, низкой теплоёмкостью и теплопроводностью, способные к экзотермическому взаимодействию с окислителем при температурах ниже, чем начинают проявляться эндотермические эффекты плавления или разложения. В качестве таковых в сравнении с роданидом свинца $\text{Pb}(\text{SCN})_2$ экспериментально исследованы малотоксичные и доступные порошки вольфрама W, молибдена Mo, сульфида сурьмы Sb_2S_3 , а также смеси порошков молибдена с азодикарбонамидом $\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_2$ (АДК) и гидразодикарбонамидом $\text{C}_2\text{H}_6\text{N}_4\text{O}_2$ (ГДК).

Воспламенительные составы в виде суспензии в ацетоновом растворе нитроцеллюлозы (НЦ) наносились на нихромовый мостик толщиной 30 мкм, длиной около 2 мм, напаянный между медными проводниками. Электрическое сопротивление R такой конструкционной основы находилось в пределах $3,1 \pm 0,15$ Ом. При подаче на мостик прямоугольного токового импульса заданной амплитуды I определялись значения минимального инициирующего тока I_{min} и время инициирования τ . На основе величин R, I и τ по закону Джоуля-Ленца вычислялись значения энергии q, фактически затраченной на воспламенение. Получены следующие результаты:

- для состава $\text{KClO}_3/\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{НЦ}$ $I_{min} = 0,285$ А; при $I = 0,5$ А, $\tau = 6,3$ мс, $q = 4,2$ мДж;
- для состава $\text{KClO}_3/\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{НЦ}$ $I_{min} = 0,300$ А; при $I = 0,5$ А, $\tau = 13,15$ мс, $q = 10,6$ мДж;
- для состава $\text{KClO}_3/\text{W}/\text{НЦ}$ $I_{min} = 0,400$ А; при $I = 0,5$ А, $\tau = 24,0$ мс, $q = 18,6$ мДж;
- для состава $\text{KClO}_3/\text{Mo}/\text{НЦ}$ $I_{min} = 0,300$ А; при $I = 0,5$ А, $\tau = 12,4$ мс, $q = 9,9$ мДж;
- для состава $\text{KClO}_3/\text{Mo}/\text{АДК}/\text{НЦ}$ $I_{min} = 0,340$ А; при $I = 0,5$ А, $\tau = 19,7$ мс, $q = 15,5$ мДж;
- для состава $\text{KClO}_3/\text{Mo}/\text{ГДК}/\text{НЦ}$ $I_{min} = 0,350$ А; при $I = 0,5$ А, $\tau = 35,9$ мс, $q = 28,1$ мДж.

Таким образом, среди рассмотренных наиболее перспективными являются смеси хлората калия с порошками молибдена и сульфида сурьмы, характеристики которых сопоставимы с известным составом $\text{KClO}_3/\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{HЦ}$. Среди этих двух предпочтительнее использование составов с молибденом, как менее токсичным компонентом (3-й класс опасности по ГОСТ 12.1.007-76) по сравнению с сульфидом сурьмы (2-й класс опасности).

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FУFE-2021–0005).

Модель разрушения крепежных шпилек гидроагрегата №2 Саяно-Шушенской ГЭС

В. Т. Кузавов

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

В работе [1] представлена новая модель эрозионного разрушения материалов, связанная с образованием в исследуемых материалах, под действием кавитации, высокочастотных микроспиралей. В сфокусированных каналах вдоль оси спиралей выделяется энергия, способная вызвать разрушение исследуемых материалов. Спиральные структуры являются источниками микротрещин, образующихся вдоль сфокусированных каналов (рис. 1). Детали и узлы гидроагрегатов находятся в сложном напряженном состоянии (внутреннее давление, вибрации, натяжение шпилек). Под действием этих напряжений происходит раскрытие микротрещин, что и приводит к разрушению крепежных шпилек. В связи с этим были проведены экспериментальные работы, имитирующие работу шпилек, в следующей постановке.

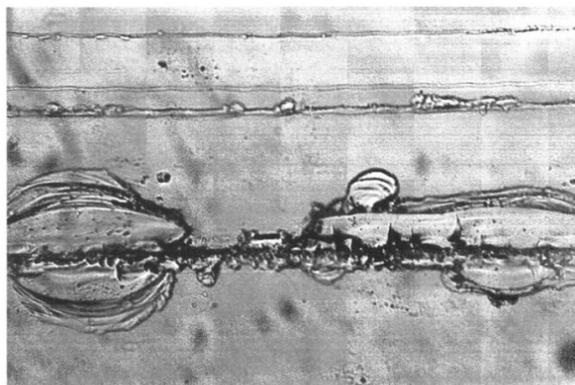


Рис. 1:



Рис. 2:

Ко дну сосуда с водой жестко крепилась рамка из оргстекла (рис. 3). По центру рамки устанавливался образец из оргстекла. Растягивающие усилия создавались с помощью резьбовых соединений (М8) по краям образца. Уровень растягивающих усилий не контролировался, но был небольшим. Размеры рабочей части образца из оргстекла $40 \times 15 \times 10 \text{ мм}^3$. Над экспериментальным образцом располагался излучатель, колеблющийся с частотой 22 кГц. Таким образом имитировался кавитационный шум, воздействующий на экспериментальный образец. Уровень кавитационного шума менялся с изменением расстояния от исследуемого образца до излучателя. Следует отметить, микротрещины в оргстекле, представленные на рис. 1, возникали в образце только под воздействием кавитационного шума. На рис. 2 представлены каналы, образующиеся в образце при одновременном воздействии кавитации и растяжения, источники разрушения. Образец разрушался в месте приложения кавитационного шума (толщина 10 мм), а не в резьбовых соединениях (М8).

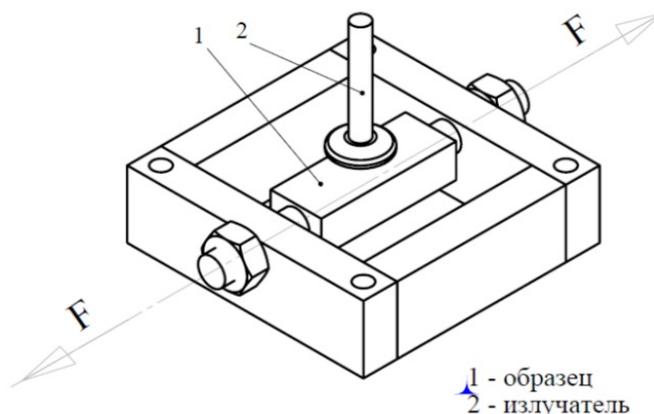


Рис. 3:

На Саяно-Шушенской ГЭС установлены гидроагрегаты (ГА) с турбиной, которая имеет узкий регулировачный диапазон при напорах выше расчетных в зоне высоких КПД. При выходе из регулировачного диапазона ГА попадает в не рекомендованную для эксплуатации зону. Работа в данной зоне сопровождается переходными гидродинамическими процессами: пульсациями давления в проточном тракте и повышенной вибрацией. Согласно натурным исследованиям завода-изготовителя в не рекомендованной зоне под рабочим колесом имеет место мощный центральный (кавитационный) жгут, источник кавитационных шумов. Работа турбины сопровождается сильными гидравлическими ударами в проточной части и значительными шумами, что приводит к образованию спиральных структур в узлах ГА. Заводом-изготовителем турбины не установлены критерии и ограничения по прохождению через зону не рекомендованной работы.

Список литературы

1. Кузавов В. Т. Новая модель эрозионного разрушения. ДАН. – 2019. – Т. 489, № 6. – С. 581–584.

Исследования в обеспечение разработки метода оценки ресурса авиационных масел

Л. С. Яновский^{1,2}, В. М. Ежов^{1,2}, М. А. Ильина^{1,2}

¹Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка

²Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, Москва

Штатный метод оценки термоокислительной стабильности недостаточно информативный. Изменения свойств определяются при фиксированных времени и температуре окисления. Оценка влияния окисления на трибологические характеристики, стойкость к пенообразованию и агрессивность к уплотнительным резинам, а также влияния на эксплуатационные свойства масла попадания воды и наличия контакта с уплотнительными резинами не проводится [1].

В целях создания высокотермостабильных масел, а также оценки времени срабатывания их ресурса необходим метод, позволяющий определить время достижения предельно допустимых значений основных эксплуатационных свойств масла в зависимости от времени и температуры окисления [2].

Авторами предложен метод оценки времени срабатывания ресурса масел, включающий определение физико-химических и эксплуатационных свойств масла в зависимости от времени и температуры окисления, построение математических зависимостей изменения свойств на основе уравнения Аррениуса, а также прогноз времени достижения предельно допустимых значений параметров масла, определенных нормативной документацией.

Метод апробирован на образцах штатного и экспериментального масел для авиационных ГТД и редукторов вертолетов. Определены зависимости кинематической вязкости, осадкообразования, коррозионной агрессивности, трибологических и пенообразующих характеристик масел, а также влияние на уплотнительные резины от температуры и времени окисления, в том числе, при добавлении воды и контакте с уплотнительными резинами.

Критическим для обоих масел является показатель «критическая нагрузка», определяемый на четырехшариковой машине трения. При температуре 200 °С ресурс штатного и экспериментального масел сопоставим. При температуре 225 °С экспериментальное масло обладает вдвое большим временем достижения предельно допустимого значения по показателю «критическая нагрузка».

Исследования проведены в рамках госзадания № АААА-А19-119120690042-9.

Список литературы

1. Яновский Л. С., Дмитриенко В. П. и др. Основы авиационной химмотологии. М.: МАТИ. – 2005. – 680 с.
2. Яновский Л. С., Ильина М. А. Исследование термоокислительной стабильности синтетических масел для авиационных ГТД и редукторов вертолётов. Мир нефтепродуктов. – 2021. – № 2. – С. 10–14.

О влиянии ядра земли на климат

В. Ф. Анисичкин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Факторы, влияющие на климат Земли, можно разделить на внешние и внутренние. Считается, что основной внешний фактор – изменение количества тепла поступающего от Солнца из-за изменений солнечной активности и изменений орбиты Земли (циклы Миланковича). Внутренняя изменчивость определяется содержанием в атмосфере парниковых газов метана (CH_4), диоксида углерода (CO_2) и водяного пара. Поток тепла из недр Земли, как принято считать, относительно стационарный и не может быть причиной многократных изменений климата Земли. Однако, даже учет всех известных факторов, но в разных моделях, приводит к разным прогнозам по климату [1]. К еще большей неточности прогнозов может привести не учет других возможных процессов, влияющих на климат. Поэтому в работе рассматривается влияние на климат не учитываемого ранее, насколько известно из публикаций, переменного потока тепла из недр Земли.

Ледяной слой в Антарктиде накапливался в течение миллионов лет. Ледяные керны из скважин с разных глубин содержат газы, составлявшие атмосферу Земли во время образования очередного слоя льда. Анализ химического и изотопного состава включений в лед позволил установить связь содержания парниковых газов в атмосфере Земли и температуры в прошлом. На рис. 1 показано изменение температуры и содержания CH_4 и CO_2 в атмосфере в течение 400 тыс. лет [2]. Более поздние исследования подтвердили соответствие изменений климата и содержания диоксида углерода и метана до 800 тыс. лет назад, с периодом около 100 тыс. лет. Данные для ледяных кернов, возрастом до 2.8 млн., лет менее надежны, но установлено, что ранее 1.2 млн. лет назад продолжительность климатических циклов была существенно меньше, около 40 тыс. лет [3] и климат был теплее. Но такие резкие изменения параметров, очевидно, не могут объясняться циклами Миланковича, длительность которых должна быть относительно постоянна.

Между потеплением климата и содержанием парниковых газов положительная обратная связь. С повышением температуры океанов растворимость CO_2 в воде уменьшается, поступающий в атмосферу CO_2 усиливает парниковый эффект, температура океанов растет. С повышением температуры океанского дна происходит высвобождение метана из газогидратов и его поступление в атмосферу, ускоряя и усиливая парниковый эффект. Поэтому, причиной быстрых циклических потеплений, может быть повторяющийся нагрев воды океанов и океанского дна.

Миллиарды лет назад доля легко делящихся изотопов урана и тория была достаточна для протекания цепных ядерных реакций. Следы работы природных ядерных реакторов обнаружены в рудных телах в Окло. При этом работа таких реакторов возобновлялась неоднократно в импульсном режиме. В [4] показано, что диоксид урана при высоких давлениях и температурах не растворяется в расплаве железа и, следовательно, при гравитационной дифференциации вещества Земли соединения урана и тория могли оседать из расплавленного внешнего железо-никелевого слоя Земли, как более плотные, на твердое внутреннее ядро Земли. В [5] получено, что и в ядре Земли работа геореакторов возможна в циклическом импульсном режиме с воспроизводством делящихся изотопов и до настоящего времени. С началом цепных ядерных реакций возникают начинающиеся от основания внешнего ядра Земли восходящие потоки массы и тепла, которые, через некоторое время, прогревая вышележащую силикатную мантию, начинают прогревать кору Земли.

Значительная часть метангидратов залегает на сотни метров ниже дна океанов, поэтому они первыми прореагируют на волну тепла из недр. Из разлагающихся гидратов происходит

выброс метана в атмосферу, и начинают работать положительные обратные связи, приводящие к парниковому эффекту. Прогревается вода океанов, выделяется растворенный в ней углекислый газ, поэтому повышение концентраций углекислого газа и метана практически синхронно.

Из-за импульсного режима работы геореактора волна тепла из недр не продолжительна. Время жизни метана в атмосфере порядка десяти лет, концентрация метана в атмосфере быстро падает, начинают работать обратные связи. Температура атмосферы и океанов понижается. Все больше CO_2 растворяется в воде океанов. Поэтому после роста температуры, в исторических масштабах практически без паузы, начинается похолодание, как на рисунке 1. Если принять скорость восходящих тепловых потоков в ядре Земли порядка десяти километров в год и такой же скорость теплопередачи в мантии, то, согласно рисунку, современный цикл повышения температуры был вызван активной работой геореактора около 20 тыс. лет назад.

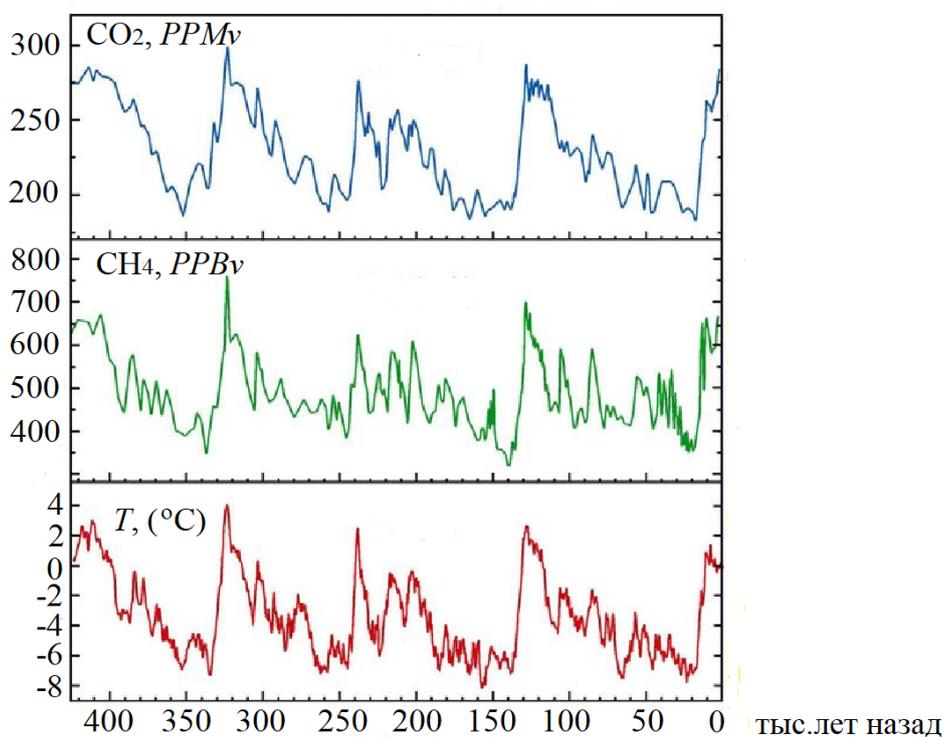


Рис. 1: Циклические изменения объемной концентрации парниковых газов CO_2 и CH_4 в атмосфере, и циклические изменения температуры в Антарктиде.

Согласно мониторингу геонейтрино [6], в настоящее время мощность геореактора не превышает 3 ТВт. Поэтому мониторинг геонейтрино, испускаемых геореактором Земли, позволяет предсказать изменения климата в долгосрочной перспективе.

Миллионы лет назад легко делящихся изотопов было больше, и в ядре Земли могли циклически работать в разных местах несколько геореакторов. Поэтому продолжительность климатических циклов могла быть короче и менее упорядоченной. Возможно, по этой причине миллионы лет назад климат был теплее из-за более частого поступления парниковых газов.

Приближенное согласие в некоторых вариантах расчетов циклов Миланковича с изменениями климата за последние 1.2 млн. лет может быть случайным. Так в [7] отмечается отсут-

ствие «прямой сопоставимости инсоляционных кривых, с изотопно-кислородными данными» приведенными, например, на рис. 1. Но, возможно, изменения орбиты Земли и оси ее вращения принудительно инициируют цепную ядерную реакцию, например, вызывая внутренние гравитационные (приливные) волны уровня в ядре Земли, локально увеличивая толщину слоя актиноидов, находящихся в околокритическом состоянии.

Если ориентироваться на цикличность процессов, приведенных на рисунке, то в будущем возможно похолодание, которое пока сдерживается индустриальными выбросами парниковых газов. Но, если не восполнять естественную циклическую убыль парниковых газов в атмосфере, то на Земле наступит ледниковый период.

Список литературы

1. *Hausfather Z., et al.* Climate simulations: recognize the 'hot model' problem. *Nature*. – 2022. – V. 605. – P. 26–29.
2. *Petit J. R., et al.* Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*. – 1999. – V. 399. – P. 429–436.
3. *Yuzhen Y., et al.* Two-million-year-old snapshots of atmospheric gases from Antarctic ice. *Nature*. – 2019. – V. 574. – P. 663–666.
4. *Митрофанов В. В. и др.* О возможности взрывного ядерного энерговыделения в недрах планет. Тр. Межд. Конф. V Забабахинские научные чтения. – 1999. – С. 67–76.
5. *Анисичкин В. Ф. и др.* Цепные ядерные реакции деления нуклидов в ядре Земли в течение миллиардов лет. *Атомная энергия*. – 2005. – Т. 98, № 5. – С. 370–379.
6. *Bellini G., et al.* Observation of Geo-Neutrinos. *Physics Letters B*. – 2010. – V. 687(4-5). – P. 299–304.
7. *Большаков В. А.* Теория М. Миланковича: некоторые проблемы и возможные решения. Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. – 1999. – № 63. – С. 33–39.

Пожаровзрывоопасность полимерных материалов

М. Ю. Коптев, М. С. Сазонов

Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли, Кемерово

Процессы образования мелкодисперсной полимерной пыли в производственных цехах различных организаций в результате шлифовки, полировки, пескоструйной, дробеметной обработки изделий требуют обеспечения постоянной защиты жизни и здоровья людей. В [1] указаны требования к обязательной информации о пожарной опасности веществ и материалов.

Исследование горения полимерной пыли на основе акриловых смол проводилось в современной крупномасштабной испытательной камере объемом 20 литров [2–4] с использованием источника зажигания 10 кДж. Анализ мелкодисперсной полимерной пыли в диапазоне от 80 нм до 2 мм осуществляется с помощью лазерного анализатора размеров частиц Analysette 22 MicroTec plus.

Определены значения нижнего предела взрывоопасности, максимального давления взрывной волны, максимальной скорости роста давления взрывной волны, индекса пожаровзрывоопасности полимерной пыли, необходимые при определении категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности, при расчете взрывобезопасных пылей внутри технологического оборудования и трубопроводов, при проектировании вентиляционных систем, а также при расчете предельно допустимых взрывобезопасных концентраций пылей в воздухе рабочей зоны с потенциальными источниками зажигания, при разработке мероприятий по обеспечению пожарной безопасности объекта.

Пожарная и токсическая безопасность полимерных материалов (конвейерные ленты, вентиляционные трубы, полимерные смолы, пены, ампулы химического крепления, сетки шахтные и др.) и изделий неразрывно связаны друг с другом, потому что в большинстве случаев выделение токсичных веществ из этих материалов начинается при их тлении или горении.

Последние аварии и инциденты на шахтах показали значительное влияние отравляющего воздействия веществ (оксид углерода, оксиды азота, цианистый водород, диоксид серы), образующихся в результате сгорания не соответствующих требованиям пожарной безопасности вентиляционных труб, сеток для крепления выработок, на способность пострадавших к самоспасению. Значительную опасность по комплексу пожарных характеристик представляют не соответствующих требованиям пожарной безопасности полимерные смолы.

АО «НЦ ВостНИИ» оснащен современным оборудованием, укомплектован штатом высококлассных специалистов, проводит в рамках аккредитации (уникальный номер записи в реестре аккредитованных лиц в национальной системе аккредитации № RA.RU.21ЭМ21) определение обязательных показателей пожарной опасности В [5] для пылей (органической, металлической, полимерной, угольной и др.), твердых, жидких веществ и материалов, в том числе полимеров, производит входной контроль поставляемых на шахты материалов.

Список литературы

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ.
2. EN 14034-1-2004+A1-2011. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Determination of the maximum explosion pressure p_{max} of dust clouds.
3. EN 14034-2-2006+A1-2011. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Determination of the maximum rate of explosion pressure rise $(dp/dt)_{max}$ of dust clouds.

4. EN 14034-3-2006+A1-2011. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds.
5. ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84) ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.

Авторский указатель

- Абдуллина Д. Н., 194
Аверин А. Н., 122
Адуев Б. П., 79, 113
Алексенский А. Е., 168
Анисимов А. Г., 178, 189, 192
Анисимов М. С., 212
Анисимова М. А., 182
Анисичкин В. Ф., 55, 89, 227
Антипов М. В., 58, 59
Антишин Д. В., 121
Артемян А. К., 15
Астахов А. М., 121
Астахов Д. С., 157
Асылкаев А. М., 61
Аульченко В. М., 200, 201
Ахлюстин И. А., 205
Бабаева Г. С., 22
Бабкин А. В., 20
Бадретдинова Л. Х., 71
Базуров И. А., 212
Байдакова М. В., 126
Бакиров А. Р., 136
Бакиров А. Р., 111, 173
Балаганский И. А., 125
Балушкин С. В., 194
Баранов В. К., 210
Бармашова Д. В., 119
Батраев И. С., 147, 183
Батуев С. П., 65
Бедарев И. А., 160
Белокуров Г. М., 79, 113
Белоусова Н. С., 103, 104
Берников В. В., 162
Бирюкова М. А., 130
Бирюкова М. А., 62
Боброва А. И., 67
Боброва А. И., 66
Богданов А. Н., 68
Богданов Е. Н., 107
Борискин А. А., 143
Бородин Т. И., 94
Бочков А. В., 197
Боярских К. А., 52
Брагунцов Е. Я., 31, 32, 34, 35, 37
Бражников М. А., 94
Бродова И. Г., 78
Буйко А. М., 210, 211
Буковский П. Г., 119
Буравова С. Н., 18
Бутенко Е. А., 85
Бухтияров А. В., 199
Быковский Ф. А., 144
Вальяно Г. Е., 94
Варламов Е. С., 112
Варфоломеев Д. А., 26
Васецкий В. А., 153
Васильев А. А., 142, 143
Васильев В. А., 142, 143
Ведерников Е. Ф., 144
Ветрова А. А., 173
Виноградов А. В., 125
Вишняков А. Ю., 110
Власова М. А., 14–16
Волков В. Д., 113
Володина Н. А., 107, 108
Вольф В. А., 121
Воробьев А. В., 206
Воробьев Н. С., 126
Вуль А. Я., 168, 170
Гаенко О. И., 221
Галиулин И. Г., 61
Галиуллин И. Г., 117, 205, 206
Галкин Е. А., 15
Гаранин С. Ф., 210
Гармашев А. Ю., 42, 58, 78, 111, 122, 197, 206
Гаца М. Ю., 99
Георгиевская А. Б., 59
Герасимов Е. Ю., 114, 177
Гилев С. Д., 54
Глазунов В. А., 110
Глибенко О. В., 213
Глотов О. Г., 84, 103, 104
Глушак А. А., 200, 201
Глуценко А. Г., 111, 122
Глыбин А. М., 208, 210
Голубинский А. Г., 210
Голубничий Е. Г., 217
Гольшев А. А., 76
Гордеев В. В., 95
Горопашный Я. М., 122
Грачёва Н. А., 72

- Гребёнкин Г. А., 205
 Гремитских А. С., 117, 205, 206
 Грибанов Д. А., 111, 122
 Гришин И. Р., 66, 67
 Грищенко В. М., 153
 Грязнов А. Ю., 202
 Грязнов Е. Ф., 17
 Губин А. С., 100, 127, 212
 Гуськов А. В., 27, 29
 Гуськов П. Н., 208
 Дегтярев А. А., 64
 Денисов И. В., 186
 Десятов С. В., 88
 Дидейкин А. Т., 168
 Долгих С. М., 111, 122
 Долгобородов А. Ю., 94
 Долматов В. Ю., 88, 169
 Дудина Д. В., 178
 Душенок С. А., 82, 119
 Еганов К. В., 117, 205, 206
 Егоров Н. В., 210
 Егорычев Б. Т., 208
 Ежов В. М., 152, 226
 Ерофеев А. Н., 210
 Ершов А. П., 86, 115
 Еселевич Д. А., 106
 Есиков М. А., 178
 Жбанова Н. Н., 110
 Ждан С. А., 144
 Жилиева Н. С., 26
 Жуланов В. В., 200, 201
 Журавлев А. Н., 200
 Забусов П. В., 70
 Зайцев В. Н., 202
 Залозный В. А., 219
 Замураев В. П., 159
 Запорожченко Я. И., 219
 Зегря А. Г., 126
 Зегря Г. Г., 126
 Зельдович В. И., 194
 Злобин Б. С., 183
 Зубавичус Я. В., 199
 Иванников А. А., 189
 Иванов Д. А., 66, 67
 Ивановский А. В., 208–210
 Игнатов О. Л., 110
 Ильина М. А., 152, 226
 Ирничев Д. А., 210
 [Исмагилов З. Р.], 79, 113
 Ишметова Р. И., 134
 Кабаев А. А., 110
 Кабаев С. А., 110
 Кабилов К. Р., 71
 Кадочников Д. Ю., 64
 Казанцев С. Р., 199
 Казутин М. В., 95, 222
 Калашников Д. А., 59
 Калинина А. П., 159
 Карепов В. А., 210
 Карпенко Г. Я., 70
 Карпова А. А., 126
 Касымов Д. П., 217
 Кашкаров А. О., 58–61, 102, 114–118, 177, 199
 Квеглис Л. И., 192
 Кириленко В. Г., 94
 Кириленко Д. А., 126
 Кирюхина М. Н., 70, 107
 Киселев В. А., 200
 Киселев В. В., 183
 Киселев В. Г., 93
 Киселев В. П., 181
 Киселев С. П., 181
 Климушкин К. Н., 208, 210
 Клиначева Н. Л., 62, 124
 Клёнов А. И., 78
 Князева А. Г., 182
 Ковалдов В. В., 70
 Ковалев А. Е., 26
 Ковалев Ю. М., 130
 Козлов А. С., 82, 88, 119
 Козлов В. А., 222
 [Козлов Е. А.], 197
 Козырев Н. В., 95, 222
 Колесов В. И., 112, 127, 212
 Конюкова А. В., 106
 Конохов И. Е., 221
 Коптев М. Ю., 230
 Королев М. П., 184, 188
 Коротина А. В., 134, 175
 Корчемкина П. Г., 104
 Костин Н. А., 112
 Котомин А. А., 82, 119
 Кочкалов А. Д., 185
 Крайнов А. Ю., 105, 164, 216
 Красильников А. В., 26, 64
 Красильников В. Н., 106
 Краус Е. И., 40
 Крафт Я. В., 79, 113
 Крохалев А. В., 190, 191

- Крюкова О. Н., 182
Куделькин В. Б., 208, 210
Кудрявцев В. Н., 200
Кудряшова О. Б., 221
Кузавов В. Т., 224
Кузнецов И. А., 85, 101
Кузнецов С. Д., 210
Кузьмин Е. В., 184, 188
Кузьмин С. В., 167, 184, 185, 188, 190, 191
Кузьминых А. А., 115
Куликов Г. В., 194
Кульбакин И. С., 192
Купер К. Э., 199
Курбатов А. В., 98
Курепин А. Е., 85, 101, 102
Курепин С. А., 170
Кучко Д. П., 42, 78, 197, 206
Лавров В. В., 97
Ладов С. В., 20
Лазуренко Д. В., 189
Ларионов И. А., 202
Ларичкин А. Ю., 179
Лачугин А. А., 132
Лебедев В. С., 44
Левшенков А. И., 128
Лещевич В. В., 153
Лобачев А. С., 122
Ломоносов И. В., 39
Лоханов И. В., 202
Лошкарев А. Н., 23
Лукьянов Я. Л., 21
Лысак В. И., 167, 184, 185, 188, 190, 191
Майер А. Е., 72
Макаренко А. Е., 192
Маланчева Л. В., 85
Малахов А. Ю., 186
Малкин А. И., 85, 101
Мамышев В. И., 208–210
Манахова Е. С., 127, 212
Марков В. А., 74
Марсов А. А., 71, 132
Мартюшов С. Н., 165
Марчуков В. А., 88
Матцев Ю. И., 208, 210
Минцев В. Б., 39
Мирошкин К. М., 205
Мисюрин Ю. А., 123
Митрофанов А. А., 164
Михайлов А. Л., 43, 58, 59
Моисеева К. М., 164, 216
Мокеев А. А., 71, 132
Молодец А. М., 76
Моногаров К. А., 93
Мороз Б. Л., 177
Мочалова В. М., 96, 97
Музыря А. К., 61, 118
Муравлев Е. В., 221
Муравьев Н. В., 93
Мухин Д. В., 122
Назаров С. С., 35, 37
Наймарк О. Б., 50
Нарыжный С. Ю., 88
Нащекин А. В., 126
Нелюбина Н. В., 79
Нефедов А. В., 70
Николаев Д. Н., 39, 48
Никулин В. В., 150
Ниезбеков Н. Н., 186
Новаковский Д. В., 152
Новиков А. О., 202
Новосельцев А. С., 20
Ногин В. Н., 25, 26, 64
Нурмухаметов Д. Р., 79, 113
Огородников В. А., 59
Ольховский А. В., 26
Ондар А. А., 178
Онуфриев С. В., 44, 46
Осищев А. П., 109
Острик А. В., 48
Павленко А. В., 42, 197
Павлий В. В., 208
Пай В. В., 21, 149, 185
Пальчиков Е. И., 203
Панкратов Д. Г., 206
Панов К. Н., 70
Папырин П. В., 99
Параскун А. Г., 203
Певченко Б. В., 98
Пенязьков О. Г., 153
Перменов Д. Г., 123
Перминов В. В., 217
Петров А. С., 132
Петров Д. В., 42, 58, 111, 130, 135, 197
Петров Е. А., 98, 171, 173
Петров Л. Е., 54
Петрова А. Н., 78
Петюков А. В., 66, 67
Пивкина А. Н., 93
Пиминов П. А., 200
Пинаев А. В., 146

- Пинаев П. А., 146
 Пирозерский А. С., 23
 Пластинин А. В., 91
 Плотников А. А., 23
 Побережная У. М., 126
 Подурец А. М., 15
 Полюшко С. М., 208, 210
 Попов Д. А., 85, 101
 Попов Н. С., 189
 Попов Ю. В., 74
 Порхачев Н. В., 23
 Потанина Е. Ю., 27, 29
 Потрахов Н. Н., 202
 Просвирнин К. М., 61, 117, 118, 205, 206
 Прохоров Е. С., 158
 Прууэл Э. Р., 55, 58–61, 114, 117, 118, 198, 199
 Пушкин Д. В., 98
 Радченко А. В., 65
 Радченко П. А., 65
 Разумов Н. И., 192
 Ральников М. А., 197
 Рапота Д. Ю., 96, 97
 Рассоха С. С., 22
 Робаев К. С., 105
 Романова Е. А., 98
 Рубцов И. А., 58–61, 102, 114, 117, 118, 199
 Рудина А. Х., 133, 137
 Русинов Г. Л., 134, 175
 Рыбин Д. К., 147, 149, 179
 Рябчун А. М., 203
 Рязанцева А. А., 85, 101, 102
 Савватимский А. И., 44, 46
 Савенков Г. Г., 126
 Сазонов М. С., 230
 Сайков И. В., 186
 Сапрыкина Е. В., 70
 Сарафанников А. В., 205, 206
 Сатонкина Н. П., 114–116
 Свирский О. В., 14–16
 Сдобнов В. И., 111
 Селиванов В. В., 74
 Семашкин Г. В., 88
 Середкин Н. Н., 53
 Симонов А. Ю., 194
 Ситникова Н. И., 208, 210
 Смеликов В. Г., 23
 Смирнов А. С., 170
 Смирнов Е. Б., 42, 58, 60–62, 78, 130, 197, 205, 206
 Соболевская А. В., 133, 173
 Согрина О. Б., 59
 Сорокин И. В., 103
 Сосиков В. А., 96, 97
 Сосиков В. А., 186
 Соснин В. А., 81
 Сотский М. Ю., 66, 67
 Спирин И. А., 58, 59
 Станкевич А. В., 111, 133–137, 139, 173, 175, 207
 Становов А. А., 107
 Стариков Я. Е., 62
 Столбиков М. Ю., 60
 Столяров П. Н., 123
 Стрельцова М. С., 137
 Студенников А. А., 58, 60, 61, 116–118, 199
 Сурначёв И. Н., 98
 Суоров М. С., 111
 Суородин Г. С., 103
 Сыроватень А. А., 160
 Сырцов А. Б., 122
 Сычев А. И., 155
 Тамашков В. О., 121
 Таржанов В. И., 197
 Тен К. А., 58–61, 102, 117, 118, 177, 199
 Терещенко М. Н., 100, 127, 212
 Тетервова И. В., 161
 Титов В. М., 200, 201
 Титов С. С., 221
 Титова В. Б., 107–109
 Ткач Е. О., 110
 Ткаченко М. И., 15
 Толочко Б. П., 58, 60, 118, 137, 192, 199
 Толщина С. Г., 134, 175
 Торопов К. С., 208, 210
 Торунов С. И., 96, 97
 Тропин Д. А., 160
 Троцюк А. В., 161
 Тужиков О. О., 191
 Туманик А. С., 116
 Улин В. П., 126
 Ульяницкий В. Ю., 147, 149, 178, 179
 Утенков А. А., 59
 Уткин А. В., 73, 96, 97
 Ухабин О. А., 170
 Ухина А. В., 178
 Федосеев А. В., 59
 Федотова К. В., 162
 Фоменко В. В., 88
 Фомин В. М., 73

- Фомин Е. В., 72
Фомин П. А., 161
Фрейман В. М., 126
Фролов Д. В., 111, 122
Фролов С. М., 141
Халеменчук В. П., 58, 60, 61, 118, 199
Харламов В. О., 190, 191
Хаустов С. В., 149, 185
Хейфец А. Э., 194
Хищенко К. В., 46, 51–53
Хлебановский Н. А., 114, 115, 177
Хомская И. В., 194
Худяков М. А., 99
Цибиков Э. С., 208, 210
Цыбрий А. И., 35, 37
Чарушин В. Н., 134
Чашников Е. А., 150
Чеканов М. А., 98
Чемагина И. В., 133, 134, 136
Червонная Н. А., 152
Чернавкин П. С., 100, 127, 212
Черников Д. Р., 190, 191
Чумаков И. В., 121
Чумаков Ю. А., 182
Шабалин И. И., 40
Шакула М. Ю., 97
Шаповалов Е. В., 208, 210
Шахрай Д. В., 186
Шашков Е. В., 126
Швидченко А. В., 168
Шевченко В. Г., 106
Шестаков М. А., 130
Шестаковская Е. С., 62, 124
Шехтман Л. И., 60, 199–201
Ширшова М. О., 70, 107, 108
Шихова Ю. А., 109
Шишов Н. И., 85
Штерцер А. А., 147, 183
Юдин Н. В., 112
Юношев А. С., 91
Юртов И. В., 59
Юсупов Д. Т., 64
Ягодников Д. А., 99, 162, 202
Якимов А. С., 217
Яковенко Р. В., 109
Яковлев И. А., 157
Яловец А. П., 62, 124
Яненко В. А., 210
Янковский Б. Д., 94
Яновский Л. С., 152, 226
- Яшин В. Б., 85

Научное издание

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения

18 – 21 сентября 2023 г.

Новосибирск, Россия

Тезисы докладов

Оригинал-макет подготовлен Институтом гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН

Дизайн обложки В. Ю. Антонов

Подписано в печать 15.07.2023

Усл. печ. л. 27.6

Тираж 200 экз.

Формат 60×84 1/8.

Заказ № 174.

Сибирское отделение РАН
630090, г. Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 17
Отпечатано в Сибирском отделении РАН
630090, г. Новосибирск, Морской просп., 2
Тел. 330-84-66, e-mail: e.lyannaya@sb-ras.ru

ISBN 978-5-6049900-2-5



9 785604 990025