

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ИНСТИТУТ ГИДРОДИНАМИКИ
ИМ. М. А. ЛАВРЕНТЬЕВА

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

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

18 – 21 сентября 2018 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Новосибирск
2018

Программный комитет:

Титов В. М., академик РАН — сопредседатель (Новосибирск)

Головин С. В., д.ф.-м.н. — сопредседатель (Новосибирск)

Прууэл Э. Р., к.ф.-м.н. — зам. сопредседателя (Новосибирск)

Кашкаров А. О., к.ф.-м.н. — уч. секретарь (Новосибирск)

Фортов В. Е., академик РАН (Москва)

Левин В. А., академик РАН (Владивосток)

Пенязьков О. Г. академик (Минск, Беларусь)

Фомин В. М., академик РАН (Новосибирск)

Канель Г. И., чл.-корр. РАН (Москва)

Селемир В. Д., чл.-корр. РАН (Саров)

Федорук М. П., чл.-корр. РАН (Новосибирск)

Васильев А. А., д.ф.-м.н. (Новосибирск)

Кедринский В. К., д.ф.-м.н. (Новосибирск)

Пай В. В., д.ф.-м.н. (Новосибирск)

Коробейников С. Н., д.ф.-м.н. (Новосибирск)

Зарко В. Е., д.ф.-м.н. (Новосибирск)

Шарыпов О. В., д.ф.-м.н. (Новосибирск)

Долгобородов А. Ю., д.ф.-м.н. (Москва)

Михайлов А. Л., д.т.н. (Саров)

Свирский О. В., д.ф.-м.н. (Саров)

Петров Д. В., д.т.н. (Снежинск)

Сысолятин С. В., д.х.н. (Бийск)

Зелепугин С. А., д.ф.-м.н. (Томск)

Крайнов А. Ю., д.ф.-м.н. (Томск)

Андреев В. К., д.ф.-м.н. (Красноярск)

Алексеев Г. В., д.ф.-м.н. (Владивосток)

Мансуров З. А. д.х.н. (Алматы, Казахстан)

Гаврилок С. Л., профессор (Марсель, Франция)

Коробкин А. А., профессор (Норидж, Англия)

Мали В. О., к.ф.-м.н. (Новосибирск)

Бондарь Е. А., к.ф.-м.н. (Новосибирск)

Ладов С. В., к.т.н. (Москва)

Уткин А. В., к.ф.-м.н. (Москва)

Копченев В. И., к.ф.-м.н. (Москва)

Богданов А. Н., к.ф.-м.н. (Москва)

Мануйлович И. С., к.ф.-м.н. (Москва)

Музыря А. К., к.т.н. (Снежинск)

Смирнов Е. Б., к.т.н. (Снежинск)

Всероссийская конференция "Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения", приуроченная к 85-летию академика Владимира Михайловича Титова, 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 проводится при поддержке Сибирского отделения РАН, Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, редколлегий журналов "Физика горения и взрыва" и "Прикладная механика и техническая физика".

Содержание

1	Кумулятивные явления, в том числе магнитная кумуляция	10
	Фомин В. М., Звегинцев В. И., Брагунцов Е. Я. <i>Особенности растяжения и разрушения кумулятивных струй</i>	10
	Круглов П. В., Колпаков В. И. <i>Особенности моделирования процесса формирования высокоскоростных элементов из сегментных облицовок снарядаформирующих зарядов</i>	11
	Ладов С. В., Никольская Я. М., Федоров С. В. <i>Численный анализ формирования кумулятивных струй зарядами с коническими и полусферическими облицовками переменной толщины</i>	12
	Смеликов В. Г., Середа Н. В., Лопатникова Т. В., Плотников А. А. <i>К вопросу о металлофизической культуре процесса деформации взрывом текстурированных кумулятивных облицовок перфораторов и различных боеприпасов</i>	13
	Пай В. В., Титов В. М., Лукьянов Я. Л., Пластинин А. В. <i>Неустойчивость конической облицовки в процессе образования кумулятивной струи, измерение ее температуры</i>	14
	Рассоха С. С., Ладов С. В., Бабкин А. В. <i>Инженерная методика оценки вращательного движения ребренных облицовок</i>	15
	Свирский О. В., Власова М. А., Шейков Ю. В. <i>Проблемные вопросы применения ВС на основе СЛ-20 (ГАВ) в кумулятивных зарядах</i>	16
	Селемир В. Д., Репин П. Б., Демидов В. А., Борискин А. С., Быков А. И., Борисков Г. В., Таценко О. М., Коршунов А. С. <i>Взрывомагнитные генераторы в физике высоких плотностей энергии</i>	17
	Швецов Г. А., Матросов А. Д. , Станкевич С. В., Федоров С. В., Бабкин А. В., Ладов С. В. <i>Влияние магнитных полей на работу кумулятивных зарядов</i>	18
	Шнеерсон Г. А., Кривошеев С. И., Адамьян Ю. Э., Алексеев Д. И., Магазинов С. Г. <i>Особенности краевого эффекта при двумерной нелинейной диффузии сильного импульсного магнитного поля вблизи края проводника</i>	18
	Картунов А. А., Швидлер В. П., Васильев В. В. <i>Практическая реализация эффекта кумуляции в малогабаритных боеприпасах оружия ближнего боя</i>	19
	Романов В. В., Демин Р. В., Брагунцов Е. Я. <i>Анализ перспективности использования порошковых материалов в облицовках кумулятивных зарядов</i>	20
	Романов В. В., Демин Р. В., Брагунцов Е. Я. <i>Совершенствование материалов для облицовок короткофокусных малогабаритных кумулятивных зарядов</i>	20
	Шикун Н. В. <i>К вопросу о механизме пробития бетонных преград кумулятивными зарядами с облицовками из вольфрамсодержащего композитного материала</i>	22
2	Ударно-волновые явления, высокоскоростной удар и динамические многофазные течения	24
	Болеста А. В., Фомин В. М. <i>Молекулярно-динамическое исследование высокоскоростного взаимодействия твердой частицы с поверхностью поликристаллической меди</i>	24
	Большакова Е. С., Кедринский В. К., Вшивков В. А. <i>Фокусировка цилиндрической волны разрежения в слое двухфазной жидкости со свободной поверхностью</i>	25
	Гилев С. Д. <i>Малопараметрическое уравнение состояния алюминия</i>	25

ГУБСКИЙ К. Л., ГОРБАШОВА М. А., ЯСТРЕБЦЕВ А. А., НОРКИН С. В., КУЗНЕЦОВ А. П. <i>Многоканальный интерферометр прямого оптического гетеродирования для исследования ударно-волновых процессов в веществе</i>	26
КУЗНЕЦОВА Т. В., ВЛАСОВА А. М., ГУСЬКОВ А. В., МИЛЕВСКИЙ К. Е. <i>Можно ли пузырьками создавать завесу от ударных звуковых волн?</i>	27
ДАВЫДОВ В. Ю., ГУБИН А. С., ТЕРЕЩЕНКО М. Н., БОДНАРЮК А. Д. <i>О взрывном метании трубок и пластин, изготовленных из различных металлов</i>	29
ДАВЫДОВ В. Ю., ГУБИН А. С., ТЕРЕЩЕНКО М. Н., БОДНАРЮК А. Д. <i>О металлотельной способности комбинированных разрывных зарядов, содержащих дисперсный алюминий в тонком периферийном слое</i>	30
ДОРОХОВ Н. С., ЕСЬКОВ Д. А., ШИШКИН В. П. <i>Исследование процессов взаимодействия БПС с движущимися броневыми плитами</i>	31
ЕГОРОВА М. С., МУРЗОВ С. А., ЖАХОВСКИЙ В. В., ПАРШИКОВ А. Н. <i>Прохождение ударной волны через взвесь металлических частиц в жидкости</i>	32
БОРДЗИЛОВСКИЙ С. А., КАРАХАНОВ С. М., ХИЩЕНКО К. В. <i>Тепловое излучение воды за фронтом отражённой ударной волны</i>	33
КУЗНЕЦОВ А. П., МИХАЙЛЮК А. В., ГУБСКИЙ К. Л., ЯСТРЕБЦЕВ А. А., НОРКИН С. В. <i>Диагностические комплексы для исследования ударно-волновых процессов в широком диапазоне нагрузений</i>	34
КРАУС Е. И., МЕЛЬНИКОВ А. Ю., ФОМИН В. М., ШАБАЛИН И. И. <i>Удар по ледяным преградам: эксперимент и моделирование</i>	35
ХРАМЦОВ П. П., ВАСЕЦКИЙ В. А., МАХНАЧ А. И., ДОРОШКО М. В., ГРИЩЕНКО В. М., ШИХ И. А. <i>Легкогазовая метательная установка для исследования высокоскоростного ударного взаимодействия</i>	36
БЫЧКОВ А. Л., КОРОБЕЙНИКОВ С. М., КОРОБЕНКОВА А. Ю., РИДЕЛЬ А. В., КАРПОВ Д. И., КУПЕРШТОХ А. Л., МЕДВЕДЕВ Д. А., МЕРЕДОВА М. Б. <i>Пузырьки в электрическом поле: динамика и частичные разряды</i>	37
ПАЛЬЧИКОВ Е. И. <i>Разрушение электродов в трёхэлектродной импульсной рентгеновской трубке с взрывной эмиссией</i>	38
ПАЛЬЧИКОВ Е. И., ДОЛГИХ А. В., КЛЫПИН В. В., РЯБЧУН А. М., САМОЙЛЕНКО М. С. <i>Импульсный рентгеновский аппарат на основе комбинированного спирального генератора</i>	39
СОТСКИЙ М. Ю., ГЕЛИН Д. В., КРУТОВ И. С., ЛЫСОВ Д. А., МАРКОВ В. А., МАРКОВ И. В., ЧЕТВЕРНИН М. Ю. <i>Новые технологии визуализации и измерения параметров баллистических процессов и динамических течений</i>	40
ВЛАСОВ А. Н., ЖУРАВЛЕВ А. В., ПАШЕНЦЕВ В. А., СМИРНОВ В. Н., СМИРНОВ Е. Б., СТОЛБИКОВ М. Ю., ЧЕРЕМАЗОВ В. Е., ТЕН К. А., КАШКАРОВ А. О., РУБЦОВ И. А. <i>Рентгенографические исследования динамики развития пылевых струй с поверхности металла</i>	41
ТОЛКАЧЕВ В. Ф., ЗЕЛЕПУГИН С. А. <i>Анализ проникающей способности стержневых ударников из пористых материалов</i>	42
МАЕВСКИЙ К. К., КИНЕЛОВСКИЙ С. А. <i>Моделирование термодинамических параметров высокопористых смесей при ударно-волновом воздействии с малопараметрическим уравнением состояния компонентов</i>	43
ХИЩЕНКО К. В. <i>Уравнение состояния и фазовые превращения молибдена при высоких давлениях и температурах</i>	44
ТЕСЛЕНКО В. С. <i>От подводных взрывов к газо-импульсным водным движителям</i>	44

АХМЕТОВ Д. Г., НИКУЛИН В. В., ПЛАСТИНИН А. В., ЧАШНИКОВ Е. А., КОПЬЕВ В. Ф., ЗАЙЦЕВ М. Ю. <i>Генерация крупномасштабных высокоскоростных вихревых колец при подрыве ВВ</i>	45
ПЕТРОВ Д. В., ЗАБАБАХИН И. Е., ШУБИН О. Н., СИМОНЕНКО В. А., ЕЛСУКОВ В. П. <i>Аналитические методы в задачах взаимодействия тел (проникание)</i>	46
СМИРНОВ Е. Б., ПЕТРОВ Д. В., ГАРМАШЕВ А. Ю., МУЗЫРЯ А. К., ДОЛГИХ С. М. <i>Исследование однократного и двукратного сжатия плексигласа и поликарбоната с применением синхротронного излучения</i>	47
ТАРАСОВ Ф. И., ГАРМАШЕВ А. Ю., ДОЛГИХ С. М., СМОРНОВ Е. Б., НИКОЛАЕВ А. Ю., ЮСУПОВ Д. Т., МАЛЕВ В. В., КАЛУНИКОВ Р. Н. <i>Определение скорости звука в ударно-сжатой нержавеющей стали 12Х18Н10Т методом догоняющей разгрузки с применением пьезооптических датчиков</i>	47
КРЕМЕНКО С. И. <i>Измерение распределения массы микрочастиц при выходе ударной волны на свободную поверхность</i>	47
ГЕОРГИЕВСКИЙ П. Ю., ЛЕВИН В. А., СУТЫРИН О. Г. <i>Кумулятивные явления при высокоскоростном столкновении тел с газовыми неоднородностями</i>	48
КРУТОВА И. Ю. <i>Аналитическое и численное моделирование течений газа в потоках специального вида</i>	49
3 Материалы и конструкции при динамическом воздействии	51
БОЙКО М. М., ГРЯЗНОВ Е. Ф., КЛИМАЧКОВ С. И., ОХИТИН В. Н., ПЕРЕВАЛОВ И. А., АХМЕТШИН Р. М., ЕРЁМИН Г. В., ЧЕРНОВ А. И., ЗАВЬЯЛОВ В. С. <i>Зависимость прогиба балки, нагруженной взрывом от массы заряда ВВ</i>	51
ГРЯЗНОВ Е. Ф., УТКИН А. В. <i>Характеристики динамической прочности ряда конструкционных сталей</i>	51
ЗЕЛЬДОВИЧ В. И., ФРОЛОВА Н. Ю., ХЕЙФЕЦ А. Э., ХОМСКАЯ И. В., СМОРНОВ Е. Б., ДЕГТЯРЁВ А. А., КОВАЛЬ А. В., ШОРОХОВ Е. В. <i>Деформационные и откольные явления при сжатии медных цилиндрических оболочек</i>	52
КОВАЛЬ А. В., ШИРИНКИНА И. Г., ПЕТРОВА А. Н., БРОДОВА И. Г., СМОРНОВ Е. Б., ШОРОХОВ Е. В., АСТАФЬЕВ В. В., ЯБЛОНСКИХ Т. И. <i>Структурные превращения в алюминиевых цилиндрических оболочках при динамическом нагружении</i>	53
КУЗАВОВ В. Т. <i>Новая модель эрозионного разрушения</i>	54
КРИВОШЕЕВ С. И., АДАМЬЯН Ю. Э., АЛЕКСЕЕВ Д. И., МАГАЗИНОВ С. Г. <i>Высокоскоростное деформирование медных образцов магнитно-импульсным способом</i>	55
ХОМСКАЯ И. В., РАЗОРЕНОВ С. В., ШОРОХОВ Е. В., ГАРКУШИН Г. В., АБДУЛЛИНА Д. Н. <i>Механические свойства ультрамелкозернистой меди при ударно-волновом нагружении</i>	56
ГОЛОВНЕВ И. Ф., ГОЛОВНЕВА Е. И., ВОРОНИН М. С., ПРУУЭЛ Э. Р. <i>Численное исследование релаксации напряжения в наноструктурах в процессе одноосной деформации</i>	57
ГАРМАШЕВ А. Ю., ДЕГТЯРЁВ А. А., ДОЛГИХ С. М., КЛЁНОВ А. И., ПЕТРОВ Д. В., ПЕТУХОВ Е. А., СИДОРОВ К. С., СМОРНОВ Е. Б., ШИСТИРИКОВ М. А., ЮСУПОВ Д. Т. <i>Получение диаграмм динамического деформирования конструкционных материалов методом составных стержней Гопкинсона</i>	58
4 Энергетические материалы, горение, детонация	60
АДУЕВ Б. П., НУРМУХАМЕТОВ Д. Р., ЛИСКОВ И. Ю., БЕЛОКУРОВ Г. М., НЕЛЮБИНА Н. В. <i>Взрывчатое разложение композитов на основе тэна и гексогена с включениями ультрадисперсных частиц алюминия при импульсном лазерном воздействии</i>	60

АДУЕВ Б. П., НУРМУХАМЕТОВ Д. Р., БЕЛОКУРОВ Г. М., НЕЛЮБИНА Н. В. <i>Опτικο-акустические эффекты в тетранитрате пентаэритрита с включениями ультрадисперсных частиц алюминия при импульсном лазерном воздействии</i>	61
АСТАХОВ А. М., АНТИШИН Д. В. <i>О детонационных параметрах некоторых бескислородных вв</i>	62
БАДРЕТДИНОВА Л. Х., КОСТИЦЫН О. В., СМИРНОВ Е. Б., СТАНКЕВИЧ А. В., ТЕН К. А., ТОЛОЧКО Б. П., БАЗОТОВ В. Я. <i>Термодинамика молекулярных кристаллов на основе дифрактометрических исследований</i>	63
ГОРДЕЕВ В. В., КАЗУТИН М. В., КОЗЫРЕВ Н. В. <i>Изучение свойств нанотермитной композиции CuO/Al с добавками триазолов</i>	64
ГОРДЕЕВ В. В., КАЗУТИН М. В., КОЗЫРЕВ Н. В., КАШКАРОВ А. О., ТЕН К. А. <i>Применение синхротронного излучения для изучения процесса горения нанотермита CuO/Al</i>	65
ГУСАРОВА Е. В., СЕЛЕЗЕНЕВ А. А., КОРОЛЕВ В. Ю. <i>Расчет характеристик изотермического и ударно-волнового сжатия энергетических материалов методом молекулярной динамики</i>	65
ДАНИЛКО Д. А., ВОСТРИКОВ В. А. <i>Измерение электропроводности углерода разной модификации в статике</i>	66
ДОЛГОВОРОДОВ А. Ю. <i>Механохимический способ управления процессами энерговыделения смесей окислитель-горючее</i>	67
ДУДИН С. В., СОСИКОВ В. А., ТОРУНОВ С. И. <i>Экспериментальные исследования цилиндрической детонации на лабораторной установке</i>	68
ЕРШОВ А. П., КАШКАРОВ А. О., ПРУУЭЛ Э. Р., РУБЦОВ И. А., САТОНКИНА Н. П., ТЕН К. А. <i>Детонация ВВ, содержащих наноразмерные включения</i>	69
ЕРШОВ А. П., РУБЦОВ И. А. <i>Режимы детонации взрывчатых веществ при низкой начальной плотности</i>	70
ДУБКОВ А. С., ЗВЁЗДКИН В. М. <i>Промышленное производство и перспективы использования 1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензола (ТАТБ) - безопасного взрывчатого вещества</i>	71
ЗУБАРЕВА А. Н., УТКИН А. В., ЛАВРОВ В. В. <i>Ударно-волновые свойства инертных и химически активных пористых сред</i>	72
КУРЕПИН А. Е. <i>Об измерениях методом Хельда импульса в ближайшей зоне взрыва</i>	73
МАНСУРОВ З. А., АТАМАНОВ М. К. <i>Новые наноуглеродные энергоёмкие материалы</i>	73
МИХАЙЛОВ А. Л. <i>Наноструктурированные ВВ - путь к прецизионным взрывным технологиям</i>	74
МОЧАЛОВА В. М., УТКИН А. В., РЫКОВА В. Е. <i>Экспериментальное исследование детонационных процессов в смеси тетранитрометан/метанол</i>	75
МУРЗОВ С. А., ПАРШИКОВ А. Н., ЖАХОВСКИЙ В. В., ДЬЯЧКОВ С. А., ЕГОРОВА М. С., ЯНИЛКИН А. В. <i>Мезоскопическое моделирование прохождения ударной волны в пористой структуре пентаэритриттетранитрата</i>	76
LISKOV I. Y., NIKITIN A. P., ILYAKOVA N. N., ZVEREV A. S. <i>Combustion of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene (DADNE) initiated by an electron beam</i>	77
АДУЕВ Б. П., НУРМУХАМЕТОВ Д. Р., ЛИСКОВ И. Ю., БЕЛОКУРОВ Г. М. <i>Влияние условий газодинамической разгрузки на лазерное иницирование тэна</i>	78
АДУЕВ Б. П., НУРМУХАМЕТОВ Д. Р., ЛИСКОВ И. Ю., БЕЛОКУРОВ Г. М. <i>Скорости ударных волн в воздухе при лазерном иницировании взрыва тэна и композиций тэна с включениями алюминия</i>	79
ПЕТЮКОВ А. В., ПЫРЬЕВ В. А. <i>Исследование метательного и импульсного действия зарядов ВВ в ближней зоне взрыва</i>	80

ПОРЯЗОВ В. А., КРАЙНОВ А. Ю. <i>Математические модели горения металлизированных смесевых твердых топлив</i>	81
ПРАЗЯН Т. Л., ЖУРАВЛЕВ Ю. Н. <i>Первопринципные исследования механических свойств и факторов чувствительности PETN</i>	82
САМОСВАТ Д. М., ЧИКАЛОВА-ЛУЗИНА О. П., ЗЕГРЯ Г. Г. <i>Механизм инициирования взрывчатых превращений в нанопористом кремнии в контакте с окислителем</i>	83
САТОНКИНА Н. П., ЕРШОВ А. П. <i>Распределение электропроводности при детонации бензотрифуроксана</i>	84
САТОНКИНА Н. П. <i>Природа высокой электропроводности при детонации органических конденсированных взрывчатых веществ</i>	85
УТКИН А. В., МОЧАЛОВА В. М. <i>Ударно-волновые и детонационные свойства пресованного нитрата гидразина</i>	86
ЮНОШЕВ А. С., ПЛАСТИНИН А. В., КАРАХАНОВ С. М., БОРДИЛОВСКИЙ С. А. <i>Детонационное давление эмульсионного взрывчатого вещества</i>	87
ЯКУШЕВ В. В., АНАНЬЕВ С. Ю., УТКИН А. В., ЖУКОВ А. Н., ДОЛГОВОРОДОВ А. Ю. <i>Скорость звука в ударносжатых образцах из реакционноспособных смесей порошков никеля и алюминия различной дисперсности</i>	88
ДАШАПИЛОВ Г. Р., КАШКАРОВ А. О., РУБЦОВ И. А., ТЕН К. А. <i>Структура взрывчатых композитов, содержащих одностенные углеродные нанотрубки</i>	88
БИРЮКОВА М. А., ПЕТРОВ Д. В., ГАРМАШЕВ А. Ю., МУЗЫРЯ А. К., КОВАЛЁВ Ю. М., СМИРНОВ Е. Б. <i>Уравнение состояния ТАТБ на основе статических и динамических экспериментов</i>	89
КИСЕЛЕВ А. Н., КОВАЛЬ А. В., ГАРМАШЕВ А. Ю., ДОЛГИХ С. М., СМИРНОВ Е. Б. <i>Распространение детонации по криволинейной траектории в пластичном ВВ</i>	89
СУХИНИН С. В. <i>Газодинамика самоподрыва РДТТ при запуске двигателя</i>	90
АНИСИЧКИН В. Ф., ПРУУЭЛ Э. Р. <i>Дополнение к основным соотношениям на фронте ударной волны</i>	91
СИМОНЕНКО В. Н., КИСКИН А. Б., ЗАРКО В. Е., КАЛМЫКОВ П. И., СИДОРОВ К. А. <i>Исследование горения модельных композиций на основе фуразанотетразиндиоксида, динитродиазапентана и тетразольного сополимера</i>	92
ТИТОВ В. М., ТЕН К. А., ТОЛОЧКО Б. П., АУЛЬЧЕНКО В. М. <i>Динамическая регистрация ультра-дисперсных углеродных частиц в детонационных волнах</i>	93
LISKOV I. Y., NIKITIN A. P., ILYAKOVA N. N., ZVEREV A. S. <i>Propagation rate of DADNE polycrystals' explosion products initiated by pulsed electron beam</i>	94
5 Динамические течения с химическими реакциями	95
БАРАНЫШИН Е. А., ПЕНЯЗЬКОВ О. Г., КРИВОШЕЕВ П. Н., СЕВРУК К. Л. <i>Ускорение пламени и возникновение горячих точек при переходе горения в детонацию в смесях $(C_2H_2 + 2,5 O_2) + 70\% Ar / 60\% N_2$ в гладкой трубе</i>	95
ВАСИЛЬЕВ А. А. <i>Энерговыделение в волнах многофронтной детонации</i>	96
ЕЗДИН Б. С., КАЛЯДА В. В., ЗАРВИН А. Е., ЯСКИН А. С. <i>Гипербарическая конверсия легких углеводородов быстрым циклическим сжатием</i>	97
ЕРМОЛАЕВ И. К., БОГОЛЕПОВ В. В., СУХАНОВСКАЯ Л. Д. <i>Экспериментальное исследование воздействия на течение в ближнем следе тела вращения за счет высокотемпературного горения композитов</i>	98
БЫКОВСКИЙ Ф. А., ЖДАН С. А., ВЕДЕРНИКОВ Е. Ф. <i>Непрерывная спиновая и многофронтная детонация смесей метан/водород – воздух</i>	99

КАЛИНИНА А. П., ЗАМУРАЕВ В. П. Управление формированием околосвуковой области в сверхзвуковом потоке с помощью дросселирующей струи и пристеночного выделения тепла	100
ЛЕВИН В. А., ЖУРАВСКАЯ Т. А. Управление волной детонации в газовой смеси	101
МАРКОВ В. А., ВАСЕКИН А. А., ГЕЛИН Д. В., ГЕЛИН Н. Д., ЛЫСОВ Д. А., ПЕТЮКОВ А. В. Экспериментальные исследования передачи детонации при взрыве гремучего газа, заключенного в упругую оболочку	102
ПОПОВ Е. Л., САМСОНОВ А. Н., БЫКОВСКИЙ Ф. А., ВЕДЕРНИКОВ Е. Ф. МГД эффекты при непрерывной спиновой детонации	103
ГАПОНОВ С. А., СМОРОДСКИЙ Б. В. Сверхзвуковой пограничный слой на сублимирующей поверхности и его линейная устойчивость	104
ТРОЦЮК А. В., ФОМИН П. А. Моделирование нерегулярной ячеистой структуры детонационной волны в двух-топливной смеси	105
НИКОЛАЕВ Ю. А. , ФОМИН П. А. Тунгусское событие как детонация природной объемно-детонирующей системы	106
ШАРГАТОВ В. А., ЧУГАЙНОВА А. П., ГОРКУНОВ С. В. Аналитическое описание ударной волны, распространяющейся в канале с периодически расположенными углублениями	107
МАНЖОС Е. В., КАКУТКИНА Н. А., КОРЖАВИН А. А., РЫЧКОВ А. Д. Иницирование волны фильтрационного горения газа нагретым участком инертной пористой среды	108
ШАРГАТОВ В. А., ЧУГАЙНОВА А. П. Устойчивость структуры особых разрывов для обобщенного уравнения Кортевега-де Вриза-Бюргерса	109
РЫБНИКОВ А. И., СИМОНОВ Е. В. Трехмерное численное моделирование непрерывной спиновой детонации водородовоздушной смеси в кольцевой камере с использованием пакета Openfoam	110
ФОМИН В. М., ЗВЕГИНЦЕВ В. И., БРАГУНЦОВ Е. Я. Современные направления развития газодинамических методов высокоскоростного метания массивных тел	111
6 Задачи промышленности и безопасность	112
АЗАТЯН В. В., ТРУБИЦЫН А. А., ТРУБИЦЫНА Н. В. Цепная природа горения и взрыва метано-воздушных смесей и воздействие химически активных присадок	112
ГОФФАРТ Т. В. Практические задачи обеспечения безопасности в угольных шахтах	112
КОСТЕРЕНКО В. Н., ПАЛЕЕВ Д. Ю., ЛУКАШОВ О. Ю., ВАСЕНИН И. М., ШРАГЕР Э. Р., КРАЙНОВ А. Ю. Физико-математическая модель инертизации рудничной атмосферы в выработках аварийного участка угольной шахты	114
КОСТЕРЕНКО В. Н., ПАЛЕЕВ Д. Ю., ЛУКАШОВ О. Ю., ВАСЕНИН И. М., ШРАГЕР Э. Р., КРАЙНОВ А. Ю. Численное моделирование нестационарных процессов вентиляции шахты при распространении пожара	115
КНЯЗЕВА А. Г., МАСЛОВ А. Л. Численное моделирование газификации сланцевого пласта	116
ОРЛОВ С. А., МАТВЕЕВ К. А., РАСТОРГУЕВ Г. И. О некоторых особенностях испытаний аппаратуры на высокоинтенсивные ударные воздействия	116
МЕЩЕРЯКОВ Ю. П., ШТЕРЦЕР А. А., ЗЛОБИН Б. С. Взрывные камеры с металлическими экранами	117
МОИСЕЕВА К. М., КРАЙНОВ А. Ю. Влияние выхода летучих компонентов на скорость горения аэрозвеси угольной пыли	118
МОИСЕЕВА К. М., КРАЙНОВ А. Ю., ДЕМЕНТЬЕВ А. А. Определение критических условий зажигания бидисперсного порошка алюминия в воздухе	120

ПИНАЕВ А. В., ВАСИЛЬЕВ А. А. <i>О взрывчатости сульфидных руд в ударных волнах</i>	121
АЗАТЯН В. В., АБРАМОВ С. К., ПРОКОПЕНКО В. М., ТРУБИЦЫН А. А., ТРУБИЦЫНА Н. В., ФИЛАТОВ Ю. М. <i>Воздействие ингибирующих составов и угольной пыли на возгорание и взрыв метано-воздушных смесей</i>	122
7 Обработка и синтез материалов при динамическом воздействии	124
АЛЕКСЕНСКИЙ А. Е., ВУЛЬ А. Я., ДИДЕЙКИН А. Т., ШВИДЧЕНКО А. В., ЮДИНА Е. Б. <i>Получение, свойства и применение гидрозолей и гелей детонационного наноалмаза</i>	124
БАЛАГАНСКИЙ И. А., БАТРАЕВ И. С., УЛЬЯНИЦКИЙ В. Ю., ПЛАСТИНИН А. В., ШТЕРЦЕР А. А., ЗИМОГЛЯДОВА О. А. <i>Анализ процесса взрывного обжаривания двухслойных корунд/медь трубок</i>	125
БУКРИНА Н. В., БАРАНОВСКИЙ А. В. <i>Эволюция температуры стенок реактора при синтезе композитов из порошковых смесей в режиме динамического теплового взрыва</i>	126
КИСЕЛЕВ С. П., МАЛИ В. И. <i>Моделирование высокоскоростного косоугольного соударения металлических пластин методом молекулярной динамики</i>	128
ЗЛОБИН Б. С., КИСЕЛЕВ В. В., ШТЕРЦЕР А. А. <i>О влиянии механических свойств материалов на волнообразование при сварке взрывом</i>	129
КИСЕЛЕВ С. П., КИСЕЛЕВ В. П. <i>Численное моделирование методом молекулярной динамики разрушения нанокристалла интерметаллида $TiAl_3$</i>	130
КНЯЗЕВА А. Г. <i>Моделирование синтеза композитов в режиме теплового взрыва: история и приложения</i>	131
КУЗЬМИН Е. В., КУЗЬМИН С. В., ЛЫСАК В. И., КОРОЛЕВ М. П. <i>Расширение области свариваемости и исследование электрофизических свойств композитов при взрывном нагружении с воздействием ультразвука</i>	132
ШТЕРЦЕР А. А., УЛЬЯНИЦКИЙ В. Ю., БАТРАЕВ И. С., РЫБИН Д. К. <i>Микро- и наноструктурные керамические детонационные покрытия</i>	133
ПЕРВУХИН Л. Б. <i>Промышленное производство биметаллов сваркой взрывом для атомного, нефтехимического, металлургического и судостроительного машиностроения</i>	134
ХАРЛАМОВ В. О., КРОХАЛЕВ А. В., ТУПИЦИН М. А., КУЗЬМИН С. В., ЛЫСАК В. И. <i>Получение твердых сплавов взрывным прессованием смесей порошков карбидов с металлами</i>	135
ЧУМАКОВ Ю. А. <i>Моделирование синтеза горением композита из смеси порошков $Ti - Al - C$</i>	136
ЕФРЕМОВ В. П., ЗАКАТИЛОВА Е. И. <i>Твердотельные фазовые переходы в детонационных наноалмазах в условиях тепловых и радиационных нагрузок</i>	137
КАШКАРОВ А. О., ТЕН К. А., ПРУУЭЛ Э. Р., ГЕРАСИМОВ Е. Ю., КРЕМЕНКО С. И., ПЫРЯЕВ П. А., МОРОЗ Б. Л. <i>Синтез нанесенных каталитических систем детонационным способом</i>	138
ИСАКОВА В. Г., ИСАКОВ В. П., ЛЯМКИН А. И. <i>Аллотропные преобразования в продуктах детонационного синтеза в присутствии катализаторов</i>	139

1 Кумулятивные явления, в том числе магнитная кумуляция

ОСОБЕННОСТИ РАСТЯЖЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ

В. М. Фомин, В. И. Звезгинцев, Е. Я. Брагунцов

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

В данной работе проведен анализ процесса растяжения и разрушения кумулятивных струй и объясняются некоторые особенности деформационного поведения металла в условиях кумулятивной струи на основе физического подхода, основанного на использовании дислокационных механизмов пластической деформации. Этот подход позволяет получить не только объяснения, но и количественные данные о высокотемпературной высокоскоростной пластической деформации металла, которым является процесс растяжения кумулятивной струи.

Установлены закономерности, адекватно отражающие процесс растяжения и разрушения кумулятивной струи с использованием функциональных зависимостей, связывающих переменные, характеризующие пластические свойства материала.

Полученные уравнения позволяют анализировать влияние прочностных и пластических свойств материала, его микроструктуры, а также геометрических параметров и кинематических характеристик на растяжение и разрушение струи.

Список литературы

1. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. - Изд. 3-е, переработанное. - В 2 т. Т. 2.- М.: Физматлит, 2002, -656 с. - ISBN 5-9221-0220-6.
2. *О. В. Свирский, М. А. Власова, Б. А. Клопов 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. -613 С.
3. *Эпитейн Г. Н.* Строение металлов, деформированных взрывом. - М.: Металлургия, -280 с. -1988.
4. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов / Под ред. В.С. Ивановой.- М.: Наука, 1965, -180 С.
5. *Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е* Кинетическая природа прочности твердых тел. // УФН. 1972. Т. 106. Вып. 2. С. 193-227.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СЕГМЕНТНЫХ ОБЛИЦОВОК СНАРЯДОФОРМИРУЮЩИХ ЗАРЯДОВ

П. В. Круглов, В. И. Колпаков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Разновидностью кумулятивных зарядов являются снарядоформирующие заряды (СФЗ), формирующие высокоскоростные удлиненные элементы [1]. Такие элементы образуются путем деформирования сегментной облицовки, выполненной, как правило, из пластичной стали, меди или других металлов, в результате взрыва СФЗ. Форма элемента должна обеспечить минимальные потери скорости и ориентированное, устойчивое движение по траектории. Это требование наиболее просто удовлетворяется за счет расширения хвостовой части формируемого элемента, называемого юбкой. В настоящей работе представлены результаты сравнения численных расчетов взрывного формирования устойчивых высокоскоростных элементов в двумерной и трехмерной постановках. При этом в качестве кумулятивных облицовок использовались стальные сфероконические облицовки, толщина которых вдоль радиального направления от центра к периферии уменьшалась (дегрессивная форма), увеличивалась (прогрессивная форма) и оставалась постоянной [2]. Кроме того, использовались различные модели, описывающие упругопластическое течение материала облицовки, в широком диапазоне варьировались их физико-механические свойства.

В результате масштабного численного эксперимента показано, что в трехмерной постановке формирование складок у элементов происходит вследствие потери устойчивости формы облицовки. Кроме того, для сфероконических облицовок установлено, что в хвостовой части элемента формируется развитая юбка со складками – стабилизаторами. Выявлены закономерности формирования элемента в зависимости от геометрических параметров облицовки и физико-механических свойств ее материала. Отмечено также, что расчеты в трехмерной постановке являются более реалистичными по сравнению с двумерными расчетами и позволяют получить конечную форму элемента близкую к форме, получаемой в натурных экспериментах.

Список литературы

1. *А. В. Бабкин, В. А. Велданов, Е. Ф. Грязнов и др.* Боеприпасы: учебник: в 2 т. /под общей ред. В. В. Селиванова – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. Т. 1 – 506 с.
2. *Круглов П. В., Колпаков В. И.* Закономерности взрывного формирования удлиненных высокоскоростных элементов из стальных сегментных облицовок. Инженерный журнал: наука и инновации, 2017, вып.12. С. 1-19 URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-12-1714>.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ ЗАРЯДАМИ С КОНИЧЕСКИМИ И ПОЛУСФЕРИЧЕСКИМИ ОБЛИЦОВКАМИ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

С. В. Ладов, Я. М. Никольская, С. В. Федоров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

В кумулятивных зарядах, формирующих при взрыве высокоскоростные металлические струи, применяются облицовки, главным образом, конической или полусферической формы. Скорость головной части струй при обжати взрывом конических кумулятивных облицовок лежит на уровне 10 км/с, а глубина их проникания в высокопрочные стальные преграды достигает 10 диаметров заряда. Данные результаты обеспечиваются при использовании медных конических облицовок прогрессивной (увеличивающейся от вершины к основанию) толщины.

Пробивное действие кумулятивных зарядов с полусферическими медными облицовками постоянной толщины (а на практике применяются полусферические облицовки, главным образом, постоянной толщины) при одном и том же диаметре заряда примерно вдвое меньше, чем при использовании медных конических облицовок. Различие пробивной способности кумулятивных струй, формируемых коническими и полусферическими облицовками, связано с различием их кинематических параметров, обусловленным реализацией различных механизмов формирования [1]. Скорость головной части струй для полусферических облицовок постоянной толщины существенно ниже, чем для конических, и не превышает 5,5–6 км/с.

Целью настоящей работы являлось выяснение возможности усиления кумулятивного эффекта при использовании кумулятивных зарядов с полусферическими облицовками. Исследования проводились на основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред. По результатам расчетов было установлено, что переход от постоянной толщины полусферических кумулятивных облицовок к дегрессивной (уменьшающейся от вершины к основанию) позволяет за счет создания условий для реализации принципа имплозии (сферически симметричного схождения материала облицовки к центру) повысить скорость головной части формируемых кумулятивных струй до уровня 10 км/с, обеспечиваемого кумулятивными зарядами с коническими облицовками [2]. Проведен анализ массово-скоростных распределений для кумулятивных струй, формирующихся из различных облицовок. Показано, что в качестве дополнительного средства управления массово-скоростными характеристиками кумулятивных струй может выступать использование облицовок дегрессивной толщины в форме полуэллипсоида или усеченной сферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания по разделу «Инициативные научные проекты» (код проекта 9.5330.2017 БЧ).

Список литературы

1. *Титов В. М.* Возможные режимы гидродинамической кумуляции при схлопывании облицовки // Доклады АН СССР. 1979. Т. 247. № 5. С. 1082–1084.
2. *Федоров С.В.* Численное моделирование формирования кумулятивных струй полусферическими облицовками дегрессивной толщины // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52. № 5. С. 116–130.

К ВОПРОСУ О МЕТАЛЛОФИЗИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ ВЗРЫВОМ ТЕКСТУРОВАННЫХ КУМУЛЯТИВНЫХ ОБЛИЦОВОК ПЕРФОРАТОРОВ И РАЗЛИЧНЫХ БОЕПРИПАСОВ

В. Г. Смеликов, Н. В. Серeda, Т. В. Лопатникова¹, А. А. Плотников²

¹АО «НПО «Базальт», Москва

²АО НПЦ Газотурбостроения «Салют», Москва

Обоснована необходимость повышения металлофизической культуры, которая учитывает особенности физики отрицательных давлений [1, 2] при разработке и производстве кумулятивных облицовок для перфораторов, торпед и другой прострелочной аппаратуры, а также для боеприпасов [3]. Подчеркнут приоритет отечественных разработок дислокационного механизма компенсации потерь бронепробиваемости от вращения изделий на траектории полёта [4]. Из работ нового столетия по этому вопросу следует выделить публикацию О.В.Свирского с сотрудниками для калибра 125 мм [5]. Явление компенсации потерь бронепробиваемости кумулятивных зарядов (КЗ) при их вращении является прямым свидетельством твердотельности материала в кумулятивных струях (КС). Это позволяет отнести структуру кумулятивной струи по степени ионизации не к четвертому состоянию вещества, т.е. к плазме, а к «трех-с-половинному» - еще твердотельному, но уже предплавленному состоянию. Подчеркнута разная способность состояний вещества выполнять транспортную функцию переноса массы в струе и песте (вихрь-антивихрь), что проявляется в виде разности скоростей и агрегатных состояний. Твердотельность сопровождается генерацией упруго-пластических волн в КС и преградах и проявляется в виде «молоткового и кондукторного» эффектов по всей длине струи и пробитых отверстий в монолитных и разнесённых преградах, что показано на рисунках в [4, 6].

КС и пест скоротечно, за наносекундные времена, «обрастают» соответствующими градиентами осевых, радиальных и окружных скоростей, лапласианами и другими операторами в поле частных производных P , V и T , в том числе, первой и второй производной давления по объёму dP/dV , d^2P/d^2V , от которых зависит реакция кристаллической решётки на сильные волнообразные изменения объёма твердого тела и коэффициента Грюнайзена решеточной составляющей $\Gamma_\nu = -\frac{2}{3} - 0.5V(\frac{P}{P})$, где \dot{P} и P - первая и вторая производные давления по объёму.

Законы сохранения действуют непрерывно и запрещают в любой момент времени «атомизировать» металл в классическом понимании, т. е. превращать его в пар в условиях сильного сжатия из твердой фазы с выделением энергии при превышении теплоты атомизации. Это противозаконно, потому что она (энергия) поглощается, а не выделяется этим процессом с учетом энтальпии сублимации, т.е. энергосодержания этого процесса, а не энерговыделения. Для меди эта величина - не менее 4,75 кДж/г (~ 42 кДж/см³) на фоне энтальпии плавления $\sim 0,2$ кДж/г. Для броневой стали удельная энергия атомизации составляет ~ 9 кДж/г (~ 70 кДж/см³), при которой обеспечивается разрушение или пробитие преград. Однако это не значит, что при превышении подводимой энергии более 4,75 кДж/г медный образец может испариться. Очередность и условия достижения процессов диссоциации, атомизации и ионизации давлением (баротермическим действием) материалов облицовок показаны в [6].

Необходимость учета металлофизической культуры по Френкелю при разработке и производстве КЗ, состоящих по большому счету, из трех деталей, не вызывает сомнений и вопросов [2-6] также как и актуальность соблюдения научной честности, тонко и точно подчеркнутая

академиком РАН В.М. Титовым в [7]. Повышение этой культуры поможет научному сообществу, занятому кумулятивным делом, выйти из стадии предположений, догадок, гипотез, домыслов и откровенных вымыслов в терминах академика РАН Круглякова Э.П. [8].

Список литературы

1. *Френкель Я. И.* Введение в теорию металлов. Гос. изд-во технико-теоретич. литературы, Москва – 1950 – Ленинград.
2. *Бриджмен П.* Исследование больших пластических деформаций и разрыва. Изд. иностранной литературы. – М.: 1955, – 444 с.
3. *Балаганский И. А., Мерзиевский Л. А.* Действие средств поражения и боеприпасов. Издательство Новосибирского гос. технического университета, 2011. - 407 с.
4. *Смеликов В. Г., Кузьмин С. М., Зайцев В. П.* Влияние режимов формоизменения кумулятивной облицовки и ее структуры на кумулятивный эффект. // ВСМ, сер.1, 1987, вып. 1 (164).
5. *Свирский О. В., Биткин В. Ф., Бычкова Н. В. и др.* Влияние скорости углового вращения заряда и технологии изготовления облицовок на пробивную способность и параметры кумулятивных струй. Сб. докладов VIII конф. – Саров.: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2014.– Т.1, – 382 с.: ил. с. 359-363.
6. *Смеликов В. Г.* Устойчивость ограниченной кумуляции.– М.: Студия «Этника», 2016, – 125 с: ил.
7. *Титов В. М. Лаврентьев М. А. и его школа* // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, №6, с. 3-13.
8. *Кругляков Э. П.* «Ученые с большой дороги». - М.: Наука, - 2002. - 320 с.

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ КОНИЧЕСКОЙ ОБЛИЦОВКИ В ПРОЦЕССЕ ОБРАЗОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ, ИЗМЕРЕНИЕ ЕЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

В. В. Пай, В. М. Титов, Я. Л. Лукьянов, А. В. Пластинин

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

В работе проводилось исследование потери устойчивости конической облицовки в процессе образования кумулятивной струи и измерение ее температуры. Для установления характера течения металла облицовки при образовании кумулятивной струи были изготовлены трехслойные медь-медь- константановые конуса, состоящие из сплошного медного конуса с углом при вершине 45° , толщиной стенки 1.5 мм, и, вставленного в него конуса, свернутого из медного листа толщиной 1.0 мм, облицованного сваркой взрывом с внутренней стороны константаном толщиной 0.2 мм. Обжатие конуса осуществлялось зарядом гексогена толщиной 20 мм. Процесс образования струи регистрировался рентгеноимпульсным методом, а характер течения металла определялся по микро – и макрошлифам сохраненных пестов. Так как

граница сваренных взрывом металлов хорошо различима на шлифах, то, наблюдая за ее остаточной деформацией в разных сечениях песта, было установлено, что облицовка в процессе сжатия теряет устойчивость, проявляющуюся в виде складок, ориентированных вдоль образующей конуса. При этом общая картина течения, описанная в рамках теории идеальной несжимаемой жидкости, не нарушается, что следует из рентгенограмм процесса кумуляции.

Для определения термодинамического состояния кумулятивной струи часть биметаллических медь – константановых конических воронок была изготовлена с внутренней облицовкой константаном только в верхней трети воронок. При выборе надлежащей толщины константанового слоя носовая часть кумулятивной струи будет состоять только из константана, а хвостовая - из меди, образуя медь-константановую термопару. Путем измерения с помощью импульсного осциллографа разности потенциалов между хвостовой и головной частями струи определялась ее температура.

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ОРЕБРЕННЫХ ОБЛИЦОВОК

С. С. Рассоха, С. В. Ладов, А. В. Бабкин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Большинство кумулятивных облицовок (КО) представляют собой металлические оболочки конической формы с гладкой боковой поверхностью. Вместе с тем, существуют КО, боковая поверхность которых образована чередующимися выступами и впадинами – оребренные КО [1-2]. Основная особенность оребренных КО заключается в том, что образованная из них кумулятивная струя (КС) вращается. Причина этого заключается в особом распределении радиальной и окружной компонент скорости облицовки при ее движении к оси симметрии под действием давления на внешней поверхности.

В представленной методике принимается, что КС образуется из струеобразующего слоя – области КО, материал которой первым достигает оси симметрии при ее схлопывании. Форма струеобразующего слоя определяется радиальной компонентой скорости КО, а угловая скорость КС – окружной составляющей. Для КО с гладкой боковой поверхностью струеобразующий слой представляет кольцевую область постоянной толщины с нулевой окружной скоростью, для оребренной КО – серию повторяющихся в окружном направлении пиков, «наложенных» на области с противоположными по знаку окружными скоростями [2]. То, каким образом струеобразующий слой «накладывается» на распределение окружной скорости, и определяет итоговую угловую скорость КС.

Предлагаемая инженерная методика основывается на результатах численных расчетов [2], с использованием которых построена зависимость, определяющая массу струеобразующего слоя в окружном направлении рассматриваемого сечения. Таким образом, учитывается неравномерность распределения радиальной скорости КО.

Распределение окружной составляющей скорости КО вычисляется по зависимости, вытекающей из формулы Гарни, скорректированной с учетом изменения угла наклона внешней поверхности оребренной КО к окружному направлению, а также учитывающей уменьшение окружной скорости при увеличении количества ребер.

Построенная методика позволяет описать парадоксальный, на первый взгляд, эффект изменения знака угловой скорости КС при увеличении числа ребер. Этот эффект объясняется действием двух факторов. Первый фактор заключается в том, что с ростом количества ребер сглаживается неравномерность распределения массы струеобразующего слоя, оно стремится к случаю гладкой КО. При этом увеличивается влияние положительной составляющей

окружной компоненты скорости и уменьшается влияние отрицательной. Вследствие этого изменяется направление вращения струи. Вторым фактором представляет собой уменьшение абсолютного значения окружной скорости КО при увеличении числа ребер из-за сокращения расстояния между их соседними боковыми поверхностями. Это приводит к взаимной компенсации областей с противоположным значением окружной скорости, из-за чего угловая скорость КС стремится к нулю.

Таким образом, представленная методика позволяет объяснить эффект изменения знака угловой скорости при увеличении числа ребер КО, а полученные количественные оценки удовлетворительно согласуются с известными экспериментальными данными [1].

Список литературы

1. *Simon J., DiPersio R., Eichelberger R.J.* Shaped Charge Performance with Linear Fluted Liners. BRL Report № 1231. Maryland: Aberdeen Proving Ground, 1954. 38 p.
2. *Rassokha S.S., Ladov S.V., Babkin A.V.* Numerical analysis of corrugated shells rotation. Journal of Physics: Conf. Series. 2017. 894(1). 012140.

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВС НА ОСНОВЕ CL-20 (ГАВ) В КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДАХ

О. В. Свирский, М. А. Власова, Ю. В. Шейков

Российский Федеральный Ядерный Центр «ВНИИ Экспериментальной Физики», Саров

Наиболее перспективными объектами практического применения новых мощных бризантных составов на основе индивидуального ВВ CL-20 (ГАВ) являются кумулятивные заряды [1]. Однако, известные к настоящему времени по доступным источникам данные имеют достаточно широкий разброс результатов. Достигнутое повышение пробивной способности зарядов составляет по разным данным от 2 до 40%.

Целью работы является получение объективной оценки возможного повышения пробивной способности применительно к кумулятивным зарядам оптимальной конструкции и прецизионного изготовления. Рассмотрена возможность улучшения определяющих параметров кумулятивной струи: предельной когерентной скорости вершины, времени разрыва, эффективной скорости при завершении проникания.

Сравнительные расчёты пробивной способности оптимизированных зарядов с наполнением ВВ на основе октогена (HMX) и CL-20 проведены с использованием авторской методики ATOS-M [2]. Полученная итоговая оценка возможного повышения пробивной способности согласуется с выводами других наиболее компетентных авторов.

Список литературы

1. *Michael J. Murphy, Dennis W. Baum, Randall L. Simpson, Joe Monolo, Lou Montesi, Kirk Newman, Dieter Tuerpe, John Osborn.* Demonstration of Enhanced Warhead Performance with More Powerful Explosives. Proceedings of the 17th International Symposium on Ballistics, Midrand, South Africa, 23-27 Mar. 1998.

2. O.V. Svirsky, M.A. Vlasova, M.I. Korotkov, V.A. Krutyakov, T.A. Toropova The analytical model ATOS-M for computing of shaped charge jets penetration parameters . International Journal of Impact Engineering. 2003. V.29, № 1-10. P. 683-690.

ВЗРЫВОМАГНИТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЕЙ ЭНЕРГИИ

В. Д. Селемир, П. Б. Репин, В. А. Демидов, А. С. Борискин, А. И. Быков, Г. В. Борисков, О. М. Таценко, А. С. Коршунов

Российский Федеральный Ядерный Центр «ВНИИ Экспериментальной Физики», Саров

В развитие идей А.Д.Сахарова [1, 2] в РФЯЦ-ВНИИЭФ реализованы взрывомагнитные генераторы, активно используемые при проведении экспериментов в области физики высоких плотностей энергии.

Взрывной генератор сверхсильных магнитных полей МК-1 воспроизводимым образом обеспечивает в практически значимых объемах ~ 10 см³ магнитное поле с индукцией до 10 МГс [3]. Плотность энергии достигает нескольких сот килоджоулей в кубическом сантиметре, что приводит к существенному изменению магнитной и электронной подсистем твердых тел. Это позволяет проводить систематические исследования новых фазовых состояний в конденсированных средах, эффективной массы и концентрации носителей заряда в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах, констант взаимодействия в веществах с магнитным упорядочением, критических магнитных полей и критических токов в сверхпроводниках и т.д. Устройство изоэнтропического сжатия веществ сверхсильным магнитным полем генератора МК-1 обеспечивает построение в мегабарной области давлений «холодных» диаграмм давление-плотность как для легких (водород, дейтерий, гидрид лития), так и для тяжелых (сплавы вольфрама) веществ.

Современные спиральные и дисковые взрывомагнитные генераторы обладают рекордными параметрами по удельной энергии, усилению энергии и характерному времени нарастания тока. Построенные на их основе системы импульсной мощности с использованием размыкателей тока обеспечивают в нагрузках с практически значимой индуктивностью (10...20 нГн) энергию в десятки мегаджоулей [4]. Амплитуда импульсов тока достигает 100 МА при времени нарастания несколько микросекунд и до 20 МА при времени нарастания 1 мкс и менее. Взрывные системы импульсной мощности разрабатываются и используются для генерации мощных потоков мягкого рентгеновского излучения [5], ускорения плоских ударников до скоростей ~ 10 км/с, изоэнтропического сжатия веществ до давлений в десятки мегабар и генерации высоковольтных импульсов для питания СВЧ генераторов и исследования крупных промышленных объектов на стойкость к удару молнии.

Список литературы

1. Сахаров А. Д. и др. ДАН СССР. 1965. Т.165. С.65.
2. Сахаров А. Д. УФН. 1966. Т.88. №4. С.725.
3. Долощенко М.И. Магнитокумулятивные генераторы МК-1 сверхсильных магнитных полей: монография. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015.

4. Демидов В. А. и др. Дисковый взрывомагнитный генератор с взрывным размыкателем тока. ПМТФ. 2015, №1, С. 24-30
5. Selemir V. D. et al. IEEE Trans. on Plasma Sci. 2010. V.38(8). P.1754.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА РАБОТУ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ

Г. А. Швецов¹, А. Д. Матросов¹, С. В. Станкевич¹, С. В. Федоров², А. В. Бабкин²,
С. В. Ладов²

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

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Представлены результаты экспериментальных и численных исследований поведения металлических кумулятивных струй (КС) в присутствии различных магнитных полей. Анализируется влияние аксиального магнитного поля на процессы струеобразования и проникание КС в преграды. Рассматривается возможность уменьшения и увеличения глубины проникания КС в преграды. Введены понятия критической плотности тока и идеальной формы токового импульса, при которых в струе развивается перетяжечная магнитогидродинамическая неустойчивость, сопровождающаяся объемным взрывом элементов КС при их выходе из межэлектродного промежутка. Развитие в КС перетяжечной магнитогидродинамической неустойчивости и последующий объемный взрыв материала струи приводят к уменьшению ее длины и плотности и, как следствие, к уменьшению глубины проникания в преграду. Показано, что этим процессом можно управлять, изменяя параметры электрического импульса. Анализируется возможность увеличения глубины проникания КС в преграды в условиях, когда протекающий по КС электрический ток меньше критического значения. Рассматривается процесс нагрева КС из различных материалов (Cu, Fe, Mo, Ta, W и др.) при протекании по ним электрического тока.

Показано, что, управляя параметрами электрического импульса, величиной и распределением магнитного поля в облицовке КС можно уменьшать или увеличивать глубину проникания кумулятивных струй в преграды.

ОСОБЕННОСТИ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА ПРИ ДВУМЕРНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИФФУЗИИ СИЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ КРАЯ ПРОВОДНИКА

Г. А. Шнеерсон, С. И. Кривошеев, Ю. Э. Адамьян, Д. И. Алексеев, С. Г. Магазинов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург

Вблизи кромок проводников прямоугольного сечения и в местах соединения токоведущих шин с одновитковыми соленоидами имеет место двухмерная диффузия импульсного магнитного поля. Линейный режим такой диффузии в определенной мере описан в литературе [1]. В настоящей работе рассмотрена нелинейная диффузия сильного магнитного поля в проводник, границы которого образуют прямоугольный двугранный угол. В поперечном поле с

индукцией, перпендикулярной ребру угла, максимум плотности тока имеет место не вблизи ребра, как при линейной диффузии, а в глубине проводника. В продольном поле с индукцией, параллельной ребру, плотность тока в вершине угла при диффузии сильного поля равна нулю, как и в слабом поле, но местоположение максимумов плотности тока, а также температуры и силы Лоренца при нарастании поля смещаются в толщу проводника. Эти эффекты приводят к особенностям деформации и разрушения проводников в сильном магнитном поле.

Численные расчеты выполнены в среде Comsol Multiphysics 5.3a на суперкомпьютере "Политехнический" - РСК Торнадо. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 8-19-00230.

Список литературы

1. *Shneerson G. A., Dolotenko M. I., Krivosheev S. I.* Strong and superstrong pulsed magnetic fields Generation, De Gruyter studies in mathematical physics, 2014. 429 p.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЭФФЕКТА КУМУЛЯЦИИ В МАЛОГАБАРИТНЫХ БОЕПРИПАСАХ ОРУЖИЯ БЛИЖНЕГО БОЯ

А. А. Картунов, В. П. Швидлер, В. В. Васильев

АО «Институт прикладной физики», Новосибирск

В работе показана практическая реализация эффекта кумуляции для обеспечения броневой защиты малогабаритных боеприпасов средств ближнего боя, в частности, кумулятивных выстрелов для подствольных и ручных гранатометов. Освещены предпосылки и история создания выстрелов.

Статическими и натурными испытаниями подтверждена возможность создания отечественного кумулятивного выстрела в габаритах штатных выстрелов для подствольных и ручных гранатометов, превосходящие по основному действию (бронепробитию) лучшие мировые образцы в 1.5-2 раза.

Представленные в докладе фотоматериалы демонстрируют результаты натурных испытаний кумулятивных выстрелов по броне и бетону.

Список литературы

1. Техническая справка по разработке броневой защиты выстрела с кумулятивно-осколочной гранатой. Новосибирск. 2010 г.
2. Отчет о результатах демонстрационных стрельб выстрела ВКО-25 для гранатометов типа ГП-25. Новосибирск. 2017 г.

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ Порошковых материалов в облицовках кумулятивных зарядов

В. В. Романов, Р. В. Демин, Е. Я. Брагунцов

АО «Институт прикладной физики», Новосибирск

В работе проведен анализ перспективности использования высокоплотных и высококомодульных порошковых материалов для изготовления конических и цилиндрических облицовок различного назначения. Показано, что использование порошковых материалов для изготовления облицовок открывает возможности для решения следующих задач:

- получения эффекта рассышающегося песта (изготовление «безпестовых» материалов);
- достижения эффекта цилиндрической кумуляции с использованием промышленно выпускаемых взрывчатых материалов;
- увеличения пробивного действия кумулятивных зарядов за счет использования облицовок из высокоплотных материалов.

Массовое применение порошковых материалов в облицовках диктует необходимость комплексного решения следующих проблем:

1. разработка технологических процессов изготовления облицовок методами порошковой металлургии, обеспечивающих однородную пористость и осевую симметрию свойств;
2. разработка методов контроля пористости и однородности свойств в порошковых облицовках;
3. разработка методов повышения пластичности высоко плотных и высококомодульных порошковых материалов в условиях кумулятивной струи;
4. оптимизация конструкции кумулятивных зарядов и облицовок, позволяющая реализовать потенциальные возможности порошковых материалов.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБЛИЦОВОК КОРОТКОФОКУСНЫХ МАЛОГАБАРИТНЫХ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ

В. В. Романов, Р. В. Демин, Е. Я. Брагунцов

АО «Институт прикладной физики», Новосибирск

Для кумулятивных зарядов малого калибра повышению пробивного действия является трудно разрешаемой задачей, поскольку методы, связанные с применением новых конструктивных схем, например, тандемных для малых зарядов, неприемлемы из-за особенностей их функционирования. Поэтому, наряду с оптимизацией конструкции узлов и компоновки

заряда, основными путями совершенствования малогабаритного кумулятивного заряда являются подбор материалов для изготовления кумулятивных облицовок и формирование в них в процессе изготовления оптимального структурного и текстурного состояния [1-4], обеспечивающих эффективное функционирование боеприпасов и сокращение стоимости производства. В современном производстве кумулятивных облицовок используется медь высокой технической чистоты марки М1 ТУ-48-21-664-79. В качестве альтернативного материала на особый период разработчиками изделий традиционно используется сталь марки сталь 20 ГОСТ 4549-71. Однако существующий уровень эффективности кумулятивных зарядов с облицовками из стали марки сталь 20 ГОСТ 4549-71 остался на уровне 50-х годов, достигнутый уровень бронепробивного действия не превышает 4,5 калибров. Такой разрыв в эффективности привел к непригодности стали 20 и других ее аналогов в качестве альтернативного материала для облицовок. Поэтому в настоящее время некоторые изделия не имеют в составе конструкторской документации облицовки, изготавливаемой из альтернативного материала. Особенно остро эта проблема стоит для кумулятивных изделий массового производства к которым принадлежит широкая номенклатура кумулятивных изделий с короткофокусными малогабаритными зарядами.

В данной работе излагаются результаты проверки работоспособности материалов разработанных на основе чистого железа в облицовках короткофокусных малогабаритных кумулятивных зарядов.

Совершенствование материала на основе чистого железа проведено за счет улучшения комплекса физико-механических характеристик, а именно, химического состава (рафинирование, микролегирование), формирования рациональной структуры и текстуры [1, 2, 4], а также за счет проведение оптимизации геометрических параметров облицовок, учитывающих особенности физико-механических свойств железа и условий работы изделия [5], что позволило поднять уровень пробивного действия до величин не ниже 6 калибров.

Проведена проверка работоспособности и экспериментально выявлена эффективность использования облицовок из этих материалов в составе изделий. Показано, что кумулятивные изделия с облицовками из нового конструкционного материала выполняют технические требования по пробивному действию с достаточным конструктивным запасом.

Достигнутый уровень пробивного действия позволяет использовать материалы на основе чистого железа не только в качестве альтернативного меди материала, но и в качестве основного материала для тех изделий, где необходим учет большей дефицитности и стоимости меди.

В докладе приводятся наиболее важные аспекты производства облицовок из нового конструкционного материала на основе чистого железа:

1. отработка технологического процесса производства чистого материала в заводских условиях;
2. отработка технологии изготовления облицовок;
3. снижение стоимости материала.

Технологические процессы производства материала и облицовок обеспечивают формирование требуемого химического состава, структурного и текстурного состояния, а также стабильность этих характеристик во времени.

Разработанный метод «квази» очистки материала с помощью микролегирования более активными металлами применим также и для очистки меди от вредных газовых примесей азота и кислорода [6-8], существенно снижающих пробивное действие кумулятивных зарядов с медными облицовками.

Список литературы

1. Влияние структуры металла на динамическую пластичность в условиях кумулятивной струи. / Е.Я. Брагунцов, А.В. Сотенко, Р.В. Демин, Е.С. Демьяненко. - IV Школа-семинар «Физика взрыва и применение взрыва в физическом эксперименте». Тезисы докладов.- Новосибирск: Изд-во Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева, 2003. - С. 38.
2. Влияние фазового состава и степени чистоты металла облицовки на пробивное действие кумулятивных зарядов / В.Г. Баранов, Е.Я. Брагунцов, А.В. Сотенко // Гидродинамика высоких плотностей энергии: Труды междунар. семинара. - Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2004.- С. 520-527.
3. Управление ротационной составляющей течения материала облицовки кумулятивного заряда, изготовленной методом раскатки В.А. Авенян, В.В. Глебов, А.А. Курепин, В.А. Семин // Гидродинамика высоких плотностей энергии: Труды междунар. семинара. - Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2004. -С. 513-519.
4. *Брагунцов Е.Я.* Определение наиболее рациональной текстуры облицовок Гидродинамика высоких плотностей энергии: Труды междунар. семинара. - Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2004. -С. 537-545.
5. Проблемы разработки кумулятивных выстрелов к подствольным гранатометам / А.В. Сотенко, В.П. Швидлер, Е.Я. Брагунцов // Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике. Тезисы док-ладов международной конференции, посвященной 105-летию со дня рождения академика М. А. Лаврентьева. - Новосибирск, 27-31 мая 2005.- С. 229-230.
6. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали / Я.Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин // М.: Металлургия, 1986. 272 с.
7. Рекристаллизация металлических материалов / Под ред. Ф. Хесснера // М.: Металлургия, 1982. 352 С.
8. Штейнберг А.С. Репортаж из мира сплавов /М.: Наука, 1989.- 256 С.

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ПРОБИТИЯ БЕТОННЫХ ПРЕГРАД КУМУЛЯТИВНЫМИ ЗАРЯДАМИ С ОБЛИЦОВКАМИ ИЗ ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩЕГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА

Н. В. Шикунов

*АО «Красноармейский научно-исследовательский институт механизации»,
Красноармейск*

Представлены экспериментальные результаты регистраций процессов формирования и растяжения кумулятивной струи (КС) из порошкового композитного материала на основе вольфрама и меди с использованием импульсных рентгеновских аппаратов. Регистрации проводились в вакуумированных стальных взрывных камерах с использованием рентгеновской пленки, размещенной внутри защитных контейнеров в ближней зоне взрыва и по ходу движения КС. С помощью 2–3-х кадровой рентгеновской съемки исследовался процесс взрыва

малогабаритных кумулятивных перфорационных зарядов в течение первых 1000 мкс от момента иницирования. Осуществлялась рентгеноимпульсная съемка КС в свободном полете и при проникании в бетонную мишень с пространственным разрешением около 0.2 мм.

Изучение рентгенограмм показало, что КС состоит из композитных конгломератов с размерами от 0.2 до 2 мм, которые движутся как несвязный поток не разрушающихся в полете частиц с малыми радиальными скоростями (от 2 до 10 м/с). При движении в воздухе наблюдается аэродинамическое разделение потока частиц на фракции.

Регистрации движения КС в бетоне позволили измерить скорость проникания композитной КС в бетон и оценить плотность материала и размеры струи в момент внедрения в преграду. Приводятся экспериментальные оценки критических скоростей проникания КС из композитного материала в бетон и мягкую сталь. Предварительно обнаружен эффект самофокусировки материала КС при движении внутри пробитой каверны с рикошетированием, что значительно увеличивает глубину пробития за счет повышения плотности КС и ее прямолинейности. При этом радиальные скорости в КС снижаются до 1–2 м/с.

По результатам исследования рекомендован экспресс-метод оценки качества кумулятивных зарядов глубокого пробития для перфораторов нефтегазовых скважин:

- в качестве критерия оценки качества материала КС предложено выбрать время проникания КС на глубину 300–400 мм в бетонную мишень (КС не касается стенок каверны и время проникания определяется качеством материалом облицовки);
- в качестве критерия оценки качества кумулятивного заряда в целом предложено выбрать время проникания КС на глубину 600–700 мм в мишень.

Более качественный кумулятивный заряд пробивает мишень за меньшее время.

2 Ударно-волновые явления, высокоскоростной удар и динамические многофазные течения

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДОЙ ЧАСТИЦЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ

А. В. Болеста^{1,2}, В. М. Фомин^{1,2}

¹*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

Задача высокоскоростного взаимодействия сферических частиц с преградой с точки зрения механики сплошной среды обладает определенными параметрами подобия, такими как отношение глубины внедрения к диаметру частицы, отношение плотностей ударника и преграды, отношение удельной кинетической энергии к динамической твердости преграды. Такое рассмотрение подразумевает наличие у материала преграды заданного свойства - динамической твердости, которое непосредственно не измеряется в эксперименте. Тем не менее, по данным экспериментов (см., например, [1]) величина динамической твердости может быть выбрана вполне определенной, не зависящей от диаметра частицы и скорости ударника (по крайней мере в дозвуковом диапазоне). При этом следует отметить, этот результат относится все же к ударникам макроскопического размера, диаметр которых составляет по крайней мере несколько миллиметров. В следствие этого представляет интерес рассмотрение данной задачи в случае уменьшения диаметра ударника до размеров характерных структурных элементов материала преграды, например размер зерна в поликристалле, а далее и до размера нескольких нанометров, где уже может проявиться следующий пространственный масштаб порядка межатомного расстояния.

В настоящей работе проводится молекулярно-динамическое исследование взаимодействия с преградой твердых сфер, радиус которых составляет несколько нанометров. В качестве преграды выбирается поликристаллическая медь, средний размер зерна в которой может быть как меньше, так и больше диаметра ударника. По аналогии с макроскопическим экспериментом строятся зависимости глубины проникновения от скорости ударника в безразмерном виде. Показано, что в данном случае также возможно введение понятия динамической твердости материала преграды в том смысле, что достаточно одного параметра размерности давления для описания данных кривых. Однако в данном случае эта величина возрастает с уменьшением размера ударника.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-43-540767).

Список литературы

1. *Златин Н. А., Красильщиков А. П., Мишин Г. И., Попов Н. Н.* Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. — М.: Наука, 1974. — 344 с.

ФОКУСИРОВКА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ РАЗРЕЖЕНИЯ В СЛОЕ ДВУХФАЗНОЙ ЖИДКОСТИ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Е. С. Большакова¹, В. К. Кедринский¹, В. А. Вишивков^{1,2}

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

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

Рассматривается цилиндрическая симметрия численной модели формирования ударной волны (УВ) при импульсном нагружении слоя жидкости со свободной поверхностью. Иницирование УВ выполняется заданием импульса массовой скорости поршня в окрестности оси симметрии в форме экспоненты с диапазоном максимальных скоростей в интервале от 20 до 100 м/с. Постоянная экспоненты варьируется до 10 мкс. Радиус слоя жидкости изменялся от 1 до 9 см. Численный анализ формирования УВ выполнялся для двух состояний жидкости – чистой и дистиллированной воды с микропузырьками свободного газа. Согласно экспериментальным данным радиус микропузырьков имеет порядок в несколько микрон, а их плотность достигает 10^6 см^{-3} . Двухфазная математическая модель представлена в виде системы Иорданского – Когарко – ван Вингаардена для средних значений массовой скорости, плотности и давления, которая включала уравнение для концентрации свободного газа типа уравнения Рэлея. Численный расчет выполнялся в два этапа: 1 – расчет формирования, распространения, отражения УВ от свободной поверхности, формирование волны разрежения (ВР) и ее фокусировка в сторону оси симметрии в однофазной чистой жидкости, 2 – в процесс формирования ВР от свободной поверхности жидкого слоя в расчет включалась система ИКванВ, которая рассчитывала и формирование кавитационной пузырьковой зоны при фокусировке ВР в сторону оси симметрии, и динамику структуры ВР. Для чистой жидкости рассчитывались распределения максимальных амплитуд УВ вдоль радиуса от поршня и ВР от свободной поверхности до поршня. При этом полученные распределения максимальных амплитуд УВ и ВР оказались полностью симметричными относительно радиуса. Было показано, что от поршня до радиуса, равного примерно 3 см, амплитуда УВ в процессе распространения уменьшается пропорционально $r^{-0.45}$. В дальнейшем регистрируется асимптотика $r^{-0.72}$. После формирования ВР в окрестности свободной поверхности ее распространение к поршню носит кумулятивный характер. При этом за ее фронтом регистрируется интенсивный рост объемной концентрации газовой фазы вплоть до 500 её начальных значений (при скорости 100 м/с).

МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ АЛЮМИНИЯ

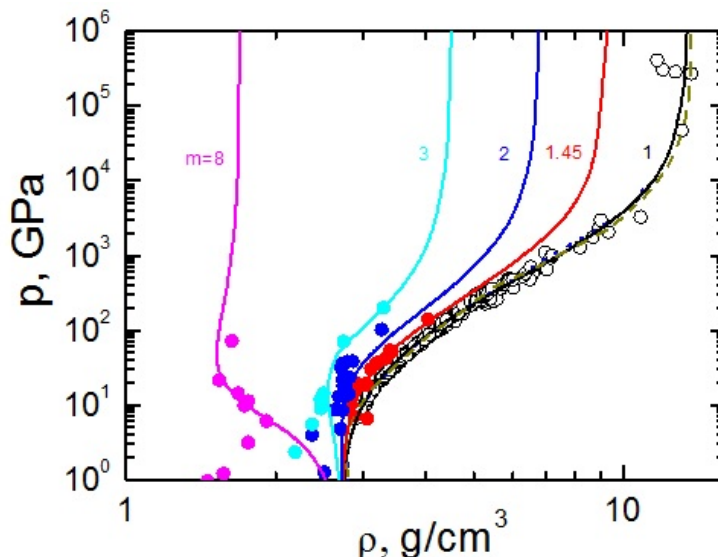
С. Д. Гилев

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

Построено малопараметрическое уравнение состояния алюминия, основанное на предложенной в [1] зависимости коэффициента Грюнайзена от удельного объема и температуры.

С использованием настоящей модели найдены параметры состояния алюминия в области высоких давлений и температур (кривая холодного сжатия, нормальная изотерма, семейство ударных адиабат образцов различной пористости, кривые разгрузки, скорость звука).

На рисунке показаны полученные зависимости ударного давления от плотности для образцов алюминия различной пористости m : модельные зависимости (сплошные кривые), экспериментальные данные [2] (точки), широкодиапазонная ударная адиабата сплошного вещества [3] (штриховая кривая). Пористость $m = \rho_0/\rho_{00}$, ρ_0 - плотность сплошного вещества при нормальных условиях, ρ_{00} - начальная плотность пористого вещества.



Найденные величины оказываются близки к имеющимся экспериментальным и модельным данным других авторов. Это указывает на адекватность настоящего подхода к построению уравнения состояния алюминия в области сжатия до 3–4 раз.

Список литературы

1. Гилев С. Д. Малопараметрическое уравнение состояния меди. ФГВ. 2018. Т. 54. № 4.
2. Электронный ресурс – база ударно-волновых данных <http://www.ihed.ras.ru/rusbank/>
3. Гордеев Д.Г., Гударенко Л.Ф., Жерноклетов М.В. и др. Полуэмпирическое уравнение состояния металлов. Уравнение состояния алюминия. ФГВ. 2008. № 2. С. 61-75.

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ПРЯМОГО ОПТИЧЕСКОГО ГЕТЕРОДИНИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЕЩЕСТВЕ

К. Л. Губский^{1,2}, М. А. Горбашова¹, А. А. Ястребцев^{1,2}, С. В. Норкин², А. П. Кузнецов¹

¹Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», Москва

²ООО «Лазер Ай», Москва

Измерение массовой скорости с использованием лазерной интерферометрии – один из наиболее информативных методов исследования процессов ударно-волнового воздействия на конденсированное вещество. Для измерений полимодального профиля скоростей, в частности при фрагментации или пылении образцов при ударно-волновом воздействии может быть использована методика прямого оптического гетеродинирования PDV (Photonic Doppler

Velocimetry) [1]. PDV-методика основана на использовании волоконных интерферометров для формирования гетеродинного сигнала при оптическом смешении отраженного от поверхности движущегося объекта лазерного излучения с опорным. Данная методика благодаря применяемым алгоритмам обработки сигналов позволяет проводить анализ распределения по скоростям осколков и капель, образующихся при разрушении объекта. При обработке экспериментальных данных используется оконное быстрое преобразование Фурье, формирующее зависимость спектральной плотности мощности сигнала от времени.

На основе методики прямого оптического гетеродинирования была разработана четырехканальная диагностическая система [2]. При создании системы для повышения эффективности использования регистрирующей аппаратуры использовалось временное уплотнение каналов. С использованием данной системы была проведена серия измерений скорости движения поверхности в экспериментах с мишенями различных типов при их ударно-волновом нагружении.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 17-72-201064).

Список литературы

1. *Strand O.T. et al.* Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques. *Rev. Sci. Instrum.* 2006. V. 77. 083108.
2. *Gorbashova M. et al.* Application of direct optical heterodyning methods for studying the processes of chondrite targets destruction by laser radiation. *JPCS.* 2017. V. 941. 012002.

МОЖНО ЛИ ПУЗЫРЬКАМИ СОЗДАВАТЬ ЗАВЕСУ ОТ УДАРНЫХ ЗВУКОВЫХ ВОЛН?

Т. В. Кузнецова, А. М. Власова, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

Динамический процесс распространения волн давления в пузырьковых средах определяется физико-механическими и термодинамическими свойствами [1-2]. В ряде работ авторов [3-5] на основе концепции эффективных динамических свойств были получены зависимости для эффективной динамической плотности гетерогенных сред различных типов. При этом эффективная динамическая плотность и эффективная трансляционная вязкость зависят как от свойств материала компонентов так и от частоты вибрационных воздействий [6-8].

На основе анализа поступательных колебаний жидкости с деформируемыми пузырьками авторами [9-11] теоретически обоснованы резонансные зависимости эффективных динамических свойств пузырьковых сред. А также выделена дисперсия звука, связанная с резонансом объемных осцилляций пузырьков, доказано существование резонансной дисперсии, обусловленной резонансом сфероидальных колебаний пузырьков.

Результаты физических экспериментов удовлетворительно согласуются с теоретическими зависимостями как по параметрам скорости звука, так и по коэффициентам затухания. При этом в газожидкостной смеси, где несущая жидкость обладает высокой вязкостью, резонансные особенности полностью исчезли. При колебаниях сферических пузырьков на поверхности жидкости возникает нагрузка на оболочку пузырька, вызывающая деформацию. Пузырьки приобретают вид эллипсоида. Волна, вызывающая деформацию, теряет энергию и затухает.

Следовательно этот принцип деформации оболочки сферических пузырьков можно использовать для и поглощения колебаний частиц этой волны и создания завесы, которая защитит от источников шума.

Список литературы

1. Гранат Н.Л. Установившиеся колебания сосудов с двухфазной смесью // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. 1964. № 5. С. 3–25.
2. Федотовский В.С. Концепция эффективных динамических свойств гетерогенных систем при виброакустических воздействиях // Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР. Труды Межд. конференции. Обнинск, 1998. Т.1. С. 215–220.
3. Федотовский В.С., Верещагина Т.Н., Дербенев А.В., Прохоров Ю.П. Экспериментальные исследования резонансной дисперсии низкочастотного звука в газожидкостных средах // Тр. Регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. Калуга: Полиграф-Информ, 2005. С. 88–104.
4. Федотовский В.С., Прохоров Ю.П., Верещагина Т.Н. Динамическая плотность и скорость распространения волн давления в дисперсных средах // Теплоэнергетика. 2001. Т. 48, № 3. С. 70–74.
5. Федотовский В.С., Верещагина Т.Н., Дербенев А.В. Распространение низкочастотного звука в пузырьковых средах // Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах. Тез. межотр. конф. Обнинск. 2005. С. 189–191.
6. Fedotovskiy V.S., Vereshchagina T.N., Terenik L.V. Dynamics of bubble media under vibration // Two-phase flow modelling and experimentation. Proc. of 3rd Int. Symp. Pisa, 2004. P. № ven35.
7. Федотовский В.С., Верещагина Т.Н., Дербенев А.В., Прохоров Ю.П. Экспериментальные исследования резонансной дисперсии низкочастотного звука в газожидкостных средах // Тр. Регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. Калуга: Полиграф-Информ, 2005. С. 88–104.
8. Федотовский В.С., Прохоров Ю.П., Верещагина Т.Н. Динамическая плотность и скорость распространения волн давления в дисперсных средах // Теплоэнергетика. 2001. Т. 48, № 3. С. 70–74.
9. Федотовский В.С., Верещагина Т.Н., Дербенев А.В. Акустика газо-жидкостных сред // Тр. XV школы-семинара молодых ученых «Проблемы гидродинамики и тепломассобмена в энергетических установках». Калуга. 2005. Т.1. С. 285–288.
10. Fedotovskiy V.S., Vereshchagina T.N., Derbenev A.V. Experimental Research of Resonance Sound Dispersion in Bubbly Media // Fluxes and structures in fluids-2005. Selected papers / IPM RAS. Moscow. 2006.
11. Федотовский В.С., Верещагина Т.Н., Дербенев А.В. Распространение низкочастотного звука в пузырьковых средах // Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах. Тез. межотр. конф. Обнинск. 2005. С. 189–191.

О ВЗРЫВНОМ МЕТАНИИ ТРУБОК И ПЛАСТИН, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

В. Ю. Давыдов, А. С. Губин, М. Н. Терещенко, А. Д. Боднарюк

АО «НИМИ им. В.В. Бахирева», Москва

Методом рентгеноимпульсной съемки измерены скорости взрывного метания трубок и пластин, изготовленных из металлов с широким диапазоном физикомеханических свойств: меди М1, стали 45 в состоянии поставки, закаленной на максимальную прочность стали 45 (45ТО) и термообработанной стали 35ХЗНМ. Погрешность измерения скоростей составляет не более 2 %.

Трубки имели внутренний диаметр 20 мм, длину 40 мм и толщину стенки 2 мм. Пластины – диаметр 20 мм, толщину 2 мм. Кроме того, испытывали удлиненные трубки длиной 120 мм. Трубки наполняли прессованными зарядами из флегматизированного гексогена ГФ (плотность 1.66 г/см³), смесью ГФ с 10 % алюминиевого порошка марки АСД-1 (ГФА-10, плотность 1.72 г/см³).

Установлено, что для трубок из стали 45, наполненных ГФ и ГФА-10, не выявлено существенного влияния термообработки (увеличения предела прочности в 2,5 раза и снижения пластичности до нуля) на скорость метания. Изменения скоростей метания находятся в пределах погрешности измерений (от – 2 % до 2 %). Для трубок из более прочной и пластичной стали 35ХЗ НМ, наполненных ГФА-10, по сравнению с трубками из стали 45 обнаружено снижение скорости метания (до 4 %), сопровождаемое значительным уменьшением общего количества осколков и увеличением доли крупных осколков.

Максимальный прирост скорости метания за счет добавки дисперсного алюминия наблюдали при использовании стали 45 в состоянии поставки (до + 7 %). Для стали 45ТО и 35ХЗНМ эффект от добавки алюминия снижается более чем в 3 раза – до 2 %. Добавка алюминия практически не влияет на скорости пластин из сталей 45 и 45ТО. При метании пластин из стали 35ХЗНМ добавка алюминия привела к снижению скорости на 5 %.

При увеличении длины трубки из стали 45 в 3 раза (с 40 мм до 120 мм), скорость метания трубок, наполненных ГФ, возрастает на 4%, а для трубок, наполненных ГФА-10 на 3 %. Скорость метаемых пластин при этом возрастает на 11 %. Замена стали на медь приводит к снижению скорости метания на 3 – 4 %. При этом эффект от введения алюминия снижается до нуля.

Полученные результаты в целом соответствуют физической модели окисления алюминия в детонационных волнах [1], согласно которой определяющую роль в реализации энергии алюминизированных ВВ в метательное действие играют процессы, происходящие на границе продуктов детонации (ПД) с воздухом.

С целью дополнительной проверки этой модели были поставлены эксперименты, в которых заряд и метаемая стальная оболочка были разделены медной фольгой, затрудняющей контакт ПД с воздухом. Результат был получен тот же, что для медных трубок – добавка алюминия не влияет на скорость метания.

Полученные данные могут быть использованы для тестирования моделей детонации алюминизированных ВВ.

Список литературы

1. Давыдов В.Ю. Метательная способность взрывчатых веществ с вторичным выделением энергии в различных газодинамических условиях // Труды XVII Международной конференции Харитоновские тематические научные чтения. Сборник докладов. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2015. С.509-515.

О МЕТАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ РАЗРЫВНЫХ ЗАРЯДОВ, СОДЕРЖАЩИХ ДИСПЕРСНЫЙ АЛЮМИНИЙ В ТОНКОМ ПЕРИФЕРИЙНОМ СЛОЕ

В. Ю. Давыдов, А. С. Губин, М. Н. Терещенко, А. Д. Боднарюк

АО «НИМИ им. В.В. Бахирева», Москва

В работе [1] приведены результаты экспериментов, указывающих на догорание продуктов детонации (ПД) в воздухе, существенно влияющее на метательную способность алюминизированных взрывчатых веществ (АВВ). В тоже время в АВВ в приповерхностном слое, контактирующем с воздухом, находится меньшая часть добавки алюминия, а большая ее часть, находящаяся в удаленных от поверхности слоях заряда, может использоваться неэффективно. В этой связи представляют интерес коаксиальные комбинированные разрывные заряды (КРЗ), содержащие повышенное содержание алюминия в периферийном слое. Такие КРЗ с относительно толстым периферийным слоем ($0.15-0.25 r_0$, где r_0 – радиус КРЗ) приводят к снижению скорости метания по сравнению с однородным зарядом [2].

В настоящей работе методом рентгеноимпульсной съемки измеряли скорости взрывного метания трубок, изготовленных из стали 45 с внутренним диаметром 20.6 мм, толщиной 2 мм и длиной 80 мм. Трубки наполняли прессованными зарядами диаметром 20 мм из флегматизированного октогена (плотностью 1.76 г/см^3) и его смеси с 10 % алюминия марки АСД-1 (плотностью 1.82 г/см^3). Для исключения воздушного зазора заряды закрепляли на парафино-церезиновом сплаве. Также проводили испытания трубок с покрытием, содержащим порошок алюминия (марки АСД-1) и нанесенным на внутреннюю поверхность трубки. В качестве связующего вещества использовали поливинилбутиральный лак ПВБ-12. Масса покрытия (1.5 – 1.6 г) подбиралась таким образом, чтобы заполнить зазор между оболочкой и зарядом. Массовая доля алюминия в покрытии составляла 90 %. Таким образом, коаксиальный КРЗ имел толщину периферийного слоя $0.03 r_0$. Испытания проводили с односторонним и двусторонним инициированием детонации. Эксперименты с двусторонним инициированием проводили как в воздухе, так и в вакууме с остаточным давлением воздуха 0.05 атм.

При двустороннем инициировании прирост скорости метания, при введении равномерно распределенной добавки алюминия в воздухе составляет 8–9 %, а в вакууме снижается до 3 % (в 2.6 раза). Эффект от покрытия, содержащего в 3 раза меньшее количество алюминия, чем в однородном заряде, составил в воздухе 7 %, а в вакууме, по меньшей мере, не снижается.

Анализ полученных результатов показал следующее:

1. Добавки алюминия в составе разрывных зарядов сгорают как в результате реакции с ПД, так и с окружающим воздухом, в том числе в разреженной атмосфере.
2. Эффект от добавки алюминия возрастает в 1,5 раза при двустороннем инициировании.
3. Обеспечивая повышенную концентрацию алюминия в тонком периферийном слое КРЗ, можно повысить эффективность реализации энергии его сгорания.

Список литературы

1. Давыдов В.Ю. Метательная способность взрывчатых веществ с вторичным выделением энергии в различных газодинамических условиях // Труды XVII Международной конференции Харитоновские тематические научные чтения. Сборник докладов. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2015. С. 509-515.

2. Гришкин А.М., Давыдов В.Ю., Головлев И.Д. Исследование процесса реализации энергии комбинированных зарядов ВВ в полезные формы работы взрыва // Физика горения и взрыва. 1994, т.30, №6 с.100-103.

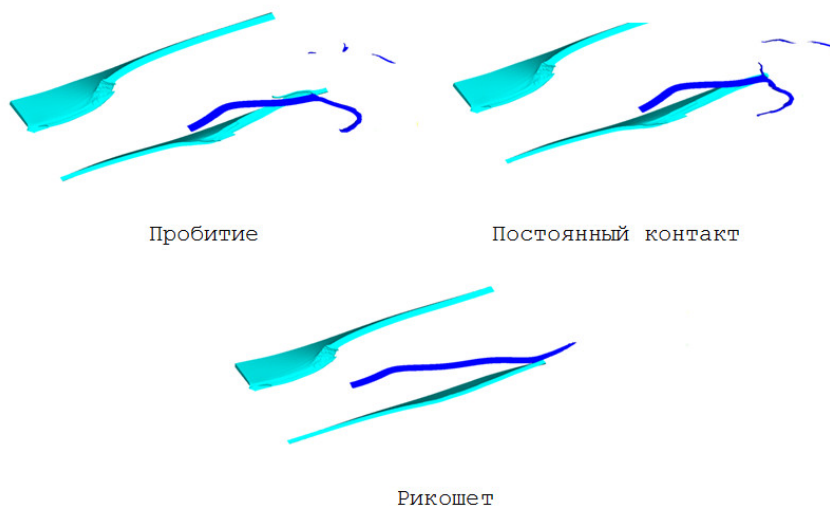
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БПС С ДВИЖУЩИМИСЯ БРОНЕВЫМИ ПЛИТАМИ

Н. С. Дорохов, Д. А. Еськов, В. П. Шишкин

АО «НИИ Стали», Москва

Проанализированы различные варианты взаимодействия динамической защиты с удлиненными (l/d до 30) ударниками, представляющими собой активные части бронебойных подкалиберных снарядов. Одним из эффективных способов существенного снижения проникающей способности ударников является использование в составе броневой защиты устройств динамической защиты [1, 2]. Воздействие на ударник из тяжелого сплава в таких устройствах осуществляется с помощью движущихся в различные стороны броневых плит.

Путем численного моделирования изучено влияние лицевой и тыльной плит на ударник. Показано, что плита, летящая навстречу ударнику (лицевая), придает ему угол атаки, а плита, летящая вдогон ударнику (тыльная), способствует его срабатыванию и разрушению. В результате моделирования установлены три режима взаимодействия тыльной плиты с ударником – пробитие, рикошет и постоянный контакт (рис. 1).



Наилучшие результаты получены при скоростях тыльной плиты 20-100 м/с, при которых реализуется режим постоянного контакта плиты с ударником.

При работе с классической динамической защитой невозможно получить столь малую скорость тыльной плиты, поэтому для реализации такой скорости предлагается использовать несколько возможных способов метания:

- вариант, в одном из которых на тыльную плиту с двух сторон воздействуют продукты детонации взрывчатых веществ (ПД ВВ) либо с различными детонационными характеристиками, либо различных толщин, при этом становится возможным, варьируя параметры ВВ, регулировать скорость плиты в широком диапазоне;

- вариант, в котором под тыльной плитой находится подложка из инертного материала-эластомера, при этом после разгона тыльной плиты от воздействия ПД ВВ она тормозится на подложке.

Предложенные варианты изучены с помощью численного моделирования и натуральных экспериментов. Достигнута хорошая сходимость экспериментальных и численных результатов. Показано увеличение защищающей способности схем защиты, реализующих низкоскоростное метание тыльной плиты, по сравнению с классическими.

Список литературы

1. Частные вопросы конечной баллистики /под ред. В.А. Григоряна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
2. Физика взрыва /под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – в 2 т. Т1. – М.: Физматлит, 2004. – 832 с.

ПРОХОЖДЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ВЗВЕСЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В ЖИДКОСТИ

М. С. Егорова^{1,2}, С. А. Мурзов^{1,2,3}, В. В. Жаховский¹, А. Н. Паршиков^{1,4}

¹ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва

²ИТФ им. Ландау РАН, Московская область, Черноголовка

³МФТИ (ГУ), Московская область, Долгопрудный

⁴ОИВТ РАН, Москва

Вхождение ударной волны во взвесь металлических частиц, находящихся в среде меньшей плотности, характеризуется образованием нестационарной зоны перемешивания материала частиц в окрестности контактного разрыва несущей фазы и взвеси. В зоне перемешивания наблюдается скоростная неравновесность между фазами. При давлении за фронтом ударной волны порядка 10 ГПа и выше структура этой зоны не может быть исследована экспериментально.

Двумерное мезоскопическое моделирование с модельной регулярной структурой взвеси показало [1], что материал взвеси подвергается существенной деформации с образованием серповидных форм частиц. Нами проведено трехмерное моделирование прохождения ударной волны через взвесь с произвольным расположением сферических частиц методом сглаженных частиц (SPH) [2]. Результаты проведенного моделирования показывают характер трехмерного течения, его структуру и реалистичную деформацию частиц в потоке с установлением скоростного равновесия (см. рис. 1).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-19-01599).

Список литературы

1. *Медин С.А., Паршиков А.Н.* Численное моделирование структуры ударных волн в гетерогенных двухкомпонентных средах. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Т. 7. <http://chemphys.edu.ru/issues/2008-7/articles/448/>

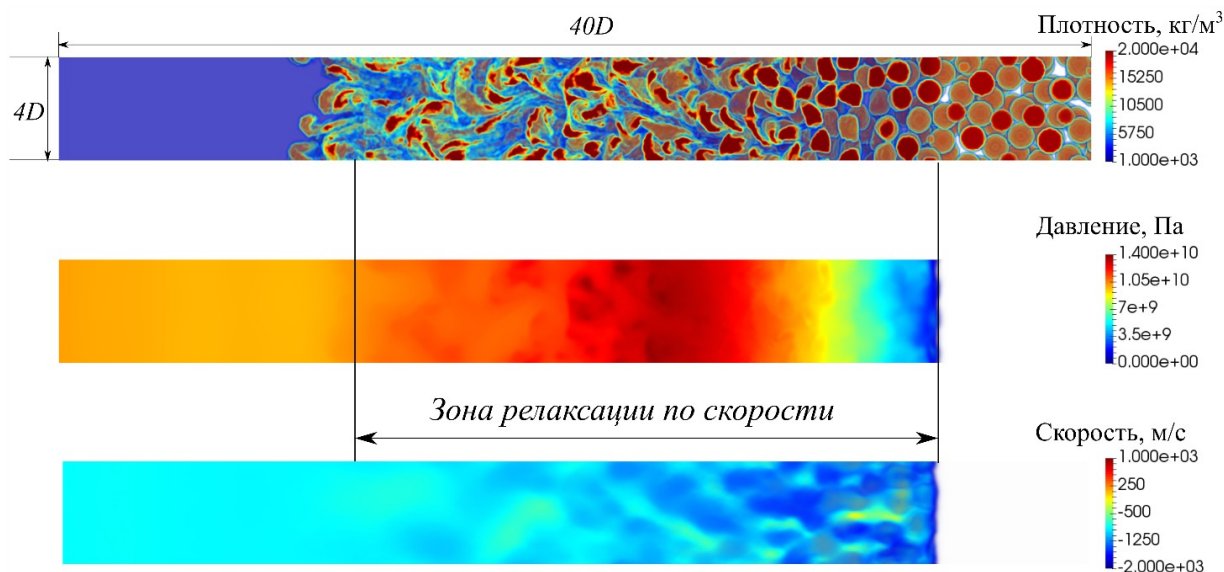


Рис. 1: Воксельное изображение участка расчетной области размером $40D \times 4D \times 4D$, $D=1$ мкм, в момент времени $t=75.4$ нс.

2. Dyachkov S.A., Egorova M.S., Mursov S.A., Parshikov A.N., Zhakhovsky V.V. Auto-balancing algorithm for parallel SPH simulation of materials in extremes // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2017. Vol. 38, no. 5. Pp. 893-897.

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВОДЫ ЗА ФРОНТОМ ОТРАЖЁННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

С. А. Бордзиловский^{1,2}, С. М. Караханов¹, К. В. Хищенко^{3,4}

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

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

³Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

⁴Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Проведена регистрация теплового излучения воды, ударно-сжатой падающей и отраженной от жесткой преграды волнами с целью измерения температуры при однократном и двукратном сжатии. Температура при двукратном сжатии до 58.6–62.7 ГПа составляет 2.4–2.6 кК, в то время как на адиабате однократного сжатия при этих давлениях она достигает 3.9–4.1 кК. Значения температуры, измеренные яркостным и цветовым методами, хорошо согласуются между собой. Оценки потерь теплового излучения на границах показали, что они малы и не препятствуют корректному измерению температуры.

В нижнем диапазоне исследованных давлений ($p_1=27.7$ ГПа) длительности существования постоянного давления за фронтом первой волны ($\Delta t \approx 0.66$ мкс) оказывается недостаточным для формирования оптически толстого излучающего слоя за фронтом первой и второй волн.

При повышении давления до 33 – 36 ГПа регистрируемые профили яркости асимптотически выходят на постоянное значение, что свидетельствует о формировании оптически толстого излучающего слоя и позволяет корректно измерять температуру яркостным методом.

Для расчета температуры за фронтом первой и второй ударных волн использовалось, разработанное ранее УРС [1], в котором полуэмпирические коэффициенты подбирались из условия согласования данных по ударному сжатию воды, включая результаты температурных измерений разных авторов [2, 3, 4] и данные настоящей работы на ударной адиабате однократного сжатия. Применение этого УРС также хорошо описывает экспериментальные данные в расширенном диапазоне на адиабате повторного нагружения в отраженной УВ.

Список литературы

1. *Хищенко К. В.* Температура и теплоемкость полиметилметакрилата за фронтом сильных ударных волн. ТВТ. 1997. Т. 35. № 6. С. 1002–1005.
2. *Кормер С. Б.* Оптические исследования ударно-сжатых диэлектриков. Успехи физ. наук. 1968. Т. 94. № 4. С. 641–687.
3. *Lyzenga G. A., Ahrens T. J., Nellis W. J., Mitchell A. C.* The temperature of shock-compressed water. J. Chem. Phys. 1982. V. 76. No. 12. P. 6282–6286.
4. *Peng X. J., Liu F. S., Zhang S. L., Zhang M. J., Jing F. Q.* The $C(v)$ for calculating the shock temperatures of water below 80 GPa. Sci. China: Phys., Mech. Astron. 2011. V. 54. No. 8. P. 1443–1446.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ НАГРУЖЕНИЙ

А. П. Кузнецов¹, А. В. Михайлюк¹, К. Л. Губский^{1,2}, А. А. Ястребцев^{1,2}, С. В. Норкин²

¹Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», Москва

²ООО «Лазер Ай», Москва

Исследование нестационарных физических процессов и экстремальных состояний вещества, подверженного интенсивному импульсному воздействию, является одной из наиболее актуальных фундаментальных задач физики высоких плотностей энергии. Важной научной проблемой в этой области, имеющей большое практическое значение, является исследование физических и механических свойств материалов, подвергнутых воздействию интенсивных динамических нагрузок. Анализ давления и скорости при ударно-волновом нагружении дает основу для определения кинетики процессов упругопластического деформирования, разрушения, химических и фазовых превращений, изучения динамической прочности и разрушения материалов.

Одним из немногих параметров вещества, доступных для измерения в подобных экспериментах, является скорость движения поверхности (для непрозрачных сред) или скорости ударного фронта в веществе (для прозрачных сред). Информация о временной динамике и пространственных вариациях данного параметра позволяет исследовать фундаментальные явления и процессы, проходящие в веществе при экстремальных давлениях и температурах.

Представлены результаты разработки лазерных измерительных комплексов, для исследования ударно-волновых процессов в широком диапазоне нагружений. Для проведения измерений скорости в диапазоне 0.1–10 км/с разработан семи канальный лазерный измеритель

скорости, основанный на паре неравноплечных интерферометров VISAR. Временное разрешение измерений ~ 1 нс.

Для проведения измерений скорости в диапазоне 5 – 50 км/с был разработан лазерный измеритель скорости, основанный на паре неравноплечных интерферометров с визуализацией поля (Line-imaging VISAR). Система позволяет проводить бесконтактные дистанционные измерения пространственного распределения скорости с пространственным разрешением ~ 5 мкм и временным разрешением ~ 10 пс. Дополнительно в системе содержится регистратор собственной светимости с пространственным разрешением для измерения температуры поверхности объекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 17-72-201064).

УДАР ПО ЛЕДЯНЫМ ПРЕГРАДАМ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Е. И. Краус, А. Ю. Мельников, В. М. Фомин, И. И. Шабалин

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск

В работе рассматриваются вопросы высокоскоростного взаимодействия стальных ударников с ледяными преградами в диапазоне скоростей от 100 м/с до 500 м/с. Проведены экспериментальные исследования глубины проникновения стальных цилиндрических ударников в массивные ледяные мишени, при скоростях ударника до 500 м/с, с использованием одноступенчатой легкогазовой установки.

В рамках упруго-пластического подхода [1], программным кодом REACTOR3D [2] проведено численное моделирование процессов:

- внедрения стальных цилиндров в ледяные мишени на основе экспериментальных данных;
- разрушения ледяных пластин конечной толщины при ударе стальными ударниками разной конфигурации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00244).

Список литературы

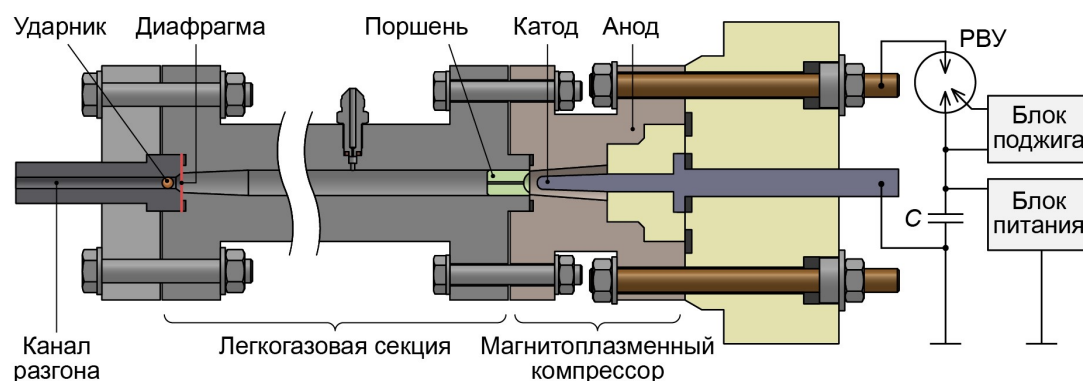
1. *Фомин В.М. и др.* Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск: СО РАН, 1990. 600 с.
2. *Kraus E.I. and Shabalin I.I.* The Tool for High-Velocity Interaction and Damage of Solids // Math. Montisnigri. 2017. Vol. 39. P. 18–29.

ЛЕГКОГАЗОВАЯ МЕТАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

П. П. Храмцов, В. А. Васецкий, А. И. Махнач, М. В. Дорошко, В. М. Грищенко, И. А. Ших

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

В работе представлена двухстадийная магнитоплазменная легкогазовая баллистическая установка, предназначенная для разгона одиночных твердых частиц (ударников) [1], и приведены результаты ударного взаимодействия ускоренных частиц с различными мишенями. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке:



В баллистических испытаниях использовались алюминиевые и стальные сферические ударники диаметром 2.5–4 мм, которые разгонялись до скоростей 0.5–5.0 км/с. Метание частиц осуществлялось в условиях вакуума. Для измерения скорости частиц разработан времяпролетный электроконтактный датчик с оптронной развязкой. Погрешность измерения скорости частицы при помощи этого датчика составляет ~5%.

На баллистической установке были проведены испытания стойкости мишеней из алюминиевых сплавов и полиметилметакрилата (ПММА), образцов теплозащитных покрытий и многослойных конструкций тепловой защиты десантного модуля проекта «ЭкзоМарс», образцов элементов экранной противометеоритной защиты, состоящих из дюралюминиевой подложки и композиционного покрытия, модифицированного под воздействием компрессионной плазмы. Для мишеней из ПММА получена зависимость глубины проникания ударника от его скорости:

$$\frac{h}{d} = 2,542 \frac{\rho_p}{\rho_t} \left(\frac{v}{c} \right)^2$$

Также показана возможность модификации данной установки, заключающейся в замене канала разгона соплом Лавала, для проведения экспериментов по гиперзвуковому обтеканию тел. Приведены результаты экспериментального исследования гиперзвукового обтекания конусов с углами полураствора $\tau_1 = 3^\circ$ и $\tau_2 = 12^\circ$ при числах Маха набегающего потока $M_1 = 18$ и $M_2 = 14.4$ соответственно.

Список литературы

1. *Khramtsov P. P., Vasetskiy V. A., Grishchenko V. M. et al.* Experimental and analytical study of a two-stage light-gas magnetoplasma launcher for ballistic tests under vacuum conditions. *High Temp. Mater. Processes*. 2015. Vol. 19. P. 209–219.

ПУЗЫРЬКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ: ДИНАМИКА И ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ

А. Л. Бычков^{1,2}, С. М. Коробейников^{1,2}, А. Ю. Коробенкова^{1,2}, А. В. Ридель^{1,2}, Д. И. Карпов¹,
А. Л. Куперитох¹, Д. А. Медведев¹, М. Б. Мередова¹

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

² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

Экспериментально и численно исследовано поведение пузырьков в жидкости под действием электрического поля. Для изучения деформации использовались всплывающие пузырьки воздуха в трансформаторном масле (диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2.3$). Измерялась деформация пузырьков под действием переменного электрического поля напряженностью 33 кВ/см (амплитудное значение) $\delta = (a - b)/b$ (здесь a и b – большая и малая полуоси эллипсоида). Для пузырьков с начальным радиусом 1 мм значение деформации составляет $\delta \approx 0.46$.

Выполнены расчеты деформации пузырька в жидкости под действием электрического поля. Динамика сплошной среды моделировалась с помощью решеточного уравнения Больцмана с учетом фазовых переходов жидкость-пар и переноса тепла. Использовалось уравнение состояния Ван дер Ваальса с начальной температурой $T = 0.7T_c$ (T_c – критическая температура). Для начального радиуса пузырька 1 мм получено значение деформации $\delta \approx 0.65$, удовлетворительно согласующееся с экспериментальными результатами.

Также исследованы частичные разряды (ЧР) во всплывающих пузырьках гелия под действием переменного электрического поля напряженностью 22 кВ/см. Частичные разряды являются редким событием. Длительность импульса частичного разряда составляет около 50 нс, максимальная величина тока 3.3 мА, кажущийся заряд (заряд, проходящий во внешней цепи) – около 80 пКл. Частичный разряд в пузырьке может приводить к делению (разрыву) пузырька под действием электростатических сил (рис. 1). После развития частичного разряда в пузырьке в большинстве случаев наблюдается последующий частичный разряд между одним из пузырьков и электродом.

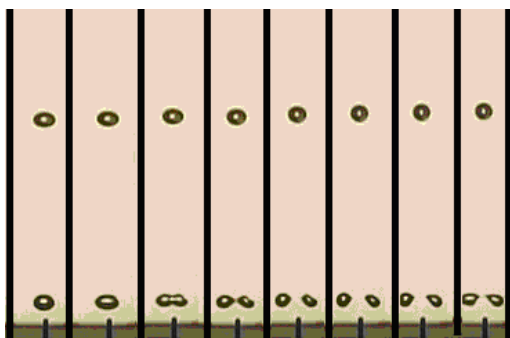


Рис. 1: Развитие частичного заряда в пузырьке. Напряжение $V = 16$ кВ. Скорость съемки 1200 к/с.

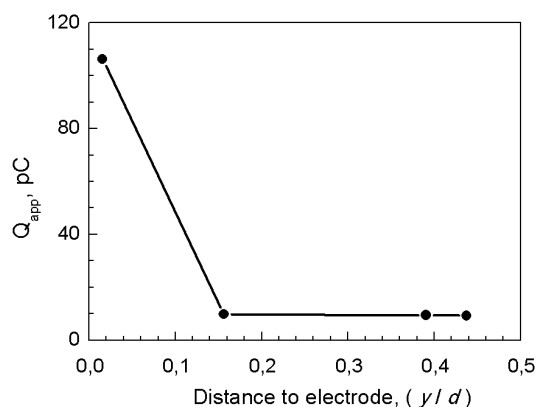


Рис. 2: Кажущийся заряд при ЧР в полости диаметром 0.7 мм при разном расстоянии от центра полости до электрода. $d = 6.8$ мм, $V = 22$ кВ.

Выполнено двумерное и трехмерное моделирование частичных разрядов в полостях в конденсированном диэлектрике с учетом проводимости газа в веществе. Исследовано влияние положения сферической полости на амплитуду частичных разрядов. При положении полости на

поверхности электрода амплитуда тока ЧР, регистрируемого во внешней цепи, примерно на порядок больше, чем при расположении полости в центре промежутка (рис. 2). Размер сферической полости сильно влияет на значения истинного и кажущегося заряда. Был проведен расчет влияния деформации полости на характеристики ЧР в полости $\delta = (a - b)/b$. Кажущийся заряд растет приблизительно линейно с ростом δ . Рассчитанные значения кажущегося заряда хорошо согласуются с измеренными в выполненных экспериментах. Проведены расчеты гидродинамических процессов при ЧР в пузырьке. Для этого в модель, используемую для расчетов деформации, добавлена электропроводность в газовой фазе и кондуктивный перенос заряда движущимся веществом. После подачи напряжения в средней части пузырька возникает электропроводность, что приводит к переносу заряда за счет проводимости и возникновению электрических сил, растягивающих пузырьки. Затем накопленный заряд переносится вместе с веществом к полюсам пузырька. Это движение заряда также вызывает наведенный электрический ток во внешней цепи. Далее электрические силы, действующие на накопленный заряд, приводят к разрыву исходного пузырька и образованию двух дочерних.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 16-19-10229.

РАЗРУШЕНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ В ТРЁХЭЛЕКТРОДНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКЕ С ВЗРЫВНОЙ ЭМИССИЕЙ

Е. И. Пальчиков

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

Проведено исследование электродов импульсной трехэлектродной рентгеновской трубки с перезаряжающимся изолированным электродом [1], работающей в режиме взрывной эмиссии. Исследование проводилось на сканирующем электронном микроскопе после 150 вспышек, произведённых трубкой. Напряжение между электродами достигало 650 кВ, длительность воздействия от 150 до 800 нс. Расстояние игольчатый анод – кольцевой катодный узел 14 мм.

Исследование показало наличие множества шариков, размером порядка 10-40 мкм, образованных как из материала анода (вольфрам), так и из материала катода (ковар). Картина разрушения поверхности электродов частично похожа на приводимую в работе [2]. Кроме электродов, шариками засеяна вся поверхность изолятора трубок. Это влияет на качество электрической изоляции и ресурс трубок. Химический состав шариков определялся рентгеновским люминесцентным микроанализом с возбуждением площадки размером 1 мкм электронным пучком. Механизм образования шариков связан с присутствием бомбардировки электродов интенсивными пучками электронов и потоками плазмы мощностью 108 Вт с энергией 50 Дж в одном импульсе. Приводятся оценки интенсивностей воздействий потоков энергии, напряженностей полей на поверхности различных участков электродов и значений отрицательно приложенных давлений со стороны электрического поля. Оценки условия отрыва металлических капель по кинетической энергии дают пороговые значения давления электрического поля порядка 30 Бар. Они близки к верхним значениям оценок из величины отрицательных давлений электрического поля для данного интервала напряженностей поля и времени воздействия. Показано, что вытянутые после воздействия электрического поля и плазмы фрагменты металла до остывания успевают принимать сферическую форму за счёт поверхностного натяжения.

Список литературы

1. Биченков Е.И., Пальчиков Е.И. Приборы и некоторые методы импульсной рентгенографии быстропротекающих процессов // Физика горения и взрыва.- 1997.- т.33, №3.- стр. 159-167.
2. Габович М.Д., Порицкий В.Я. Исследование нелинейных волн на поверхности жидкого металла, находящегося в электрическом поле // Письма в ЖЭТФ, 1981, т. 33, вып.6, С 320-324.

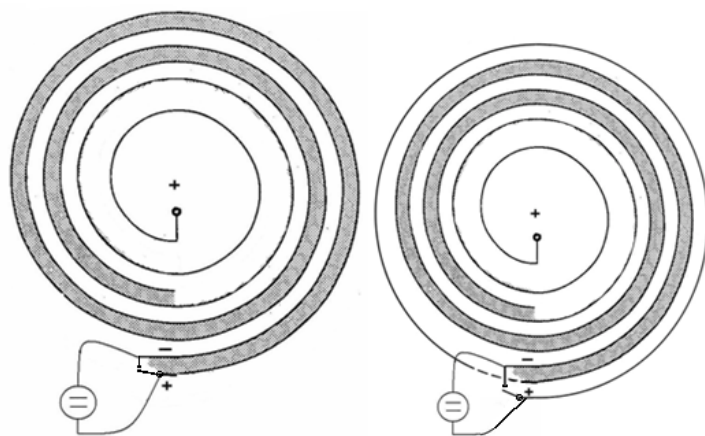
ИМПУЛЬСНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ АППАРАТ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОГО СПИРАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

Е. И. Пальчиков, А. В. Долгих, В. В. Клыпин, А. М. Рябчун, М. С. Самойленко

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

Изготовлен и испытан макет импульсного рентгеновского аппарата с рабочим напряжением 600-800 кВ на основе комбинированного генератора. В отличие от классического спирального генератора за счет частичного использования одношинной линии увеличивается общая длина спиральной обмотки, что позволяет согласовать время прохода волны по линии со временем колебаний в генераторе по модели трансформатора Тесла. Таким образом, удалось целенаправленно получить высокий КПД в данной модификации трансформатора.

Комбинированный генератор (рис. 1) представляет собой модификацию спирального генератора [1], трансформатора Белкина [2] и трансформатора Тесла [3, 4]. Чтобы согласовать время прохода волны по генератору с временем колебаний в трансформаторе Тесла была выбрана следующая конфигурация генератора. На сердечник намотано 16 витков одношинной обмотки и поверх них – 12 витков двухшинной линии. При заряде двухшинной линии до 50 кВ выходное напряжение генератора составляет 600 кВ, время нарастания напряжения – 170 нс. Для генератора Белкина нами ранее была впервые предложена точная теоретическая модель [5]. В данной работе впервые предложена теоретическая точная модель для комбинированного генератора и сравнение модели с результатами экспериментальных измерений.



Список литературы

1. Fitch R.A., Howell V.T.S. Patent Appl. 18136, 1961

2. *Белкин Н.В., Жаркова А.Я.* А.с. 149494 СССР, Класс 21d2, 49. Импульсный трансформатор. Заявлено 06.09.1961 г. за №744249/26-9. Бюллетень изобретений № 16. 1962.
3. *Башкатов Т.Ю., Пальчиков Е.И., Рябчин А.М.* Об уточнении теоретической модели для спирального генератора высоких напряжений. ЖТФ, 2007, том 77, выпуск 12, с. 66-72.
4. *Пальчиков Е.И., Красников И.Ю.* Простой источник высоковольтных импульсов // Труды XII Международной конференции по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам. Июль 13-18, 2008, Новосибирск, Россия / ИГиЛ СО РАН. Новосибирск. 2011. с. 813-824.
5. *Пальчиков Е.И., Рябчин А.М., Красников И.Ю.* Модифицированный спиральный генератор высоких напряжений для питания импульсного рентгеновского аппарата. ЖТФ. Т. 82 Вып. 2, с. 136-146. 2012.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ

*М. Ю. Сотский, Д. В. Гелин, И. С. Крутов, Д. А. Лысов, В. А. Марков, И. В. Марков,
М. Ю. Четвернин*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Информацию о нестационарных процессах при метании тел в пусковых установках и последующем их торможении в исследуемой среде получают с использованием технологий высокоскоростной оптической съемки и измерительных технологий пьезометрии при проведении баллистических опытов. Экспериментальные данные являются основой для расчетно-экспериментального изучения процессов и получения дополнительной информации. Применение высокоскоростной оптической съемки невозможно для ствольных пусковых установок на первом этапе баллистического цикла при ускорении тела. Ограничено применение съемки и на заключительном этапе торможения, особенно в случаях глубокого проникания тела в среду.

Непрерывная регистрация истории замедления измерительного зонда при его движении в среде позволяет получить экспериментальные данные о динамических механических свойствах исследуемой среды и произвести идентификацию свойств среды путем согласования данных об изменении во времени процесса расчетных и регистрируемых параметров. Данные таких измерений используются не только для исследования особенностей нестационарных процессов проникания и установления динамических прочностных свойств материалов, но и для верификации результатов моделирования [1].

Представлена лабораторная технология ускорения тела в баллистическом эксперименте [2], позволившая проводить детальную визуализацию баллистического процесса в полном цикле. Осуществлена серия опытов с высокоскоростной регистрацией картины динамических течений рабочего газа от начала движения измерительного зонда и взаимодействия газа с проводом электрической связи в пусковом устройстве до окончания движения зонда в мишени. При этом исследован ряд конструктивных вариантов зонда с внешним диаметром как меньшим, так и равным внутреннему диаметру пускового устройства. На основании анализа

видеоизображений формы провода электрической связи, соединяющего зонд с регистратором, определены условия, обеспечивающие надежность регистрации параметров движения измерительного зонда на траектории полета и в мишени. В результате дополнительных исследований предложены также технические решения для проведения опытов в лабораторных и полевых условиях и применения в опытах измерительных зондов, метаемых с использованием отделяемых ведущих устройств.

Работа выполнена с использованием оборудования ГЗ 3.6196.2017/7.8 и ГЗ 3.6257.2017/7.8.

Список литературы

1. *J.-M. Sibeaud, A. Delmas, A. Hottetlet and D-P. Zappa Kinetic Energy Perforation of Concrete Slabs: Investigation of Embedded High G-Load Sensing. Proc. 27-th Int. Symp.on Ballistics. Freiburg, Germany. 2013. vol. 2. pp.1557-1567.*
2. *Гелин Д.В., Лысов Д.А., Марков В.А., Марков И.В., Сотский М.Ю., Селиванов В.В., Гелин Н.Д., Сотская М.М. . Новые технические решения для получения дополнительной информации о нестационарных процессах в баллистических опытах. Инженерный журнал: наука и инновации, 2018, вып. 3.<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-3-1747>*

РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ПЫЛЕВЫХ СТРУЙ С ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

А. Н. Власов¹, А. В. Журавлев¹, В. А. Пашенцев¹, В. Н. Смирнов¹, Е. Б. Смирнов¹, М. Ю. Столбиков¹, В. Е. Черемазов¹, К. А. Тен², А. О. Кашкаров², И. А. Рубцов²

¹Российский Федеральный ядерный центр–ВНИИТФ, Снежинск

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

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований пыления в воздушной среде с поверхности плоских металлических образцов, подвергнутых ударно-волновому нагружению (20-30 ГПа).

Важным вопросом является исследование динамики пыления металлов, начиная со стадии разгона образца продуктами взрыва и на последующей стадии его движения, имея в виду определение зависимости $m(t)$. Основной аспект-определение времени достижения M_{max} и поведение $m(t)$ после максимума (инерционное движение струи либо рассеяние в газе).

Исследования проводились с использованием рентгенографических методов: метод регистрации синхротронным излучением (СИ) и метод импульсной рентгенографии (МИР). Высокая информативность рентгенографии достигается за счет многокадрового режима регистрации, что является основным достоинством метода СИ. Для МИР многокадровость обеспечивалась использованием скользящей детонационной волны вместо прямой волны, что позволило получить данные о динамике развития струй с поверхности металла.

АНАЛИЗ ПРОНИКАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТЕРЖНЕВЫХ УДАРНИКОВ ИЗ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. Ф. Толкачев, С. А. Зелепугин

НИИ прикладной математики и механики ТомГУ, Томск

Перспективным направлением усиления проникающей способности ударников кинетического действия является применение композиционных материалов комбинированного строения, либо неклассических материалов, например, сильнопористого материала с низкой средней удельной плотностью [1]. Кроме того, ведутся широкомасштабные поисковые исследования эффективных способов защиты Земли от различных космических тел огромной массы, летящих с высокими скоростями.

В работе рассматривается инженерная методика оценки глубины проникания стержневых ударников из материала с заданной пористостью и приведены результаты анализа параметрических исследований влияния физико-механических характеристик пористого материала ударника на глубину его проникания в упруго-пластическую среду.

Вычислительная методика оценки глубины проникания основана на модификации гидродинамической модели проникания с учетом ударно-волновых и прочностных свойств взаимодействующих материалов [2]. Корректирующие постоянные модели подбирались по экспериментальным данным. Получены расчетные зависимости глубины проникания L_k равных по массе и диаметру ударников из материалов различной пористости. Так установлено, что при скорости удара 4 км/с пористый ударник (плотность $\rho_{00} = 8.87$ г/см³, матрица – вольфрам) проникает в стальную мишень глубже на 40% в сравнении с вольфрамовым ($\rho_0 = 19.17$ г/см³).

Проведен анализ результатов оценок ударников из пористых и матричных материалов одинаковой плотности: пористого вольфрама ($\rho_{00}=8.87$ г/см³), меди ($\rho_0=8.93$ г/см³) и сплава Ni+Cu ($\rho_0=8.89$ г/см³). Показано, что ударники из пористого вольфрама проникают в стальную преграду глубже в сравнении с исследованными при скоростях взаимодействия свыше 2000 м/с и эффект усиливается с увеличением скорости соударения.

На основе полученных результатов оценок и литературных данных проведен анализ проникающей способности ударников из вольфрама различной пористости. За базовый выбран стержень из вольфрама длиной 6 см и удлинением 10. Проведено сравнение данных, полученных по гидродинамической модели, имитационной модели [2] и по аналитическому соотношению [3]. Результаты исследования свидетельствуют о значительном увеличении проникающей способности стержней при пористости в диапазоне $0.25 < \alpha < 0.80$.

В настоящей работе использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 2.09.2018 Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

Список литературы

1. Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Козорезов К.И. и др. Докл.АН. 1997. Т.355. №2. С. 192-195.
2. Толкачев В.Ф. Всесибирские чтения по математике и механике. Т. 2. Томск, 1997. С. 107-113.
3. Федоров С.В. ЖТФ. 2007. Т.77. № 10. С. 131-134.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОПОРИСТЫХ СМЕСЕЙ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ С МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ УРАВНЕНИЕМ СОСТОЯНИЯ КОМПОНЕНТОВ

К. К. Маевский, С. А. Кинеловский

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

Представлены результаты численных экспериментов по моделированию ударно-волнового нагружения пористых и сплошных образцов меди и гетерогенных смесей, включающих в свой состав медь в качестве компонента. Модель основана на предположении, что все компоненты смеси, при ударно-волновом нагружении находятся в термодинамическом равновесии. Конденсированные фазы описываются мало-параметрическим уравнением состояния. Дополняя систему уравнений динамической совместности условием равенства температур компонентов смеси, выписываются зависимости, которые можно трактовать как ударные адиабаты смеси.

Интерес к исследованиям сжимаемости пористых гетерогенных смесей связан с возможностью создания материалов с наперед заданными необходимыми свойствами, в частности, такими как высокая прочность и термостойкость. Используемая модель, являющаяся развитием подхода созданного при разработке модели ТЕС [1 - 2] позволяет описать термодинамические параметры ударно-волнового нагружения пористых материалов и смесей в широком диапазоне значений давления и пористости. Мало-параметрическое уравнение состояния, которое используется для компонентов, позволяет достоверно описывать термодинамические параметры материалов, полученные на основании экспериментальных данных, в том числе и при максимальных сжатиях.

Наличие данных экспериментов дает возможность проводить сравнение последних с расчетными данными с учетом предположений, использовавшихся в модели. Получено хорошее соответствие данных расчетов по используемой модели с данными различных авторов для динамических параметров, теплоемкости и температуры, определенными на основании экспериментов. Параметры модели, позволившие достоверно описывать термодинамические параметры ударно-волнового нагружения чистых материалов, используются для моделирования термодинамических параметров смесей с такими материалами в качестве компонента. Данная модель является перспективной для определения соотношений компонентов смеси с целью получения заданных параметров сплошных и пористых материалов после воздействия ударными волнами.

Список литературы

1. *Кинеловский С. А., Маевский К. К.* Моделирование ударно-волнового нагружения многокомпонентных материалов, включающих в свой состав висмут. ТВТ. 2016. Т. 54. Вып. 5. С. 716–723.
2. *Кинеловский С. А., Маевский К. К.* Оценка термодинамических параметров ударно-волнового воздействия на высокопористые гетерогенные материалы. Журнал технической физики. 2016. Т. 86. Вып. 8. С. 125-130.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ МОЛИБДЕНА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

К. В. Хищенко

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Уравнения состояния веществ в ударных волнах представляют интерес для анализа и численного моделирования физических процессов при взрывном выделении энергии [1]. В настоящей работе рассматривается полуэмпирическая модель для описания термодинамических свойств и фазовых превращений металлов в широком диапазоне плотностей и температур. Представлено уравнение состояния молибдена с учетом плавления и испарения. Дано сравнение результатов расчетов термодинамических параметров этого тугоплавкого металла в области экспериментов с волнами ударного сжатия и адиабатического расширения с имеющимися опытными данными при высоких давлениях и температурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН № 13 «Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии».

Список литературы

1. *Фортон В. Е.* Уравнения состояния вещества: от идеального газа до кварк-глюонной плазмы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013.

ОТ ПОДВОДНЫХ ВЗРЫВОВ К ГАЗО-ИМПУЛЬСНЫМ ВОДНЫМ ДВИЖИТЕЛЯМ

В. С. Тесленко

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

Самым уязвимым устройством на средствах водного транспорта является винтовой движитель, который повреждается при ударах о твердые объекты в воде. Существует много способов защиты от повреждений винтов, но полной гарантии защиты винта от повреждений нет. Эта проблема предопределяет поиск других методов генерации тяги для водного транспорта и специальных средств перемещения на воде габаритных объектов, платформ, барж, льдин.

В докладе представлена эволюция развития идей применения подводных взрывов в различных областях [1], с постановкой методов циклического взрывания газов в воде для генерации тяги. В данной работе рассматривается перспективный водный движитель без винтов – газо-импульсный водный движитель, в котором тяга обеспечивается за счет импульсно-циклического сжигания горючих газов непосредственно в воде на тяговой стенке [2]. К настоящему времени проведены экспериментальные работы по методам генерации тяги для различных макетов, с измерениями импульсов силы от газовых зарядов на стенку и расчетами удельной тяги [3].

В данном докладе показаны преимущества методов генерации тяги на плоской стенке, в сравнении с водометными вариантами. Из результатов экспериментов и расчетов следует, что средняя удельная тяга для случаев сжигания газа на плоской тяговой стенке без боковых границ может превосходить среднюю удельную тягу для цилиндрических стволов.

Список литературы

1. В.К. Кедринский. Гидродинамика взрыва эксперимент и модели, Новосибирск – 2000 г. , 434 с.
2. В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, Р.Н. Медведев, М.С. Мандрик. Способ получения тяги // Патент № 2557337 от 29.05.2014.
3. В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, Р.Н. Медведев. Сжигание газов в воде для генерации тяги // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Том 24, № 4. С. 599-608. <http://swsl.hydro.nsc.ru/publ/Teslenko-TiA2017-24-4.pdf>

ГЕНЕРАЦИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ ПРИ ПОДРЫВЕ ВВ

Д. Г. Ахметов¹, В. В. Никулин¹, А. В. Пластинин¹, Е. А. Чашников¹, В. Ф. Копьев²,
М. Ю. Зайцев²

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

²Центральный аэрогидродинамический институт, Москва

С помощью подрыва зарядов ВВ получены вихревые кольца (ВК) диаметром порядка 1 м и начальной скоростью движения превышающей 100 м/с. ВК меньших размеров и скоростей исследовались в ИГиЛ на протяжении многих лет, начиная с пионерских работ, инициированных М.А. Лаврентьевым [1, 2], однако для акустических задач потребовалось увеличение масштабов. Оказалось, что такие ВК излучают отчетливо слышимый акустический сигнал, что представляет интерес с точки зрения исследования генерации акустического излучения вихрями [3] и масштабируемости механизмов генерации шума. ВК является изолированным концентрированным вихрем, не подверженным действию внешних границ, поэтому закономерности, установленные при его исследовании, будут связаны непосредственно с вихревым характером течения и могут быть перенесены на другие более сложные вихревые образования. Для создания подобных ВК требуется создание импульсной струи длительностью порядка 10 мс и энергией $10^4 - 10^5$ Дж. Такие параметры можно достичь, используя ВВ.

ВК получаются при подрыве ВВ в цилиндрическом стволе, заглушенном с одного конца. Диаметр ствола 0.8 м, длина 3 м. В качестве ВВ используется детонационный шнур с линейной плотностью ВВ 14 г/м и скоростью детонации ВВ 7.3 км/с. Шнур располагается в виде плоской спирали на расстоянии 200 мм от дна ствола. При взрыве заряда возникает ударная волна, движущаяся к открытому концу, а за ударной волной высокоскоростная газовая струя, вытекающая из ствола. При истечении струи на выходной кромке ствола формируется вихревое кольцо, которое отрывается от ствола и движется во внешнем воздухе. ВК визуализируется дымом, предварительно заполнявшим ствол, а на стадии формирования еще и догорающими остатками оболочки ДШ. Процесс формирования и движения вихря регистрируется скоростной видеокамерой с частотой 500 к/с. Камера располагается на расстоянии 40 м от ствола. Измеряется скорость передней, по ходу движения, границы вихря в процессе формирования на расстоянии от выходного среза ствола равном 0.8–1 м и после завершения формирования на расстоянии 3.5–4 м от среза при четырех значениях массы ВВ: 28, 35, 42 и 84 г.

Оказалось, что измеряемые скорости слабо зависят от массы ВВ. Так скорость границы при формировании изменяется от 130 до 200 м/с, а скорость вихря после формирования от

106 до 130 м/с, в то время как масса ВВ изменяется в 3 раза. Это означает, что при увеличении массы ВВ все меньшая доля его энергии переходит в энергию ВК.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 18-08-00824).

Список литературы

1. *Ахметов Д.Г.* Вихревые кольца. Новосибирск. Изд. «ГЕО». 2007.151 с.
2. *Луговцов А.А., Луговцов Б.А., Тарасов В.Ф.* О движении турбулентного вихревого кольца // *Динамика сплошной среды.* Новосибирск: Изд. Ин-та гидродинамики СО АН СССР, 1969. Вып. 3. С.50-60.
3. *Копьев В.Ф., Чернышев С.А.* Колебания вихревого кольца, возникновение в нем турбулентности и генерация звука // *УФН.* 2000. Т. 170. № 7. С. 713–743.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЗАДАЧАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕЛ (ПРОНИКАНИЕ)

Д. В. Петров¹, И. Е. Забабахин¹, О. Н. Шубин², В. А. Симоненко¹, В. П. Елсуков¹

¹*РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск*

²*ДР ЯБП и ВЭУ, Москва*

Рассмотрено аналитическое решение трех задач взаимодействия тел в рамках механики сплошных сред.

В первой задаче построена модель проникания осесимметричных заостренных тел в прочные малосжимаемые среды со скоростями много меньшими скорости звука в среде, а также в высокопористые среды. Рассматривается проникание в осесимметричный канал произвольной формы. Проводится сравнение с экспериментальными данными. Получены простые зависимости глубины проникания и перегрузок от параметров среды.

Во второй задаче рассмотрен ряд вопросов о взаимодействии кумулятивной струи с преградой. Глубина пробивания и диаметр пробоины оценивается на основании упрощенной гидродинамической модели, предложенной М. А. Лаврентьевым и распространенной на случай взаимодействия разноскоростной струи с прочной преградой. Предлагаемый аналитический способ позволяет рассчитать действие струи с заданными параметрами (т.е. сформированной конкретным кумулятивным зарядом) на преграды с различной плотностью, механической прочностью и на разном удалении (фокусном расстоянии) от заряда. Также получена оценка максимально возможного удлинения кумулятивной струи.

В последней задаче рассматривается модель взрывного взаимодействия метеоритов с атмосферой, а так же их фрагментации. Показана принципиальная возможность взрывного разрушения их в атмосфере. Получены простые соотношения для высоты взрыва метеорита и размеров фрагментов, долетающих до Земли, если взрыва не происходит.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОКРАТНОГО И ДВУКРАТНОГО СЖАТИЯ ПЛЕКСИГЛАСА И ПОЛИКАРБОНАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Е. Б. Смирнов, Д. В. Петров, А. Ю. Гармашев, А. К. Музыря, С. М. Долгих

РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск

Эксперименты с однократным и двухкратным ударным сжатием вещества являются основной для построения уравнений состояния материалов при высоких давлениях. Двухкратное сжатие по сравнению с однократным сопровождается меньшим увеличением внутренней энергии, вследствие чего реализующиеся состояния располагаются ниже ударной адиабаты однократного сжатия, приближаясь к изотерме. Это обстоятельство объясняет значение, которое имеют опыты по двухкратному сжатию для изучения состояния веществ и их уравнений состояния при высоких давлениях.

В работе приводятся постановки и результаты экспериментов, в которых реализованы режимы однократного и двухкратного сжатия плексигласа и поликарбоната. Регистрация процессов движения падающих ударных волн, столкновения и образования отраженных ударных волн осуществлялась с использованием синхротронного излучения. Эксперименты выполнены на ускорительном комплексе ВЭПП-3 Института ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В УДАРНО-СЖАТОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т МЕТОДОМ ДОГОНЯЮЩЕЙ РАЗГРУЗКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЬЕЗООПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

*Ф. И. Тарасов, А. Ю. Гармашев, С. М. Долгих, Е. Б. Смирнов, А. Ю. Николаев,
Д. Т. Юсупов, В. В. Малев, Р. Н. Канунников*

РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск

В данной работе предложена постановка взрывных экспериментов по определению скорости звука за фронтом ударных волн с помощью пьезооптических датчиков. Представлены результаты определения скорости звука в ударно-сжатой нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т в диапазоне давлений от 73 до 198 ГПа. Проведено сравнение полученных и ранее опубликованных данных по скорости звука в ударно-сжатой нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ МИКРОЧАСТИЦ ПРИ ВЫХОДЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА СВОБОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

С. И. Кременко

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

При сильном ударном воздействии на металлическую пластину с ее свободной поверхности выбрасывается поток частиц разных размеров (ударно-волновое «пыление»). Выход

ударной волны (УВ) на свободную поверхность (СП) металлов приводит к развитию микровозмущений на СП и последующему образованию мелкодисперсной фракции, распределенной в пространстве по размерам и скоростям. Развитие процесса роста неустойчивости на СП металла и, соответственно, характеристики пылевого облака зависят от фазового состояния нагруженного материала, условий нагужения и т.д.

Для исследования процесса пыления традиционно используют метод импульсной рентгенографии, метод измерения давления пьезоэлектрическими датчиками, оптические методики. Диапазон размеров частиц при пылении металлов от единиц мкм до сотен мкм. Предполагается, что в потоке есть и более мелкие частицы, но существующие методики их пока разрешить не могут.

В ИЯФ СО РАН на ускорительном комплексе ВЭПП-3 – ВЭПП-4 построены две станции для исследования быстрых (в том числе взрывных) процессов. На станциях есть возможность измерять как проходящее излучение (поглощение), так и мало-угловое рентгеновское рассеяние (МУРР) синхротронного излучения (СИ). В качестве детектора используется прецизионный быстродействующий детектор DIMEX. С помощью регистрации проходящего СИ были проведены исследования потоков микрочастиц со свободной поверхности олова. Получены распределения массы вдоль микроструй образующихся из канавок микронного размера.

КУМУЛЯТИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ СТОЛКНОВЕНИИ ТЕЛ С ГАЗОВЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

П. Ю. Георгиевский, В. А. Левин, О. Г. Сутырин

Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Выполнено численное исследование столкновения затупленных тел с газовыми неоднородностями – пузырями эллипсоидальной формы пониженной и повышенной плотности, «вмороженными» в сверхзвуковой набегающий поток. Изучен эффект возникновения аномальных всплесков давления и плотности в критической точке тела. Для случая столкновения с газовыми пузырями пониженной плотности эффект был впервые обнаружен в [1]. Похожие результаты были получены экспериментально и численно для взаимодействия тел с высокотемпературными плазменными образованиями, индуцированными оптическим лазерным разрядом [2–3].

В настоящей работе показано, что основной причиной внезапного повышения давления и плотности в критической точке тела является предшествующая фокусировка перед телом сходящихся к оси симметрии поперечных ударных волн, сопровождающаяся формированием тонких кумулятивных струй.

Динамика быстропротекающего процесса фокусировки в целом согласуется с известными сценариями взаимодействия падающей ударной волны с газовыми пузырями [4]. Для газовых пузырей пониженной плотности в соответствии с «дивергентным» сценарием взаимодействия ударная волна ускоряется внутри пузыря и имеет место фокусировка формирующейся на периферии слабой вторичной ударной волны. Для газовых пузырей повышенной плотности в соответствии с «конвергентным» сценарием взаимодействия приосевая часть ударной волны тормозится внутри пузыря, а внешняя – огибает пузырь и фокусируется за ним. Процесс фокусировки и дефокусировки тороидальных ударных волн сопровождается формированием тонких сверхзвуковых кумулятивных струй на оси симметрии течения, взаимодействие которых с поверхностью тела в дальнейшем вызывает аномальный всплеск давления и плотности.

Проведено исследование столкновения тел с эллипсоидальными газовыми пузырями различной плотности, размера и удлинения при различных числах Маха потока. Установлено, что для реализации эффектов фокусировки и кумуляции отношение плотностей должно быть больше некоторой критической величины, форма газового пузыря – близка к сферической, а продольный размер – порядка отхода головной ударной волны. Так, эффекты не наблюдались при столкновении затупленных тел с плоским слоем или с эллипсоидальными пузырями слишком большого поперечного размера.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-29-01092-офи-м, 18-01-00793-а).

Список литературы

1. *Георгиевский П.Ю., Левин В.А.* Нестационарное взаимодействие сферы с атмосферными температурными неоднородностями при сверхзвуковом обтекании. Изв. РАН. МЖГ. 1993. № 4. С. 174–183.
2. *Yan H., Adelgren R., Bogushko M., Elliott G., Knight D.* Laser Energy Deposition in Quiescent Air. AIAA J. 2003. V. 41. No. 10. P. 1988–1995.
3. *Schülein A., Zheltovodov A., Pimonov E., Loginov M.* Experimental and Numerical Modeling of the Bow Shock Interaction with Pulse-Heated Air Bubbles. Int. J. of Aerospace Innovations. 2010. V. 2. No. 3. P. 165–187.
4. *Georgievskiy P.Yu., Levin V.A., Sutyurin O.G.* Interaction of a Shock with Elliptical Gas Bubbles. Shock Waves. 2015. V. 25. No. 4. P. 357–369.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА В ПОТОКАХ СПЕЦИАЛЬНОГО ВИДА

И. Ю. Крутова

Снежинский физико-технический институт НИЯУ «МИФИ», Снежинск

В работе приведены результаты теоретических исследований течений газа в потоках типа торнадо и тропических циклонов. Изложена предложенная С. П. Баутиным [1] схема возникновения и устойчивого функционирования таких потоков. Эта схема подтверждена как результатами аналитических исследований решений соответствующих начально-краевых задач для системы уравнений газовой динамики и для полной системы уравнений Навье–Стокса [1–4], так и проведенными физическими экспериментами по созданию торнадоподобных потоков [5, 6].

С помощью результатов представленных экспериментальных и теоретических исследований доказана ошибочность предложения не учитывать влияние вращения Земли вокруг своей оси для тех течений, для которых число Россби много больше единицы.

Численно и в аналитическом виде построены решения системы уравнений газовой динамики при учете действия силы Кориолиса, моделирующие течения воздуха как в придонных частях торнадо и тропического циклона (одномерные нестационарные и трехмерные стационарные), так и в целом в этих потоках (трехмерные нестационарные). Все эти решения

согласуются с данными натурных наблюдений за указанными природными воздушными течениями.

Анализ геометрических, скоростных и энергетических характеристик рассматриваемых течений показал следующее: разрушительный характер имеют те, наблюдаемые в природе торнадо, у которых кинетическая энергия окружного движения в придонной части больше кинетической энергии радиального движения воздуха в этой части потока.

В результате высказаны рекомендации [3-7] по раннему обнаружению торнадо и по уничтожению торнадо и тропических циклонов с разумными энергетическими затратами.

В результате проведенных исследований установлен естественнонаучный факт: для торнадо и для тропических циклонов математически строго доказано, что только вращение Земли вокруг своей оси есть причина возникновения закрутки в этих потоках и что кинетическая энергия вращательного движения воздуха в них берется только из кинетической энергии вращения Земли вокруг своей оси.

Список литературы

1. *Баутин С.П.* Торнадо и сила Кориолиса. – Новосибирск: Наука, 2008. – 80 с.
2. *Баутин С.П., Обухов А.Г.* Математическое моделирование разрушительных атмосферных вихрей. – Новосибирск: Наука, 2012. – 152 с.
3. *Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г., Баутин К.В.* Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты. – Новосибирск: Наука, 2013. – 216 с.
4. *Баутин С.П., Дерябин С.Л., Крутова И.Ю., Обухов А.Г.* Разрушительные атмосферные вихри и вращение Земли вокруг своей оси. – Екатеринбург: УрГУПС, 2017. – 336 с.
5. *Баутин К.В., Баутин С.П., Макаров В.Н.* Экспериментальное подтверждение возможности создания потока воздуха, закрученного силой Кориолиса // Вестник УрГУПС. – 2013. № 2(18). – С. 27-33.
6. *Баутин С.П., Макаров В.В.* Создание потока воздуха, закрученного силой Кориолиса при использовании трубы двухметрового диаметра // Вестник УрГУПС. – 2016. № 4 (32). – С. 39-45.
7. *Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г.* Проблема предсказания и уничтожения смерча // Технологии гражданской безопасности. 2016. – Том 13. № 1 (47). – С. 70-75.

3 Материалы и конструкции при динамическом воздействии

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОГИБА БАЛКИ, НАГРУЖЕННОЙ ВЗРЫВОМ ОТ МАССЫ ЗАРЯДА ВВ

*М. М. Бойко¹, Е. Ф. Грязнов¹, С. И. Климачков¹, В. Н. Охитин¹, И. А. Перевалов¹,
Р. М. Ахметшин², Г. В. Ерёмин², А. И. Чернов², В. С. Завьялов³*

¹МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва

²Научно-исследовательский институт криминалистики ФСБ, Москва

³Научно-исследовательский институт «Геодезия», Красноармейск

В практике взрывного дела возникает задача определения прогибов элементов конструкций находящихся в непосредственной близости от взорванного заряда взрывчатого вещества (ВВ). В качестве элемента конструкции будем рассматривать однопролетную балку, жестко закрепленную или свободно опертую по краям.

Эксперименты проводились со стальными балками круглого, квадратного и прямоугольного сечений по разному ориентированные к направлению распространения воздушной ударной волны, которые располагались на одинаковом расстоянии от оси заряда ВВ. Подрывались заряды насыпного тротила, имеющие массы 4,5 кг, 7 кг и 11 кг. Сравнение измеренных после проведения экспериментов прогибов однотипных балок позволило получить зависимость прогиба балки от массы взорванного заряда ВВ.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ РЯДА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Е. Ф. Грязнов¹, А. В. Уткин²

¹МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва

²Институт проблем химической физики, Черноголовка

Работа посвящена исследованию прочностных свойств ряда конструкционных сталей, испытывающих динамические нагрузки. Хорошо известно, что в условиях динамического нагружения характеристики прочности и пластичности металлических образцов существенно отличаются от своих статических значений [1]. Наиболее «жесткие» параметры динамических нагрузок реализуются в условиях взрывного нагружения и высокоскоростного удара, при которых в образцах формируются ударные волны с амплитудой давления до 40–50 ГПа, скорость деформации достигает величины $\varepsilon = 10^4 - 10^8 \text{ с}^{-1}$, при этом в нагружаемых образцах наблюдается разрушение откольного типа.

Определению характеристик откольной прочности материалов посвящено большое число известных работ. Наиболее систематические исследования в этом направлении проводились в ИПХФ РАН (г. Черноголовка) [2]. Основным методом определения откольной прочности материала является измерение профиля скорости свободной поверхности нагружаемого образца как функции времени $u(t)$. Упруго-пластическое поведение металлов при нагружении ударными волнами обычно исследуется на плоских образцах. Деформирование и разрушение пластин при этом происходит в условиях одноосной деформации. В осесимметричных

оболочках в отличие от пластин реализуется схема плоско-деформированного состояния. В настоящей работе для оценки влияния схемы напряженно-деформированного состояния на характеристики динамической прочности проведены сравнительные испытания оболочек и пластин, выполненных из одних и тех же сталей.

Для регистрации скорости свободной поверхности оболочек и пластин применялся метод лазерной интерферометрии. Для реализации метода регистрации $u(t)$ применительно к оболочкам разработаны специальные схемы взрывного нагружения. Цилиндрические и конические оболочки, а также плоские образцы выполнялись из ряда конструкционных сталей: сталь 20, сталь 45, сталь 45Х, 60, 60С2 и 110Г2С. В результате исследований определены характеристики их динамической прочности: значения динамических пределов текучести, упругости и динамической (откольной) прочности. Сравнение измеренных характеристик для плоской и осесимметричной схем нагружения показало, что схема нагружения практически не влияет на параметры динамической прочности рассмотренных сталей.

Список литературы

1. Физика взрыва / Под. ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, переработанное. – в 2т. Т.2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
2. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортвов В. Е. Экспериментальные профили ударных волн в конденсированных веществах. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И ОТКОЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ СХОЖДЕНИИ МЕДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

В. И. Зельдович¹, Н. Ю. Фролова¹, А. Э. Хейфец¹, И. В. Хомская¹, Е. Б. Смирнов²,
А. А. Дегтярёв², А. В. Коваль², Е. В. Шорохов²

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург

²Российский Федеральный ядерный центр–ВНИИТФ, Снежинск

Медные цилиндрические оболочки диаметром 24 и 48 мм с толщиной стенок 2 и 4 мм, соответственно, подвергались действию взрыва цилиндрического заряда ВВ, окружающего оболочку. Инициирование осуществляли с торца ВВ с помощью кольцевой системы инициирования. После инициирования вдоль поверхности оболочки распространялась скользящая детонационная волна, под действием которой происходило схождение оболочки к оси симметрии. Мощность заряда подбиралась таким образом, чтобы добиться полного или частичного схождения оболочки.

В частично схлопнувшихся оболочках диаметром 24 и 48 мм действие ударной волны вызвало откол, и оболочки разделились на два слоя. Наружный слой имел форму кольца и был слабо деформирован. Внутренний слой после формирования откола продолжал схождение к оси и подвергался значительной более высокой радиальной деформации. Металлографическое исследование показало, что откол начинался с образования микропор, которые объединялись в цепочки, затем образуя трещины. При дальнейшей деформации внутреннего слоя откольные микропоры и микротрещины залечиваются полностью или частично.

Оболочка диаметром 48 мм, при нагружении которой использовался более мощный заряд ВВ, полностью сошла в цилиндр диаметром 28–30 мм. В поперечном сечении цилиндра было видно, что образовались три кольцевые зоны, отличающиеся по структуре. Микроструктура в наружной и внутренней зонах сформировалась под действием высокоскоростной радиальной деформации. Деформация носила периодический характер: сильно деформированные участки чередовались со слабее деформированными. В средней зоне деформация была хаотической, турбулентной. Нарушение осевой симметрии деформации объясняется деформационным залечиванием откольных повреждений, возникших на стадии действия ударной волны.

Исследование макро- и микроструктуры нагруженных оболочек позволило выявить структурные механизмы нарушения строго радиального схождения, то есть потери устойчивости. В тонкостенной оболочке диаметром 24 мм внутреннее кольцо при схождении изгибается по всей толщине, то есть устойчивость теряется сразу и во всём объёме, и оболочка комкается. В толстостенных оболочках диаметром 48 мм устойчивость теряется независимо на внутренней и наружной поверхностях. На внутренней поверхности под действием деформации сжатия возникают периодически расположенные выступы, которые в дальнейшем соединяются, сходясь к центру оболочки. На внешней поверхности потеря устойчивости выражается в образовании выпуклостей и вмятин, то есть приводит к гофрированию.

Важно подчеркнуть, что отношение диаметра к толщине стенок во всех исследованных оболочках было одинаково, то есть различие деформационного поведения оболочек обусловлено различием абсолютных значений размеров.

Работа выполнена в рамках темы «Структура» (N АААА-А18-118020190116-6) при частичной поддержке Комплексной программы УрО РАН (проект 18-10-2-39).

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В АЛЮМИНИЕВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

*А. В. Коваль², И. Г. Ширинкина¹, А. Н. Петрова¹, И. Г. Бродова¹, Е. Б. Смирнов²,
Е. В. Шорохов², В. В. Астафьев¹, Т. И. Яблонских¹*

¹Институт физики металлов им. М.Н.Михеева УрО РАН, Екатеринбург

²Российский Федеральный ядерный центр–ВНИИТФ, Снежинск

Методами световой и сканирующей электронной микроскопии изучена эволюция структуры нагруженных методом скользящей детонации цилиндрических оболочек из алюминиевых сплавов АМг6(Al-Mg), Д16 (Al-Cu-Mg) и АМц (Al-Mn). Такое воздействие дает возможность определить поведение Al сплавов в экстремальных условиях, т.е. исследовать как процесс кумуляции собственного действия ударной волны, так и особенности высокоскоростной деформации. На основании изучения эволюции структуры сплавов, подверженных импульсным нагрузкам, можно прогнозировать пластические и прочностные свойства, а также выявить механизмы упрочнения материалов. В последние годы изучение структуры материалов и сплавов, подверженных ударно-волновым нагрузкам, все чаще стало применяться с целью их сравнения с результатами моделирования.

Целью данной работы является исследование влияния условий нагружения при схлопывании цилиндрических алюминиевых оболочек (массы ВВ, конструкции сборки и т. д.) на их структуру и свойства. В зависимости от состава сплава и интенсивности нагрузки были зафиксированы различные этапы схождения оболочек: образование отколов под действием

ударной волны разной амплитуды, сопровождающееся возникновением пор и трещин, появление зон локализации деформации, сформированных при высокоскоростном деформировании и отличающихся структурой, «залечивание» отколов и трещин, формирование центральной полости с окружающей её зоной плавления. В результате проведения многоплановых исследований структуры установлено, что чередование зон, величина центральной полости, степень схождения оболочек зависят от фазового состава сплавов и его исходного структурного состояния. Кроме того, информативные результаты были получены при использовании разной конструкции экспериментального узла (с отсутствием или наличием защитного кожуха). В первой постановке эксперимента в оболочках происходит хрупкое разрушение, образуется большое количество пор, трещин, зон локализованной деформации и оболочки разрушаются. Наиболее активно эти процессы протекают в оболочке из сплава АМГ6 [1]. Оболочки из сплавов Д16 и АМц менее подвержены разрушению, однако, полного инерционного схождения не наблюдается. Наличие корпуса предохраняет материалы от разрушения, и при сохранении узкой осевой дефектной зоны, оболочки из сплавов АМц и Д16 схлопываются в цилиндры. Обнаружено, что в результате высокоскоростной деформации материалы оболочек упрочняются, т.е. их твердость повышается на 150-200 МПа. Механизмом деформации алюминиевых сплавов как типичных представителей ГЦК материалов является дислокационное скольжение.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Структура», № АААА-А18-118020190116-6).

Список литературы

1. Бродова И. Г., Смирнов Е. Б., Ширинкина И. Г., Астафьев В. В., Яблонских Т. И., Коваль А. В., Дегтярев А. А., Шорохов Е. В. Изменение структуры и свойств цилиндрических оболочек из сплава АМГ6 при нагружении скользящими детонационными волнами Деформация и разрушение материалов. 2018. № 1. Р. 17-22.

НОВАЯ МОДЕЛЬ ЭРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ

В. Т. Кузавов

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

В существующей модели кавитационного воздействия разрушение материалов происходит за счет удара кумулятивных струй и ударных волн, образующихся при схлопывании кавитационных пузырьков вблизи исследуемой поверхности, т. е. разрушение, начинается с поверхности, контактирующей с жидкостью. Многими авторами показано, что не обнаружено никакой связи энергии деформации, предела текучести, предела прочности, твердости с эрозионной стойкостью [1, 2]. В работах [3, 4] представлены экспериментальные исследования, из результатов которых следует, что разрушение материалов происходит не от удара кумулятивных струй и ударных волн, а в результате возникновения новых, не известных до сих пор, спиральных структур, образующихся в исследуемых материалах. Образование спиральных структур и разрушение материалов начинается на небольшой глубине 20-100 мкм от свободной поверхности материалов.

В работе представлены экспериментальные результаты исследования эрозионного разрушения органического стекла, эбонита, алюминия, дюралюминия, свинца, стали и других

материалов, проведенные в рамках постановки вибрационной эрозии. В исследуемых материалах на небольшой глубине образуются не только спиральные структуры, но и цилиндрические каналы диаметром 10-20 микрон и другие, хаотично расположенные, на различных расстояниях от поверхности. В работе представлен новый механизм эрозионного разрушения, связанный с фокусировкой акустической энергии в спиральных структурах вдоль их оси. В результате фокусировки вдоль оси спиральных структур значительно повышаются давление и температура, что и приводит к разрушению материалов.

Список литературы

1. *Кнэпп Р.* Кавитация. М., Мир, 1974.
2. *Прис К.* Эрозия. М., Мир, 1982.
3. *Кузавов В. Т., Дегтярев В. В.* Новые постановки в исследовании кавитационной эрозии. // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2009. № 9.
4. *Кузавов В. Т.* Кавитационное разрушение материалов в спиральных структурах в постановке вибрационной эрозии. // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. № 6.

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ МЕДНЫХ ОБРАЗЦОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫМ СПОСОБОМ

С. И. Кривошеев, Ю. Э. Адамьян, Д. И. Алексеев, С. Г. Магазинов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

Магнитно-импульсный способ создания управляемых импульсов давления микросекундной длительности при исследовании импульсной прочности хрупких непроводящих материалов позволяет выявлять ряд общих закономерностей процесса разрушения [1, 2]. В работе [3] показана возможность использования этого способа и для исследования режимов высокоскоростного деформирования проводящих образцов без предварительной фазы сжатия, характерной для откольных экспериментов.

Численное моделирование магнитного поля в системе «проводящий образец-магнитно-импульсный драйвер» показало необходимость учета реальных размеров проводящих элементов системы и продемонстрировало несущественный для влияния на механические характеристики материала нагрев образца в зоне максимальных растягивающих напряжений.

Первая серия экспериментов на медных образцах, нагружаемых импульсным давлением с характерным временем периода $8 \mu\text{s}$ и амплитудами 90-450 МПа, внешний вид и эволюция зоны деформирования которых приведена на Рис. 1, показала, что модель Джонсона-Кука [4] для меди ОФНС применима для описания пластического течения при скоростях деформирования до $5 \cdot 10^3$ 1/с. При больших скоростях результаты моделирования существенно расходятся с экспериментом (Рис. 1 б, позиция 5).

Численные расчеты выполнены в средах Comsol Multiphysics и ANSYS autodyn на суперкомпьютере "Политехнический" - РСК Торнадо. Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 8-19-00230.

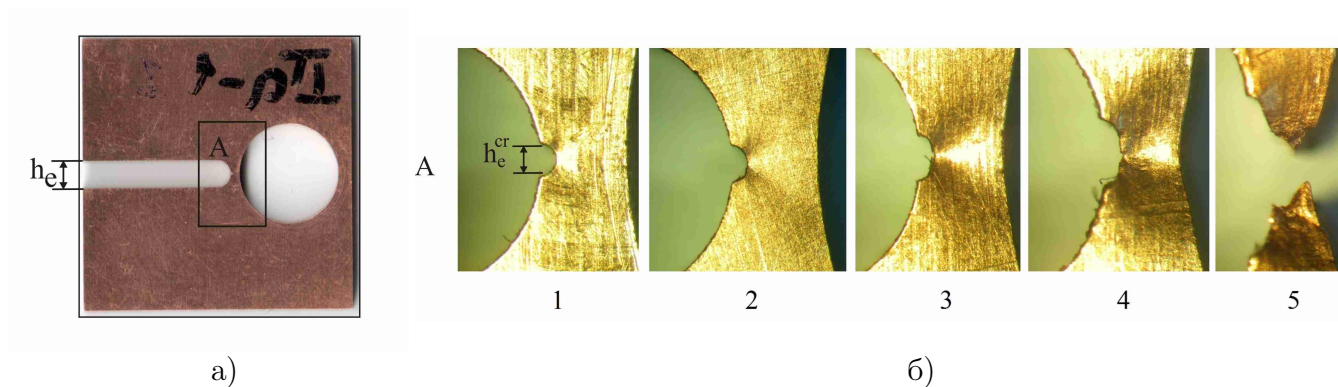


Рис. 1: Экспериментальные образцы: а) до нагружения; б) после нагружения с разной амплитудой давления ($P_5 > P_4 > P_3 > P_2 > P_1$).

Список литературы

1. *Krivosheev S. I.* Pulsed Magnetic Technique of Material Testing under Impulsive Loading. Technical Physics. 2005. 50(3). P. 334–40.
2. *Krivosheev S. I., Morozov N. F., Petrov Y. V., Shneerson G. A.* Problems of fracture of brittle bodies under pulse loading. Materials Science. 1996. 32(3). P. 286-95.
3. *Krivosheev S. I., Magazinov S. G., Alekseev D. I.* The peculiarities of the application of magnetic-pulse method for forming controlled pressure pulses to test metal samples. IEEE Trans. on Plasma Science. 2018. V. 46. Is. 4.
4. *Johnson G. R., Cook W. H.* Fracture Characteristics of Three Metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. J Eng. Frac. Mech. 1985. V. 21. N 1. P. 31-48.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ МЕДИ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

И. В. Хомская¹, С. В. Разоренов², Е. В. Шорохов³, Г. В. Гаркушин², Д. Н. Абдуллина¹

¹Институт физики металлов им. М.Н.Михеева УрО РАН, Екатеринбург

²Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

³Российский Федеральный ядерный центр–ВНИИТФ, Снежинск

Исследованы механические свойства меди, чистотой 99.8 мас. % с ультрамелкозернистой (УМЗ) и нанокристаллической (НК) структурой, полученной высокоскоростной деформацией методом динамического канально-углового прессования (ДКУП). Испытания образцов УМЗ меди проводили при ударном сжатии интенсивностью 5.6–6.8 ГПа и скоростью деформации $(0.9–2.0) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, а так же в условиях одноосного растяжения при скоростях деформации $10^{-3}–10^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Метод ДКУП, в основу которого положена схема квазистатического равноканального углового прессования (РКУП), позволяет осуществлять деформацию материалов со скоростями $10^4–10^5 \text{ с}^{-1}$, что на пять-шесть порядков превышает скорость деформации при РКУП, при

этом не требуется использование энергоемкого и малопроизводительного прессового оборудования. Отличительной особенностью метода ДКУП является комбинированное воздействие высокоскоростной деформации простого сдвига, ударно-волновой деформации сжатия и температуры. Измельчение структуры исследуемой меди при ДКУП на три порядка от 100 до 0,1 мкм происходит в результате закономерно повторяющихся процессов фрагментации, динамической полигонизации и динамической рекристаллизации.

Результаты измерения механических свойств меди при испытаниях на растяжение до и после ДКУП показали, что прочностные свойства меди с УМЗ и НК структурой в 1.2–1.4 раза превышают свойства меди в исходном крупнокристаллическом (КК) состоянии: предел прочности (σ_B) увеличивается с 312 МПа в КК состоянии до 396 и 440 МПа после ДКУП в один ($n = 1$) и четыре ($n = 4$) прохода, соответственно; предел текучести ($\sigma_{0,2}$) – с 304 МПа до 362 и 414 МПа. При этом относительное удлинение (δ) составляет 22 и 19 %, соответственно. Изучено влияние дисперсности кристаллической структуры меди, сформированной при предварительной деформации методом ДКУП, на динамический предел упругости (σ_{HEL}), динамический предел текучести (Y) и динамическую (откольную) прочность (σ_{sp}) меди. Обнаружено, что ДКУП, $n = 1$, приводящее к измельчению зерна меди от 100 до 0.5 мкм, в 6 раз увеличивает σ_{HEL} и Y , но практически не изменяет σ_{sp} , по сравнению исходным КК состоянием. Увеличение количества проходов ДКУП до 4, вызывая измельчение кристаллитов до 0.05–0.35 мкм, не приводит к дальнейшему изменению σ_{HEL} и Y , но увеличивает σ_{sp} меди в 1.4 раза по сравнению исходным КК состоянием. Отметим, что откольная прочность σ_{sp} меди с неравновесной, дефектной и смешанной УМЗ и НК структурой, полученной при ДКУП, составляет 2510 МПа, что значительно (~ 5.7) раза превышает предельное сопротивление до разрушения меди с аналогичной структурой в статике $\sigma_B = 440$ МПа.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура» № АААА-А18-118020190116-6, Программе фундаментальных исследований Президиума РАН №13 «Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии» и проекту № 18-10-2-39 Программы УрО РАН.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ В НАНОСТРУКТУРАХ В ПРОЦЕССЕ ОДНООСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

И. Ф. Головнев¹, Е. И. Головнева¹, М. С. Воронин², Э. Р. Прууэл²

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

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

Основной целью работы является исследование процесса релаксации напряжения в наноструктуре в процессе одноосной деформации с постоянной скоростью, и определение физических механизмов, вызывающих это явление. Для этого необходимо было использовать теоретические методы, описывающие движение большого числа атомов и, в то же время, опирающиеся на минимальное количество феноменологических предположений. Таким методом в настоящее время является метод молекулярной динамики (ММД). Использование модели, описывающей детализировано движение каждого атома приводит к необходимости рассматривать объекты с размерами в нано- и микромасштабном диапазоне.

В работе исследовались процессы релаксации напряжения в медном наностержне после одноосной деформации с постоянной скоростью. При этом важнейшим требованием к объекту было наличие в нем дефектов и высокая температура. В связи с этим вся задача разбивалась на три этапа.

На первом этапе строился идеальный кристалл меди в форме прямоугольного параллелепипеда с числом кристаллических ячеек $n_x = 50$, $n_y = n_z = 5$ вдоль соответствующих осей. Для формирования точечных дефектов, с помощью датчика случайных чисел, из идеального кристалла было удалено 5% объемных атомов. Далее с помощью метода искусственной вязкости, находились координаты и импульсы системы в состоянии глобального минимума потенциальной. После этого проводился разогрев системы до 500 К.

На втором этапе проводилось моделирование одноосного растяжения с постоянной скоростью. Для этого формировались два зажима. Левый неподвижный зажим формировался путем помещения атомов крайней левой атомной плоскости в бигармонический потенциал с неподвижным центром. Правый подвижный зажим строился путем помещения атомов крайней правой плоскости в бигармонический потенциал, минимум которого смещался с заданной скоростью. Для моделирования квазистатической внешней нагрузки скорость правого зажима нарастала линейно до заданного значения на интервале до 50 пс. При достижении определенного значения величины деформации растяжение прекращалось, атомам крайних плоскостей на зажимах присваивалась нулевая скорость. Более того, эти атомы исключались из уравнений движения. При этом взаимодействие этих атомов с атомами наностержня учитывалось.

На третьем этапе проводилось исследование динамики характеристик этой системы. Для исследования компонент тензора напряжения использовалась теорема вириала. Показано, что значение диагональной компоненты, соответствующей оси растяжения, намного больше, чем для соответствующих ортогональных осей, и именно эта компонента уменьшается (релаксирует) в течение 100 пс, выходя на постоянное значение. Исследование потенциальной энергии системы показало, что она уменьшается, т.е. система переходит в более глубокий потенциальный минимум, что вызывает увеличение температуры и уменьшение значений компонент тензора деформации.

Работа проведена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00468).

ПОЛУЧЕНИЕ ДИАГРАММ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЕЙ ГОПКИНСОНА

*А. Ю. Гармашев, А. А. Дегтярёв, С. М. Долгих, А. И. Клёнов, Д. В. Петров, Е. А. Петухов,
К. С. Сидоров, Е. Б. Смирнов, М. А. Шистириков, Д. Т. Юсупов*

РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск

В общей проблеме прочности материалов и конструкций при динамическом нагружении особое место занимает проблема прочности и разрушения при однократном интенсивном нагружении типа удара, взрыва и др. Высокие скорости деформации или нагружения, высокие уровни напряжений, большие пластические деформации в преимущественно адиабатическом процессе деформирования, специфическое поведение материала при таком нагружении обуславливают сложность экспериментальных исследований, составляющих основу для разработки физических и математических моделей деформирования и разрушения материалов, применяемых для расчета элементов конструкций. Надежность и возможность сравнения результатов исследований определяется, в первую очередь, научной обоснованностью постановки высокоскоростных испытаний материалов. Одним из методов имеющих ясные теоретические основы, высокую эффективность, универсальность и надёжность полученных результатов является метод составных стержней Гопкинсона (ССГ) или метод Кольского. Данный

метод позволяет исследовать динамические диаграммы сжатия и растяжения при скоростях деформации $\dot{\epsilon} = 10^2 - 10^4 \text{ с}^{-1}$.

В работе приведены результаты опытов по динамическому сжатию меди и сплава меди с оловом, с использованием метода ССГ. Определены диаграммы динамического сжатия. Получены параметры модели деформирования для меди и ее сплава в форме Джонсона–Кука, широко применяющейся в динамических расчетах.

4 Энергетические материалы, горение, детонация

ВЗРЫВЧАТОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ТЭНА И ГЕКСОГЕНА С ВКЛЮЧЕНИЯМИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, И. Ю. Лисков, Г. М. Белокуров, Н. В. Нелюбина

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово

В работе проведено сравнительное исследование взрывчатого разложения композитов на основе тэна и гексогена (RDX) с включениями ультрадисперсных частиц алюминия (100 нм) при воздействии импульсов излучения второй гармоники неодимового лазера (532 нм) с длительностью импульса 14 нс. При блокировании газодинамической разгрузки весом стеклянной пластины толщиной 2 мм инициирование взрыва тэна имеет минимальный порог $H_{cr} = 0.7$ Дж/см² при концентрации включений $n = 0.1$ масс.%. Инициирование композитов RDX-Al в этих условиях осуществить не удастся при плотностях энергии < 20 Дж/см². Поэтому эксперименты проводились при блокировании газодинамической разгрузки приложением давления к стеклянной пластине с помощью специального устройства. Измерены пороги взрывчатого разложения обоих композитов в зависимости от концентрации включений в образце n от 0.025 до 1 масс. %.

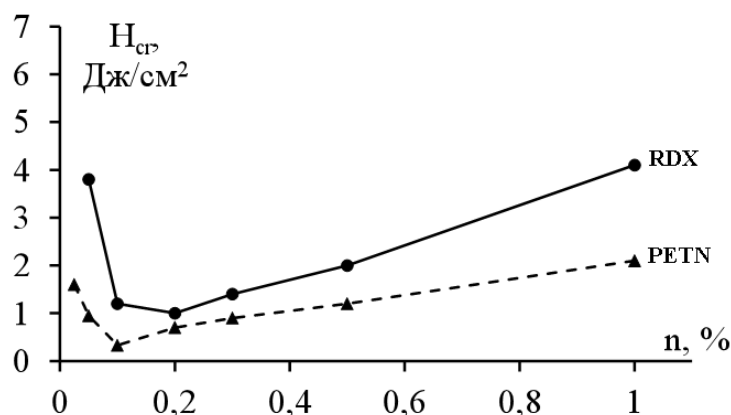


Рис. 1: Зависимость критической энергии инициирования взрыва (порог) от концентрации включений частиц алюминия в образце.

По данным рисунка установлены минимальные пороги инициирования взрыва: для RDX-Al $H_{cr}^{min} = 1$ Дж/см² при $n_{opt} = 0.2$ масс. %; для композита тэн-Аl $H_{cr}^{min} = 0.33$ Дж/см² при $n_{opt} = 0.1$ масс. %.

$$Q_v = (1 - R)H_{cr}^{min}k_{eff}$$

Показатели поглощения k_{eff} и коэффициенты диффузного отражения R измерены с помощью фотометрического шара по методике использованной в работе [1]. Расчеты Q_v показали, что в условиях эксперимента для инициирования композита RDX-Al минимальная Q_v примерно в два раза превышает Q_v для композита тэн-Аl. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-03-00421_a)

Список литературы

1. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Белокуров Г. М., Фурега Р. И. Исследование вкладов рассеяния и поглощения света включениями наночастиц алюминия в тэне. // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51. № 3. С. 70-75.

ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ТЕТРАНИТРАТЕ ПЕНТАЭРИТРИТА С ВКЛЮЧЕНИЯМИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, Г. М. Белокуров, Н. В. Нелюбина

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово

Изучение воздействия лазерного излучения на композитные энергетические материалы перспективно в плане разработки новых материалов для детонаторов на основе бризантных взрывчатых веществ и включений ультрадисперсных частиц металлов. Импульсное оптическое излучение, поглощаясь в образце, вызывает упругие возмущения. Регистрация и анализ этих возмущений позволяет восстанавливать разнообразные физические параметры исследуемой среды и их распределения [1]. Для измерения оптико-акустических (ОА) характеристик среды перспективно использование импульсного ОА метода с прямой регистрацией ОА сигнала с помощью пьезоакустического детектора [2].

В работе приведены результаты исследования оптико-акустических характеристик образцов тетранитрата пентаэритрита (тэна) с включениями ультрадисперсных частиц алюминия (100 нм) в зависимости от плотности энергии лазерных импульсов. Для возбуждения ОА сигнала использовалось излучение первой и второй гармоник неодимового лазера, работающего в режиме модулированной добротности с длительность импульса на половине амплитуды 14 нс. Образцы тэна с включениями алюминия изготавливались методом прессования. Использовались образцы диаметром 3 мм, толщиной 1 мм и плотностью $\rho = 1.73 \pm 0.03$ г/см³.

В работе получены зависимости амплитуды акустического сигнала и показателя экстинкции от плотности энергии лазерного излучения. Обнаружена нелинейная зависимость амплитуды оптико-акустического сигнала и показателя поглощения для смесового состава на основе тэна и 0,03 масс.% наночастиц алюминия (100 нм) от плотности энергии лазерного излучения.

Установлено, что при воздействии лазерных импульсов на образцы тэна с включениями Al при плотности энергии лазерного излучения $H > 0.1$ Дж/см² возрастает показатель экстинкции k_{eff} за счет поглощения света наночастицами Al. Амплитуда акустического сигнала возрастает экспоненциально с ростом k_{eff} . Мгновенное давление, пропорциональное амплитуде акустического сигнала линейно зависит от плотности поглощенной энергии. Оценочные расчеты показали, что при $H > 0.1$ Дж/см² в результате поглощения и нагрева включений Al во время импульса облучения нагревается прилегающая к частице сфера толщиной 40 нм вплоть до температуры испарения, что приводит к газификации слоя и образованию кратера на поверхности образца. При блокировании облучаемой поверхности стеклянной пластиной, уменьшающей газодинамическую разгрузку, в диапазоне используемых плотностей энергии лазерных импульсов происходит взрыв образца [3].

Список литературы

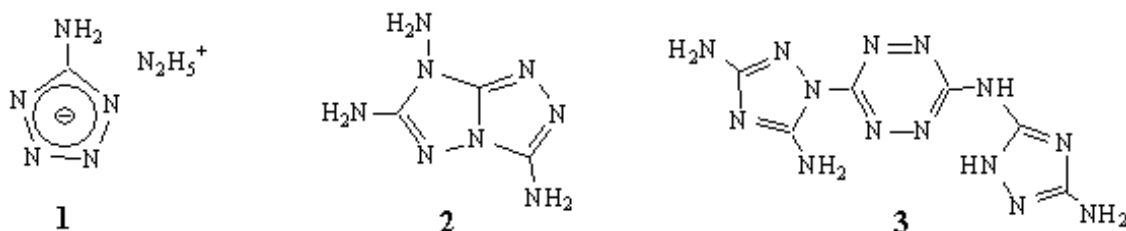
1. Егерев С. В., Лямшев Л. М., Пученков О. В. Лазерная динамическая оптоакустическая диагностика конденсированных сред. // УФН. 1990. Т. 160. № 9. С. 111–154.
2. Карабутов А. А., Пеливанов И. М., Подымова Н. Б., Скипетров С. Е. Измерение оптических характеристик рассеивающих сред лазерным оптико-акустическим методом. // Квантовая электроника. 1999. Т. 29. №3. С. 215 – 220.
3. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Звекоев А. А., Никитин А. П., Каленский А. В. Измерение оптических характеристик рассеивающих сред лазерным оптико-акустическим методом. // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52. № 6. С. 104.

О ДЕТОНАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРАХ НЕКОТОРЫХ БЕСКИСЛОРОДНЫХ ВВ

А. М. Астахов, Д. В. Антишин

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

Поиск новых ВВ, превосходящих по эффективности известные, в большинстве технически развитых стран ведётся непрерывно, каждый год синтезируются десятки новых соединений. Среди предлагаемых новых ВВ можно выделить бескислородные соединения, например [1-3]:



Основное тепловыделение в них реализуется не за счёт реакций окисления углерода и водорода кислородом, как в обычных ВВ типа тротила или гексогена, а за счёт высокой положительной энтальпии образования самого ВВ. Соединения **1-3** имеют низкую чувствительность к внешним воздействиям и по своей заявленной расчётной скорости детонации (таблица) значительно превосходят штатные ВВ.

Таблица. Энергетические и детонационные параметры соединений **1-3** по данным [1-3].

ВВ	ρ_0 , г/см ³	ΔH_f° , кДж/моль (кДж/кг)	Q_{expl}^v , кДж/кг	V_0 , л/кг	D , км/с	P_{CJ} , ГПа
1	1.547	373.2 (3186)	4295	959	9.52	29.6
2	1.725	446.7 (2898)	3559	813	9.39	29.7
3	1.87	717.5 (2597)	3088	739	8.55	26.9

Наши оценки (как с использованием уравнения состояния ВКВ, при разных наборах параметров, так и различными корреляционными методами) показывают существенно меньшие значения скорости детонации. Причины этого обсуждаются в докладе.

Следует отметить, что расчёты это лишь формальная оценка и, в действительности (из опыта работы с подобными веществами), соединения **1-3** могут оказаться вообще не способными поддерживать самораспространяющуюся детонацию, т.е. не будут являться ВВ. Собственно, поэтому они и не восприимчивы к внешним воздействиям.

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. Vol. 5. N 34. P. 92199228.
2. Klapötke T. M., Schmid P. C., Schnell S., Stierstorfer J. 3,6,7-Triamino[1,2,4]triazolo[4,3-b][1,2,4]triazole: A Nontoxic High Performance Energetic Building Block with Excellent Stability. *Chem. Eur. J.* 2015. Vol. 21. N 25. P. 92199228.
3. Shlomovich A., Pechersky T., Cohen A., Yan Q. L., Kosa M., Petrutik N., Tal N., Aizikovich A., Gozin M. Energetic Isomers of 1,2,4,5-Tetrazinebis(1,2,4-Triazoles) with Low Toxicity. *Dalton Transactions.* 2017. Vol. 46. N 18. P. 59946002.

ТЕРМОДИНАМИКА МОЛЕКУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ДИФРАКТОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Л. Х. Бадретдинова¹, О. В. Костицын², Е. Б. Смирнов², А. В. Станкевич², К. А. Тен³,
Б. П. Толочко⁴, В. Я. Базотов¹

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Казань

²Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск

³Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

⁴Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск

Основным математическим выражением всех принципов и идей термодинамики, являются два ее фундаментальных уравнения – так называемые уравнение состояния и уравнение процесса. Аппарат термодинамики дает возможность находить многочисленные количественные зависимости между различными свойствами вещества и предсказывать поведение вещества в самых различных условиях. Потребность в такой информации всегда была актуальной и постоянно увеличивается в связи с возрастающими возможностями расчетного моделирования.

В данной работе подход при построении уравнения состояния заключается в конструировании полуэмпирической модели, в которой общий вид функциональной зависимости термодинамического потенциала Гельмгольца устанавливается с привлечением теоретических представлений, а данные изотермического сжатия и изобарического нагрева и охлаждения используются для определения численных значений коэффициентов в этих зависимостях. Такой подход позволяет максимально использовать имеющуюся экспериментальную и расчетную информацию.

В работе объектом исследований является молекулярно-кристаллическое вещество. Описаны методики определения структуры образцов молекулярных кристаллов методом рентгеновской дифрактометрии, а так же получения изотермы и изобары исследуемого вещества.

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ НАНОТЕРМИТНОЙ КОМПОЗИЦИИ CuO/Al С ДОБАВКАМИ ТРИАЗОЛОВ

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

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск

Нанотермиты обладают рядом уникальных характеристик, таких как высокая скорость и низкие критические параметры горения (малая энергия иницирования, возможность протекания реакции в микронавесках и узких каналах). Данные характеристики позволяют рассматривать нанотермиты как перспективный материал для широкого спектра пиротехнических составов. Однако практическое применение нанотермитов в чистом виде ограничено рядом факторов: высокая чувствительность к электростатической искре и трению, плохая компактируемость, низкое газовыделение. Возможным способом решения данных проблем является введение в нанотермитную систему добавок различного типа. Ряд работ [1-6] показывает, что введение некоторых добавок способствует снижению чувствительности. Таким образом, изучение влияния добавок на свойства нанотермитных композиций является актуальной научной задачей.

Перспективным выглядит использование в качестве добавок триазолов и их производных. Согласно расчетам, добавки триазолов способствуют росту теплоты горения и газообразования. Схожую зависимость проявляют композиции с добавкой нитроцеллюлозы, которая согласно литературным данным [7] позволяет повысить значения удельного импульса нанотермитной композиции.

В данной работе представлены результаты исследования влияния добавок триазолов на свойства нанотермита CuO/Al .

Работа выполнена при использовании приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

Список литературы

1. *Bach A. et al* Modulation of the reactivity of a WO_3/Al energetic material with graphitized carbon black as additive. *Journal of Energetic Materials*. 2015. V. 33. № 4. P. 260-276.
2. *Foley T., Pacheco A., Malchi J., Yetter R.* Development of nanothermite composites with variable electrostatic discharge ignition thresholds. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2007. V 32. № 6. P. 434-434.
3. *Kelly D.G., Beland P., Brousseau P., Petre C-F.* Formation of Additive Containing Nanothermites and Modifications to their Friction Sensitivity. *Journal of Energetic Materials*. 2017. Vol. 35. № 3. P. 331-345.
4. *Gibot P. et al.* Safer and performing energetic materials based on polyaniline-doped nanocomposites. *Journal of Energetic Materials*. 2017. Vol. 35. № 2. P. 136-147.
5. *Gordeev V.V., Kazutin M.V., Kozыrev N.V.* Effect of additives on CuO/Al nanothermite properties. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 894. 012116.
6. *Гордеев В.В., Казутин М.В., Козырев Н.В., Мецлер Э.А.* Влияние добавок фторкаучука и углеродных нанотрубок на взрывчатые характеристики нанотермита CuO/Al . *Ползуновский вестник*. 2016. Т.1. № 4. с. 34-37.

7. *Staley C.S. et al. Fast-Impulse Nanothermite Solid-Propellant Miniaturized Thrusters. Journal of Propulsion and Power. 2013. Vol. 29. № 6. P. 1400-1409.*

ПРИМЕНЕНИЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ НАНОТЕРМИТА CuO/Al

В. В. Гордеев¹, М. В. Казутин¹, Н. В. Козырев¹, А. О. Кашикар², К. А. Тен²

¹*Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск*

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

Для смесей на основе наноразмерных материалов наблюдается значительное изменение характеристики относительно их микроразмерных аналогов. Например, термит - порошкообразная смесь металла и менее активного оксида металла, при использовании наноразмерных компонентов характеризуются высокими скоростями горения (до 2000 м/с), низкими критическими параметрами (малая энергия инициирования, способность горения в узких каналах 0.1 мм и менее). Так же в отличие от микроразмерных термитных смесей, нанотермиты имеют обратную зависимость скорости горения от плотности заряда, с увеличением плотности скорость горения падает. Подобные изменения свидетельствуют об изменении механизма горения термитной смеси при переходе компонентов в наноразмерное состояние. Однако в настоящий момент времени не имеется единого мнения по поводу механизма горения нанотермитов.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов изучения процесса горения нанотермита CuO/Al методом динамической рентгенографии синхротронным излучением. Данный метод применялся впервые для исследования горения нанотермитных систем. Движение волны горения сопровождается волной уплотнения, при этом установленная скорость распространения волны уплотнения сопоставима со скоростью горения измеренной другими методами. На основании полученных данных показано различие характера горения в зависимости от плотности заряда.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 17-33-50202).

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО И УДАРНО-ВОЛНОВОГО СЖАТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Е. В. Гусарова, А. А. Селезнев, В. Ю. Королев

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», Саров

В работе проведены молекулярно-динамические (МД) расчёты параметров изотермического и ударно-волнового сжатия PETN , находящегося в твердом (300 К) и жидком (500 К) агрегатных состояниях, а также монокристаллов α - и β - NMX , γ - и ε - CL-20 . Все расчеты проводились в условиях гидростатического сжатия с использованием МД кода LAMMPS на основе модифицированной версии межатомного силового поля ReaxFF-Ig.

В результате проведения МД моделирования изотермического сжатия рассматриваемых энергетических материалов были получены зависимости давления от степени сжатия при $T = 300$ К в широком интервале давлений: в том числе в диапазоне, недостижимом в условиях лабораторного эксперимента.

С целью изучения возможных структурных изменений в кристаллах энергетических материалов под воздействием ударно-волнового сжатия с использованием метода Гюгониостат было проведено МД моделирование ударно-волнового сжатия вышеуказанных энергетических материалов. На основе расчетных зависимостей давления от степени ударно-волнового сжатия были получены зависимости скорости ударной волны от массовой скорости. Проведён анализ зависимости ударных адиабат от начальной температуры и агрегатного состояния материала, полиморфной модификации монокристалла.

Методом МД моделирования впервые были рассчитаны коэффициент диффузии молекул жидкой фазы РЕТН и вязкость жидкого РЕТН при различных значениях температуры и давления (таблица). Рассчитанная вязкость растёт с ростом давления и уменьшается с ростом температуры, что согласуется с физическими представлениями о поведении вязкости жидкой фазы органических материалов.

Таблица. Зависимость коэффициента диффузии и вязкости РЕТН в жидком агрегатном состоянии от температуры и давления.

T , К	P , атм	$D \cdot 10^{14}$, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	η , Па·с
500	500	2.75	49.9
	900	1.77	77.6
	1300	0.45	305.1
650	500	23.2	7.7
	900	12.7	14.1
	1300	6.3	28.3
800	500	87.3	2.5
	900	62.7	3.5
	1300	24.4	9.0

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ УГЛЕРОДА РАЗНОЙ МОДИФИКАЦИИ В СТАТИКЕ

Д. А. Данилко, В. А. Востриков

Новосибирский государственный университет, Новосибирск

В работах [1, 2] показано, что высокая электропроводность при детонации взрывчатых веществ вида $C_a H_b N_c O_d$ определяется углеродом. Но состояние углерода при высоких термодинамических параметрах детонационной волны является предметом дискуссии. Проводимость углерода сильно зависит от его состояния и изменяется в широких пределах от диэлектрического (алмаз) до металлической проводимости (высокоориентированный углерод [3, 4]).

В сохраненных продуктах детонации конденсированных взрывчатых веществ найдены следующие фазовые состояния углерода: аморфная форма, графит, алмаз. При газовой детонации возможно образование и других форм – нанотрубок и фуллеренов. И каждая форма имеет свою проводимость. Актуально изучение сохраненных продуктов, содержащих углерод. Этому и посвящена данная работа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 18-03-00227).

Список литературы

1. *Satonkina N. P.* The dynamics of carbon nanostructures at detonation of condensed high explosives. *Journal of applied physics*. 2015. V. 118. P. 245901.
2. *Сатонкина Н. П.* Связь электропроводности при детонации конденсированных взрывчатых веществ с содержанием в них углерода. *ФГВ*. 2016. Т. 52, № 4. С. 129-133.
3. *Korobenko V. N. , Savvatimskiy A. I. and Cheret R.* Graphite Melting and Properties of Liquid Carbon. *International Journal of Thermophysics*. 1999. V. 20. Pp. 1247–1256.
4. *Kondratyev A. M., Korobenko V. N. and Rakhel A. D.* Experimental study of liquid carbon. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2016. V. 28. P. 265501.

МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ СМЕСЕЙ ОКИСЛИТЕЛЬ-ГОРЮЧЕЕ

А. Ю. Долгобородов^{1,2}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

²Институт химической физики РАН, Москва

В последнее время метод предварительной механохимической активации в энергонапряженных шаровых мельницах широко используется для повышения реакционной способности смесей окислитель-горючее [1-3]. Режимы активации подбираются таким образом, чтобы добиться максимально возможной однородности перемешивания реагентов без протекания химической реакции между ними. С помощью этого метода удается создать композиции с высокой поверхностью контакта реагентов. Кроме того, деформация исходных частиц в процессе активации приводит к образованию дефектов кристаллической структуры, что также увеличивает реакционную способность смесей. Разработанный метод позволяет получать механоактивированные энергетические композиты (МАЭК) состоящие из субмикронных или наноразмерных слоев окислитель-горючее, механически связанных между собой. Структура МАЭК при одинаковой дозе обработки зависит как от типа частиц исходного металла, так и окислителя. Если при активации смесей металл – "мягкий" фторопласт, получаемый композит представляет собой чешуеобразные частицы из фторопластовой матрицы с субмикронными фрагментами металлических частиц, то при активации металлов с кристаллическими окислителями (MoO_3 , CuO , NH_4ClO_4 и др.) структура в значительной степени зависит от формы исходных частиц металла. В данном докладе рассмотрены новые результаты по определению оптимальных условий активации различных смесей. Показано, что повышение реакционной способности составов при механообработке происходит преимущественно за счет разрушения и образования дефектов кристаллической структуры окислителей, что приводит к понижению температуры разложения окислителей и, соответственно, к более активному выделению свободного кислорода. Что касается металлов, то при оптимальных дозах активации по данным рентгенофазового анализа происходит небольшое уширение рентгеновских линий, что в свою очередь показывает незначительное увеличение дефектности кристаллической структуры металлов. Таким образом, при механоактивации смесей окислитель-горючее с одной стороны повышается удельная поверхность контакта реагентов, а с другой - происходит активация реакции разложения окислителей, что в целом позволяет увеличивать скорости энерговыделения при горении и детонации.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН «Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии» и проекта РФФИ № 16-29-01030.

Список литературы

1. Долгобородов А. Ю. Механоактивированные энергетические композиты окислительно-горючее. ФГВ. 2015. Т. 51. № 1. С. 102–116.
2. Streletskii A. N., Sivak M. V., Dolgoborodov A. Yu. Nature of high reactivity of metal/solid oxidizer nanocomposites prepared by mechanoactivation: a review. J. Mater. Sci. 2017. V. 52(20), P. 11810–11825.
3. Dreizin E. L., Schoenitz M. Mechanochemically prepared reactive and energetic materials: a review. J. Mater. Sci. 2017. V. 52(20), P. 11789–11809.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ДЕТОНАЦИИ НА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ

С. В. Дудин, В. А. Сосиков, С. И. Торунов

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

Исследование цилиндрического сжатия различных материалов, а также воздействие сильных сходящихся ударных волн представляет интерес как с точки зрения практического использования этих явлений, так и для решения некоторых задач теоретической физики. К таким задачам можно отнести 1) формирования и развитие цилиндрической детонационной волны при многоточечном инициировании, 2) цилиндрическое сжатие лайнеров, 3) развитие неоднородностей в жидкостях при воздействии на них сходящихся цилиндрических ударных волн, 4) эжектирование мелкодисперсных частиц и плазмы с цилиндрической поверхности при выходе на нее сильной ударной волны, 5) инициирование термоядерного синтеза при сжатии плазмы в магнитном поле. Полномасштабные эксперименты, где формируется цилиндрическая детонационная волна, являются достаточно дорогими и трудоемкими.

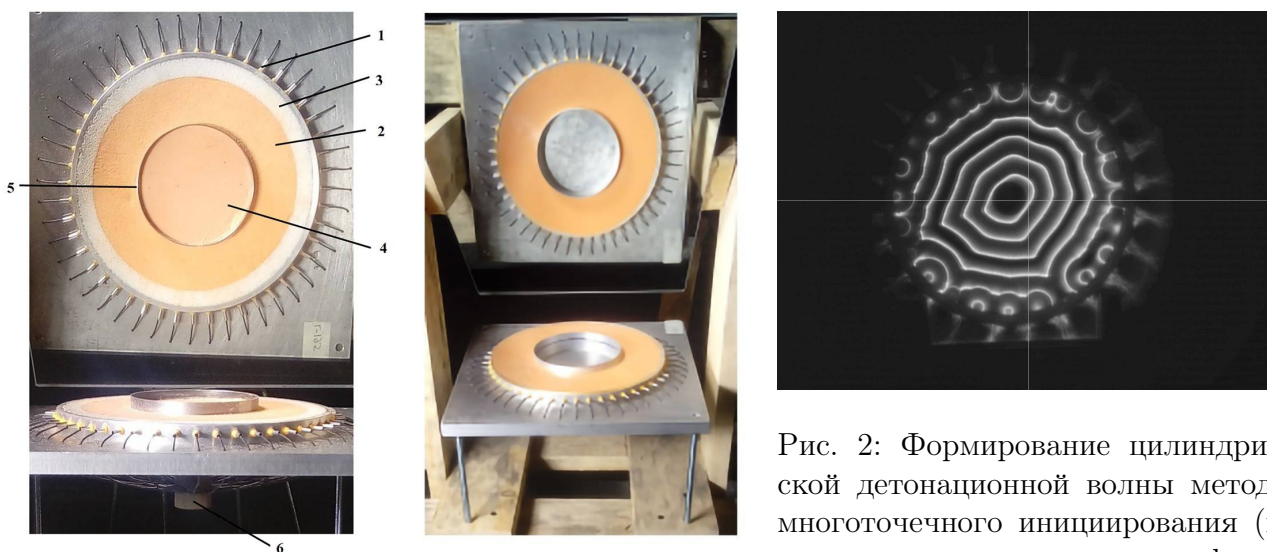


Рис. 1: Взрывная лабораторная установка.

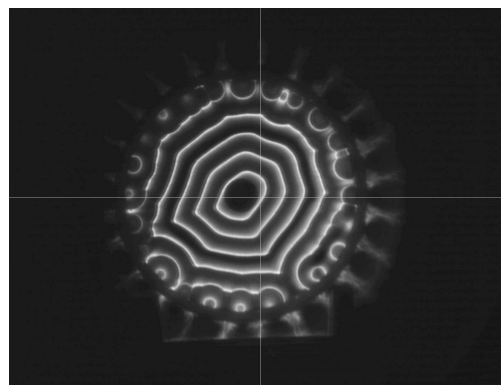


Рис. 2: Формирование цилиндрической детонационной волны методом многоточечного инициирования (последовательные положения фронта волны с интервалом 2 мкс).

В ИПХФ РАН разработана и широко применяется компактная лабораторная установка, в которой цилиндрическая детонационная волна формируется методом многоточечного инициирования. Вес используемого заряда менее 1 кг в тротиловом эквиваленте, что позволяет использовать это устройство во взрывном куполе. Внешний вид устройства представлен на рисунке 1. Слева показан фронтальный вид устройства, справа – вид сбоку. Для формирования цилиндрической детонационной волны используется от 12 до 48 точек инициирования. Одним из методов, который используется для контроля работы устройства и визуализации процессов цилиндрического сжатия, является высокоскоростная съемка с использованием отечественной камеры «Наногейт». Пример результатов съемки представлен на рисунке 2.

Работа выполнена на оборудовании Московского регионального взрывного центра коллективного пользования (ЦКПВ) при поддержке РФФИ (проект 16-29-01002).

ДЕТОНАЦИЯ ВВ, СОДЕРЖАЩИХ НАНОРАЗМЕРНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

А. П. Ершов, А. О. Кашкаров, Э. Р. Прууэл, И. А. Рубцов, Н. П. Сатонкина, К. А. Тен

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

В последние годы растет интерес к наноструктурированным энергетическим материалам. Уменьшение размера зерна до сотен и десятков нанометров может радикально повлиять на такие свойства вещества, как чувствительность, устойчивость, критические условия детонации. Однако до сих пор не проведено достаточно полных исследований детонационных характеристик взрывчатых наноматериалов, таких как профили параметров за фронтом детонации.

Перспективную возможность модификации свойств ВВ открывает новый материал – углеродные нанотрубки. В данной работе исследовалась структура волн детонации взрывчатого материала на основе гексогена с добавкой 0.5% одностенных углеродных нанотрубок, представленных фирмой OCSIAL, г. Новосибирск.

Наноструктурированный взрывчатый материал получен методом перекристаллизации. В водную взвесь нанотрубок добавлялся раствор гексогена в ацетоне и производилось перемешивание. Нанотрубки служили центрами конденсации для гексогена при его осаждении. После сушки получался взрывчатый материал, обладающий заметной электрической проводимостью (около $0,1 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ после прессования).

Измерения профилей электропроводности по методике [1] показали, что в модифицированном нанотрубками ВВ плотности $1,8 \text{ г/см}^3$ длительность пика высокой проводимости за фронтом детонации значительно увеличилась (150 нс), тогда как в чистом гексогене она составляет около 50 нс.

Проведены также электромагнитные измерения массовой скорости на границе раздела прессованного ВВ и инертного окна из оргстекла. Как для чистого гексогена, так и для композиции, содержащей нанотрубки, вначале наблюдается химпик с превышением ожидаемых уровней Чепмена–Жуге, т.е. работает модель Зельдовича–Неймана–Деринга. Затем происходит постепенный спад скорости, что отражает эволюцию состояния ВВ в ходе реакции. Профили заметно различаются, причем для состава с нанотрубками спад скорости происходит заметно раньше. Следовательно, по данным электромагнитной диагностики, реакция в составе, содержащем нанотрубки, идет быстрее.

Ускорение реакции гексогена в присутствии нанотрубок может происходить благодаря изменению микроструктуры материала, который содержит больше дефектов, пор и других

зародышей потенциальных горячих точек, а возможно, и благодаря увеличению теплопроводности, что способствует разгоранию очагов реакции. С другой стороны, уширение профиля электропроводности в составе с нанотрубками можно объяснить их замедленным выгоранием или разрушением после завершения основной реакции гексогена. Таким образом, электромагнитные измерения демонстрируют ход энерговыделения в основной реакции, тогда как измерения электропроводности чувствительны к ее завершающей стадии, практически не дающей вклад в энерговыделение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 18-03-00441).

Список литературы

1. Ершов А. П., Сатонкина Н. П. Исследование зон реакции в неоднородных взрывчатых веществах методом электропроводности. ФГВ. 2009. Т. 45. № 2. С. 109–115.

РЕЖИМЫ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ НИЗКОЙ НАЧАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ

А. П. Ершов, И. А. Рубцов

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

Проведены электромагнитные измерения массовой скорости при выходе детонационной волны на границу раздела порошкового взрывчатого вещества и инертного окна из оргстекла. Магнитное поле (0.15 Тл) создавалось импульсной одноразовой катушкой Гельмгольца. Пробный датчик из алюминиевой фольги толщиной 9 мкм размещался в плоскости окна и защищался тонким (десятки мкм) эпоксидным слоем. Исследовались тэн, гексоген и октоген при плотности, близкой к естественной насыпной. Имея в виду необходимость регистрации не только усредненного профиля скорости, но и возможных флуктуаций на масштабах порядка размера зерна ВВ, отлажена методика измерений с малыми датчиками, при длине рабочего плеча около 1 мм. Временное разрешение методики составляет около 5 нс.

Для лучшего понимания процесса измерения численно моделировались отклики датчиков массовой скорости и давления при измерениях в сильно неоднородной среде. Моделирование проведено в акустической постановке. На средний уровень сигнала накладываются колебания, обусловленные неоднородностью, которые могут значительно исказить результат. В частности, датчики малого размера (точечные) реагируют не только на условия в ближайшей окрестности, но и на возмущения, приходящие с течением времени со все более далеких периферийных участков границы раздела. Для надежных измерений размер датчика должен заметно превышать размер неоднородности среды. В случае работы с порошками на датчике должно уместиться по крайней мере несколько частиц. При этом условии электромагнитный метод и оптическая методика VISAR дают близкие профили массовой скорости с незначительными паразитными осцилляциями.

В мелкодисперсных порошках, при размере частиц в десятки мкм, всегда наблюдался химпик. При штатной дисперсности (сотни мкм) в большинстве опытов также получены профили с четким химпиком, однако в части записей химпик не выделялся на фоне резких пульсаций сигнала, что может быть проявлением неклассического механизма распространения волны (взрывное горение по А.Я. Апинову). Наблюдение различных режимов при одних и тех же

условиях эксперимента в предыдущем исследовании методом VISAR [1] и в данной работе указывает на возможность «гибридного» характера распространения детонации во взрывчатых веществах насыпной плотности, при котором на разных участках фронта волны ведущим фактором распространения может быть либо ударная волна, либо конвективные процессы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-03-01039).

Список литературы

1. *Ershov A. P., Kashkarov A. O., Prueel E. R., Satonkina N. P., Sil'vestrov V. V., Yunoshev A. S., Plastinin A. V.* Nonideal detonation regimes in low density explosives. *J. Appl. Phys.* 2016. V. 119. № 7. 075903. doi: 10.1063/1.4942359

ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ 1,3,5-ТРИАМИНО-2,4,6-ТРИНИТРОБЕНЗОЛА (ТАТБ) - БЕЗОПАСНОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

А. С. Дубков, В. М. Звёздкин

Федеральное казённое предприятие «Бийский олеумный завод», Бийск

В статье описаны преимущества 1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензола (ТАТБ) - низкочувствительного взрывчатого вещества в плане безопасности при использовании и хранении. Представлены данные о промышленном внедрении «безхлорной» технологии получения ТАТБ и создании опытно-промышленной установки синтеза ТАТБ в условиях ФКП «БОЗ».

Современные условия жизни требуют всё более эффективных и узкоспециализированных высокоэнергетических веществ. При этом помимо взрывчатых характеристик не теряют актуальности и свойства специальных продуктов, обеспечивающие безопасность техники и персонала при работе с ними. Так при авариях или несчастных случаях на производстве, испытаниях или в боевых условиях, разрушения и ущерб, вызванные детонацией изделий, в конечном счёте, будут несравнимо выше средств, затраченных на производство их взрывчатых компонентов. В настоящее время назрела необходимость в создании технологии производства высокоэнергетических веществ, детонация которых абсолютно исключена как при любых случайных, так и при ситуациях непреодолимой силы, а возможна только при использовании специальных устройств. Одним из таких соединений является ТАТБ.

ТАТБ обладает бризантными и фугасными характеристиками на уровне гексогена, скоростью детонации 8 км/сек, разлагается при температуре выше 350 °С и при этом абсолютно не чувствительно к механическим воздействиям. Данному веществу не страшен и огонь - оно не просто не детонирует, а даже не горит, а тлеет как угли. Не чувствительно ТАТБ и к прострелам из любого вида стрелкового оружия. Не стоит забывать и о химической стабильности данного продукта - инертного к агрессивным средам и большинству реагентов. Срок годности ТАТБ практически не ограничен.

На ФКП «БОЗ» апробирована и внедрена в производство технология промышленного синтеза ТАТБ, позволяющая получать продукт уникального качества с заданным гранулометрическим составом и, соответственно, требуемыми характеристиками по чувствительности в зависимости от области его применения.

Данный продукт успешно прошёл все необходимые испытания в лабораторных условиях и в качестве компонента в изделиях различного назначения.

Список литературы

1. В. Ф. Жилин, В. Л. Збарский, Н. В. Малочувствительные взрывчатые вещества. РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2008. - 168 с.

УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ИНЕРТНЫХ И ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕД

А. Н. Зубарева^{1,2}, А. В. Уткин¹, В. В. Лавров¹

¹Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

²Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Исследования ударно-волновых процессов в пористых материалах позволяет значительно расширить область реализуемых в экспериментах термодинамических состояний. Однако в общем случае описание процесса эволюции импульсов сжатия в таких средах возможно лишь с привлечением достаточно сложных физических моделей, учитывающих неоднородность течения, неоднородность температурных полей, кинетику схлопывания пор и т.д. Ситуация ещё более усложняется, когда для получения пористого материала с заданными свойствами используются микросферы, что часто имеет место на практике. Применение модели Зельдовича возможно лишь при достаточно высоких давлениях, тогда как наибольший практический интерес представляет область относительно низких давлений, менее 1 ГПа. В этих условиях существенное влияние на структуру импульса сжатия и характер его распространения оказывает кинетика схлопывания пор. В частности, это может приводить к проявлению материалом аномальных свойств, которые выражаются в «расплывании» фронта импульса сжатия по мере его распространения. Ещё более кардинальным образом меняется поведение пористых химически-активных сред. Ярким примером являются эмульсионные взрывчатые вещества. Если исходная эмульсия на основе нитрата аммония ведет себя как инертная среда до давления порядка 10 ГПа, то добавка микросфер позволяет получить чувствительное к ударно-волновому воздействию взрывчатое вещество.

Целью данной работы является экспериментальное исследование ударно-волновых свойств и структуры фронта импульсов сжатия пористых сред, включая область низких, порядка 0.1 ГПа, давлений. В качестве объектов исследования рассмотрены инертные и химически-активные пористые материалы: силиконовый каучук и эмульсия на основе нитрата аммония, пористость в которых создавалась добавлением стеклянных микросфер. Пористость в образцах создавалась при помощи наполнителя из стеклянных микросфер.

Волновые профили скорости измерялись лазерным доплеровским интерферометром VISAR.

В результате проведенных экспериментов показано, что пористый силиконовый каучук является материалом с низким значением порога схлопывания микросфер, зависящим от их концентрации и размера. При этом, кинетика схлопывания пор влияет на динамику распространения импульсов сжатия, вызывая появление эффектов, типичных для сред с аномальной сжимаемостью. Подтверждено отмеченное ранее авторами отсутствие химических превращений в эмульсионной матрице при давлениях в несколько раз превышающих параметры детонации в эмульсионном ВВ, полученном при добавлении микросфер.

Работа выполнена при финансовой поддержке Исследовательского центра ФАИР-Россия.

ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ МЕТОДОМ ХЕЛЬДА ИМПУЛЬСА В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ВЗРЫВА

А. Е. Курепин

Акционерное общество «Государственный научно-исследовательский институт машиностроения им. В.В. Бахирева», Дзержинск Нижегородской обл.

Если заряд ВВ размещается на поверхности твердой недеформируемой преграды, то при расчетах величин давления, импульса и длительности фазы сжатия ударной волны (УВ) в воздухе в дальней зоне взрыва величину массы заряда увеличивают в два раза. В случае, если преграда может деформироваться и часть энергии взрыва будет поглощаться материалом преграды, коэффициент увеличения массы будет меньше 2 [1].

Однако, при определении фугасного действия на объект, расположенный в ближней зоне взрыва, коэффициенты увеличения массы, определенные для дальней зоны взрыва, не соответствуют получаемым результатам экспериментов. Причиной этого является возникающая из-за наличия вблизи заряда преграды неоднородность структуры потоков продуктов взрыва в ближней зоне, которая значительно отличается от структуры течения за УВ в дальней зоне.

В ряде работ, выполненных в течение последних лет, показано, что величина импульса, измеряемого по методу Хельда в ближней зоне взрыва, в случае наличия расположенной вблизи заряда ВВ дополнительной прочной преграды, может увеличиться в 3-4 раза [2, 3].

В настоящей работе рассмотрены результаты экспериментального определения влияния прочности преграды на изменение величины импульса, получаемого датчиками Хельда при взрыве расположенных на преграде находящихся в стальных корпусах цилиндрических зарядов из флегматизированного октогена.

Список литературы

1. Физика взрыва, монография, под редакцией Л.П. Орленко, изд. 3-е, переработанное, В 2 т. Т. 1 – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 823 с.
2. А. Е. Курепин, Е. Н. Зайцев, С. Ю. Кулакова и др. Определение величины импульса, действующего на внешнее оборудование цели в ближней зоне взрыва // В сборнике докладов IX научной конференции Волжского регионального центра РАН. В 2 томах.- Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. -Т.1. – С. 186-192.
3. Петюков А. В., Пырьев В. А., Орленко Л. П. Особенности действия фугасных зарядов в ближней зоне по бронеплитам // Оборонная техника, 2016. № 8-9. С. 117-119.

НОВЫЕ НАНОУГЛЕРОДНЫЕ ЭНЕРГОЕМКИЕ МАТЕРИАЛЫ

З. А. Мансуров^{1,2}, М. К. Атаманов^{1,2}

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²Институт проблем горения, г. Алматы, Казахстан

Металл-органические каркасные структуры (metal-organic frameworks (MOFs)) – привлекают большой интерес как потенциальные энергетические материалы, из-за их высокой плотности и высокой теплоты детонации. Пористая кристаллическая структура привлекает внимание из-за ее высоких показателей удельной поверхности и возможности изменения их

физико-химических свойств путем внедрения металлических центров. Разработан метод синтеза многослойных графен оксидных структур (graphene oxide frameworks (GOFs)) из растительных отходов таких как рисовая шелуха или скорлупа грецкого ореха.

Использование графен оксидных структур в качестве энергоемких добавок может стать одним из перспективных способов для повышения эффективности высокоэнергетических ракетных топлив. Определено, что графен оксидные структуры с высокой удельной поверхностью и развитыми текстурными характеристиками при добавке от 1 % являются эффективными инициаторами термического разложения нитрата гидроксиламмония и способны снижать температуру начала разложения вещества на значение в диапазоне от 40 до 100 °С, а также снижать энергию активации с 110 ± 5 кДж моль до 85 ± 9 кДж/моль. Установлено, что графен оксидные структуры в зависимости от концентрации 1-5 % от общей массы, промотируют скорость конвективного горения нитрата гидроксиламмония. Установлено увеличение линейной скорости горения нитрата гидроксиламмония до 400 мм/с (начальное давление 6 МПа), и способность снижения необходимого значения начального давления до 1 МПа для обеспечения условий самоподдерживаемого горения при добавке GOFs на основе рисовой шелухи (1% от общей массы).

На основе экспериментальных результатов выявлено, что добавка 1% GOFs влияет на скорость испарения капель воды и метанола в виде сокращения времени испарения капель для обеих жидкости на 30 % и уменьшение температуры кипения жидкостей. На основе этих данных возможно разработать способ очистки сточных вод от различных токсичных солей металлов, которые выпадают в осадок.

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ВВ - ПУТЬ К ПРЕЦИЗИОННЫМ ВЗРЫВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

А. Л. Михайлов

Российский Федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

Описаны основы развитого во ВНИИЭФ метода термовакuumной переработки индивидуальных бризантных ВВ. Метод обеспечивает получение ВВ в наноструктурированном состоянии, с измененной кристаллической структурой. При сублимации ВВ и последующем его осаждении из разреженной газовой фазы формируются многочисленные субмикронные дефекты (дислокации, межзеренные границы), играющие роль «горячих точек» при ударно-волновом воздействии.

Результатом является существенное - до 5-10 раз - снижение критического диаметра детонации и других геометрических пределов распространения детонации. При этом чувствительность ВВ к удару и трению, а также к тепловым воздействиям, остается на исходном уровне. Приобретая способность детонировать в необычно малых количествах, переработанное по термовакuumной технологии наноструктурированное ВВ не становится более опасным в обращении.

Рассмотрены стадии формирования осажденного слоя наноструктурированного ВВ и особенности его структуры.

Приведены примеры практических применений наноструктурированных ВВ для создания малогабаритных взрывных устройств самого различного назначения. Для этих целей наноструктурированные ВВ могут быть применены как в индивидуальном виде, так и в составе смесевых ВВ. Использование в составе смесевых, в частности, пластичных ВВ, также дает возможность существенно снизить критический диаметр детонации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СМЕСИ ТЕТРАНИТРОМЕТАН/МЕТАНОЛ

В. М. Мочалова¹, А. В. Уткин¹, В. Е. Рыкова²

¹*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка*

²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва*

Протекание химической реакции в ударно сжатом гомогенном взрывчатом веществе имеет тепловую природу, и начальная скорость разложения является сильной функцией энергии активации, которая для жидких ВВ может меняться в широком диапазоне посредством добавления в них различных разбавителей. В данной работе с использованием лазерного интерферометра VISAR проведено экспериментальное исследование структуры зоны реакции в детонационных волнах для тетранитрометана (ТНМ) и смеси ТНМ/метанол. Интерес к этому жидкому ВВ обусловлен, в частности, тем, что в ТНМ детонационный фронт устойчив, тогда как добавление более 40% метанола приводит к появлению осцилляций на фронте волны.

Показано, что в ТНМ непосредственно за ударным скачком наблюдается резкий спад скорости в течении первых 50 нс с формированием ярко выраженного химпика. Последующий переход от зоны реакции к волне разгрузки является настолько плавным, что однозначно определить положение точки Чепмена-Жуге сложно. Полученные результаты для смеси ТНМ/метанол качественно отличаются от результатов для чистого ТНМ. Наиболее ярко это различие проявляется в амплитуде химпика, которая в смеси существенно меньше, чем в ТНМ, в результате чего градиент скорости в зоне реакции близок к величине в волне разгрузки. Вероятно, снижение амплитуды химпика обусловлено увеличением начальной скорости реакции, в результате чего ВВ начинает реагировать непосредственно во фронте ударной волны. Косвенным подтверждением этого является размытие ударного скачка вблизи максимума скорости почти на десять наносекунд, что не наблюдалось в ТНМ. С целью определения времени реакции в смеси ТНМ/М проведены опыты с оболочками различных диаметров, длины и материала. Установлено, что при увеличении концентрации метанола от 0 до 26% время реакции смеси ТНМ/М действительно уменьшается от 150-200 нс до 25 нс. Дальнейшее увеличение концентрации метанола приводит к увеличению времени реакции.

Увеличение концентрации метанола влияет не только на время реакции, но и на устойчивость детонационного фронта. Профили массовой скорости как в ТНМ, так и в смеси ТНМ/М при концентрации метанола менее 35 %, являются гладкими, что свидетельствует об устойчивости детонационного фронта. Однако при концентрации метанола выше 40 % детонационный фронт теряет устойчивость, что проявляется в осцилляциях на профилях скорости.

Показано также, что детонационные свойства смеси ТНМ/М немонотонно меняются с увеличением концентрации метанола. Расчетная зависимость скорости детонации D от концентрации метанола достигает максимума (7.1 км/с) примерно при 20% разбавителя. В эксперименте D смеси возрастает от 6.4 до 6.8 км/с при концентрации метанола 0-15 %, затем в интервале концентраций 15-22% значение скорости примерно постоянно. При дальнейшем увеличении концентрации метанола скорость вновь начинает расти и достигает максимума при 26-28% метанола. При концентрации метанола 29 % и выше значение скорости детонации уменьшается вплоть до критической концентрации метанола, выше которой смесь не детонирует, равной примерно 60 %.

Работа выполнена по теме Государственного задания № 0089-2014-0017.

МЕЗОСКОПИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЕ ПЕНТАЭРИТРИТТЕТРАНИТРАТА

С. А. Мурзов^{1,2,3}, А. Н. Паршиков^{2,4}, В. В. Жаховский^{2,3}, С. А. Дьячков^{1,2,3,4},
М. С. Егорова^{2,3}, А. В. Янцкин^{1,2}

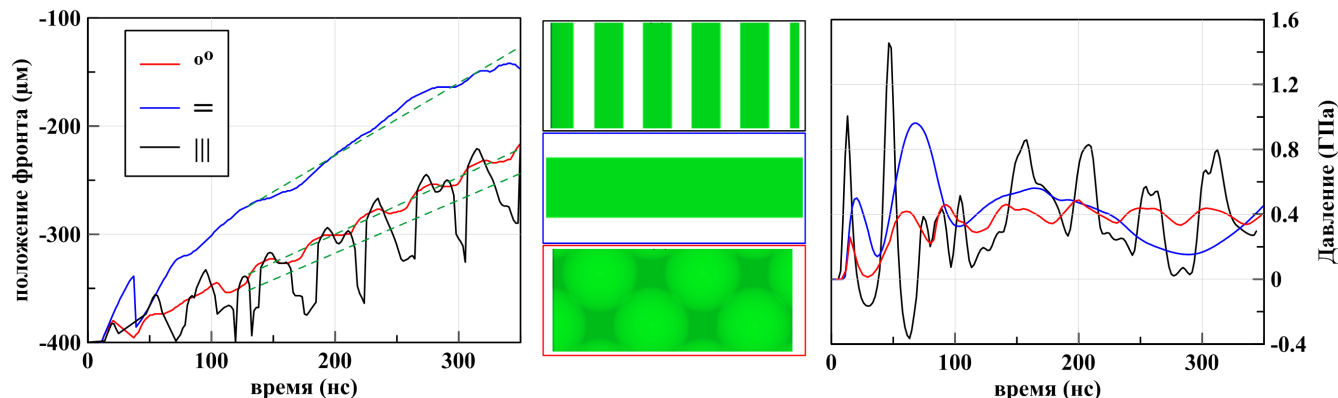
¹Московский физико-технический институт (государственный университет),
Москва

²Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва

³Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау Российской академии наук, Черноголовка

⁴Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва

Численное моделирование ударного нагружения мезоскопической структуры конденсированного взрывчатого вещества основывается на описании структуры пор и методе сглаженных частиц. Данный метод решает задачу распада разрыва на контакте сглаженных частиц. Моделирование распространения ударной волны в пентаэритриттетранитрате (ТЭНе) согласовывается с акустическими свойствами ТЭНа с разной пористостью при сопоставлении с экспериментальными данными. Проводится анализ соотношений между скоростью ударной волны в ТЭНе и длиной пробега до детонации при различной пористости. Экспериментальное наблюдение независимости времени до инициирования от пористости при разных скоростях ударного воздействия интерпретируется, как слабая зависимость между акустическими свойствами ТЭНа и процессов разложения взрывчатого вещества. Моделирование сопоставляется с задачей перехода ударной волны в детонацию. Рассмотрено влияние разрешения мезоскопической структуры в моделировании на задачи перехода ударной волны в детонацию. Диаграммы координата-время ($x-t$) и состояние за ударной волной усредненное в слое вблизи жесткой стенки толщиной $50 \mu\text{m}$ при массовой скорости удара 400 м/с и плотности 1 г/см^3 в случае разных структур пор. Разница в наклонах $x-t$ диаграмм дает скорости распространения от 891 м/с при поперечном (\perp) до 1070 м/с при продольном (\parallel) расположении пластин. Скорость ударной волны в образце со сферическими порами 926 м/с внутри обозначенного промежутка и дает наименьшие осцилляции давления за фронтом ударной волны.



Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского Научного Фонда (РНФ № 14-19-01599).

COMBUSTION OF 1,1-DIAMINO-2,2-DINITROETHYLENE (DADNE) INITIATED BY AN ELECTRON BEAM

I. Y. Liskov¹, A. P. Nikitin¹, N. N. Ilyakova², A. S. Zverev²

¹ *Institute of Coal Chemistry and Material Science, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo*

² *Kemerovo State University, Kemerovo*

In the present work, the combustion of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene (DADNE) in a vacuum was ignited by ignition with a pulsed electron beam together with a metallic plasma. The luminescence kinetics corresponding to the DADNE polycrystal burning regime is obtained. The emission spectra of the sample at the maximum of the kinetics are measured.

The regimes of combustion and explosion were studied of 1,1-diamino-2,2-dinitroethene DADNE ($\varnothing 3 \times 1$ mm) with a density of ~ 1.7 g/cm³ under the impact of an electron beam accelerator (0.24 MeV, 20 ns, 25 J/cm²). The explosion mode of the samples was obtained, having a threshold of 19.5 J/cm².

At energy densities less than thresholds, the development of the reaction is possible, at which the structural elements (the crystal holder, the vacuum diode of the accelerator) do not break down, but the sample is absent in the crystal holder, its residues on the walls of the vacuum chamber are not observed. In this connection, it was concluded that combustion of DADNE samples is observed under the experimental conditions.

To register the luminescence processes, the high-speed spectrophotochronograph CX-1A [1, 2] was used in the decomposition of samples. In fig. 1 shows the luminescence kinetics in the explosion and combustion modes normalized to the maximum values.

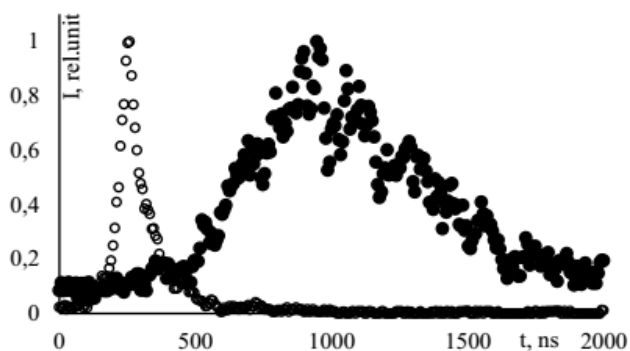


Figure 1: The kinetics of the luminescence of the sample, which occurs when pulsed e-beam ignition of DADNE (●) and explosive decomposition (○).

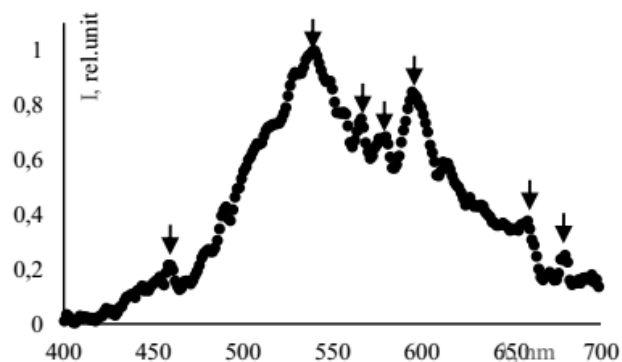


Figure 2: The spectrum of the luminescence of the surface of a sample arising during a pulsed e-beam ignition of the DADNE corresponding to the maximum of the kinetics.

As can be seen from the given typical kinetics (fig. 1), the duration of the combustion process at half-height is 900 ± 70 ns, which is three times the duration of the explosive decomposition. In fig. 2 the luminescence spectra recorded in the combustion regime are presented, on which 7 maxima can be clearly distinguished. Analysis of the emission spectra will be given in the report.

The reported study was funded by RFBR according to the research project 18-33-00349 mol.a.

References

1. *Shvayko V. N., Krechetov A. G., Aduev B. P., Gudilin A. V., Serov S. A.* Experimental setup for studying the spectral-kinetic and space-dynamic characteristics of explosive decomposition of energetic materials *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 2005. Т. 50. № 6. С. 732-735.
2. *B. P. Aduev, G. M. Belokurov, S. S. Grechin, I. Yu. Liskov, A. V. Kalenskii, A. A. Zvekov* IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. - 2015. – 81. 1. 012038 doi:10.1088/1757-899X/81/1/012038

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКИ НА ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ТЭНА

Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, И. Ю. Лисков, Г. М. Белокуров

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово

Экспериментально измерены зависимости порогов взрывчатого разложения H_{cr} для тетранитрата пентаэритрита (тэна) с включениями наночастиц алюминия (100 нм) в диапазоне концентраций 0.05 – 1 масс.% при воздействии первой гармоники импульсного неодимового лазера (1064 нм, 14 нс), а также амплитуды оптико-акустического сигнала в зависимости от концентрации включений в образце при фиксированной плотности энергии лазерного излучения. Исследовано три случая: 1. облучаемая поверхность образца покрывается стеклянной пластиной, препятствуя газодинамической разгрузке своим весом; 2. к стеклянной пластине приложено внешнее давление $\geq 10^7$ Па, блокирующее газодинамическую разгрузку образца, 3. внешнее давление непосредственно прикладывалось к облучаемой поверхности образца, как и в [1, 2]. В работе дано объяснение наблюдаемым эффектам, подкрепленное модельными теоретическими расчетами.

Ухудшение условий газодинамической разгрузки приводит к уменьшению H_{cr} . Энерговыделение вблизи поверхности образца приводит к развитию ударной волны и взрыву образца. Если давление на стеклянную пластину отсутствует, то $H_{cr} = 0.7$ Дж/см².

При приложении внешнего давления на стеклянную пластину без передачи давления на образец газодинамическая нагрузка блокируется и понижается критическая энергия инициирования взрыва до $H_{cr} = 0.3$ Дж/см². При этом в обоих случаях минимальные H_{cr} наблюдаются при одинаковых концентрациях включений алюминия – 0.2% по массе. При этом минимум на кривой H_{cr} слабо выражен. Рост H_{cr} при увеличении $n > 0.2\%$ по массе незначителен и связан с шероховатостью соприкосаемых поверхностей стекло - медный держатель. В случае идеального контакта H_{cr} с ростом концентрации включений $n > 0.2\%$ по массе должно оставаться постоянным.

При приложении внешнего давления к стеклянной пластине с передачей давления образцу, в качестве одного из возможных объяснений наблюдаемых закономерностей можно предположить следующую модель. При непосредственном давлении на образец газодинамическая разгрузка блокируется, кроме того в образцах генерируются дефекты, в окрестностях которых возможно инициирование химической реакции. При внешнем давлении ≈ 300 МПа число таких дефектов может превышать число центров, образуемых включениями алюминия, и H_{cr} обуславливается в основном собственными реакционными дефектами. Такими центрами могут быть дислокации или границы зерен.

Минимально достигнутый порог в эксперименте при внешнем давлении $P = 288$ МПа $H_{cr} = 50$ мДж/см², что всего лишь на порядок выше порогов для инициирующих ВВ.

Список литературы

1. *Карабанов Ю. Ф., Афанасьев Г. Т., Боболев В. К.* Зажигание твердых вторичных ВВ коротким импульсом ОКГ. в сб. Горение конденсированных систем. Черноголовка. 1977. С. 5-8.
2. *Skripin A. S., Ovchinnikov V. A., Tsipilev V. P., Yakovlev A. N.* Dependence of explosion initiation threshold of PETN with absorptive additives on the uniform compression pressure of the sample. Изв. Вузов. Физика. 2012. № 11/3. С. 217-219.

СКОРОСТИ УДАРНЫХ ВОЛН В ВОЗДУХЕ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ ВЗРЫВА ТЭНА И КОМПОЗИТОВ ТЭНА С ВКЛЮЧЕНИЯМИ АЛЮМИНИЯ

Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, И. Ю. Лисков, Г. М. Белокуров

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово

В настоящей работе приведены результаты измерений порогов взрывчатого разложения и скоростей ударных волн в воздухе при лазерном инициировании (1064 нм, 14 нс) тэна с включениями наночастиц алюминия (100 нм) в диапазоне концентраций 0.025 – 1 масс.%. при плотностях тонких ($d = 1$ мм) образцов $\rho = 1.1, 1.3, 1.5$ и 1.7 г/см³, а также образцов тэна без включений Al при плотности образцов $\rho = 1.1$ г/см³.

Получены оптимальные концентрации (n_{opt}) наночастиц алюминия, при которых достигаются минимальные пороги взрывчатого разложения (H_{cr}^{min}), скорости ударных волн (V) и времена начала выхода ударной волны из образца (τ) на оптимальных концентрациях для каждой плотности образцов (ρ). Результаты представлены в таблице.

ρ , г/см ³	1.1	1.3	1.5	1.7
n_{opt} , масс.%	0.5	0.4	0.3	0.2
τ , нс	125	160	280	450
H_{cr}^{min} , Дж/см ²	3.2	2.1	1	0.7
V , км/с (при $H = 40$ Дж/см ²)	4.5	3.8	3.3	2.3

Показано, что при лазерном инициировании взрыва образцов тэн-Al толщиной 1 мм с увеличением плотности образцов минимальный порог взрыва H_{cr}^{min} и скорости головной ударной волны V в воздухе уменьшаются при оптимальной концентрации включений n_{opt} . При этом времена начала выхода ударной волны из образца (τ) увеличиваются. Показано, что уменьшение концентрации включений алюминия ниже оптимальной увеличивает порог инициирования и время начала выхода ударной волны из образца. В условиях эксперимента данной работы взрыв можно классифицировать, как низкоскоростную детонацию [1]. Включения ультрадисперсного алюминия в тэн увеличивает скорость ударной волны в воздухе относительно образцов тэна без включений на $\sim 20\%$.

Для практических применений необходимо проведение исследований, которые позволят найти разумный компромисс, при котором пороги лазерного инициирования при уменьшении плотности образцов будут достаточно малы относительно образцов без включений, а скорости ударных волн относительно высоки.

Список литературы

1. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. Т1. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2004.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАТЕЛЬНОГО И ИМПУЛЬСНОГО ДЕЙСТВИЯ ЗАРЯДОВ ВВ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ВЗРЫВА

А. В. Петюков¹, В. А. Пырьев²

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва

²Научно-исследовательский институт «Геодезия», Красноармейск

Целью данной работы является исследование методами численного моделирования действия зарядов взрывчатого вещества (ВВ) в ближней зоне взрыва. В качестве расчетной схемы была выбрана следующая схема: заряд ВВ (цилиндрической или сферической формы) располагался на некотором расстоянии от абсолютно жесткой, плоской преграды. В качестве уравнения состояния продуктов детонации (ПД) ВВ использовалось уравнение JWL [1]. В работе варьировались расстояние от заряда до преграды, размер абсолютно жесткой стенки, тип ВВ и его форма, а также наличие или отсутствие воздуха между ВВ и преградой.

Перед тем как перейти к основным расчетам была проведена валидация численной методики. Для этого были проведены эксперименты по метанию стальных дисков взрывом заряда ВВ. Безоболочечный, цилиндрический заряд ВВ устанавливался на легкой пенопластовой подставке высотой 1 – 1,5 метра. На расстоянии от торца заряда, равном диаметру заряда, соосно устанавливался стальной диск. Иницирование заряда производилось детонатором ЭД-8Ж в центре противоположного торца. Скорость метаемого диска регистрировалась двумя независимыми способами: по видеосъемке высокоскоростной камерой Phantom V611 с частотой съемки 16000 – 39000 кадр/с и с помощью доплеровской радиолокационной станции BR 3502 с частотой излучения 35 ГГц. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных скоростей метания показали, что их отличие составляет не более 3%.

По результатам проведенной серии основных расчетов были получены распределения удельного импульса по длине преграды в зависимости от условий подрыва (в воздухе или в вакууме), типа и формы заряда ВВ. Показано, что форма заряда ВВ оказывает свое влияние на расстоянии, равном до 20 приведенным радиусам заряда. Из результатов расчетов также следует, что в случае подрыва сферического заряда ВВ на небольших расстояниях до преграды (до одного диаметра заряда) в зоне, равной до 7 – 8 приведенным радиусам заряда, основное влияние на удельный импульс, воспринятый преградой, оказывает удар ПД. Влиянием воздуха в этом случае можно пренебречь. В зоне, равной 10 – 25 радиусам заряда, наблюдается совместное действие удара ПД и воздушной ударной волны. На расстояниях, превышающих 25 радиусов заряда, основной вклад в удельный импульс дает воздушная ударная волна. Влиянием удара ПД о преграду в этом случае можно пренебречь.

Полученные результаты могут быть использованы для корректировки существующих инженерных методик расчета действия взрыва в ближней зоне на элементы конструкций.

Список литературы

1. Физика взрыва / С. Г. Андреев [и др.]. Т. 1. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ СМЕСЕВЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

В. А. Порязов, А. Ю. Крайнов

Томский государственный университет, Томск

Представлены модели горения металлизированных твердых топлив с ведущими процессами в газовой фазе. Целью работы являлось определение скорости горения конденсированного высокоэнергетического материала с добавлением порошка алюминия в зависимости от размера и массовой концентрации частиц, а также условий в газовой фазе над поверхностью горения. Постановки задач описаны в [1-3].

Разработана физико-математическая модель горения смесового твердого топлива на основе перхлората аммония с добавлением порошка алюминия. Математическая постановка задачи состоит из уравнений сохранения энергии газа и частиц алюминия, сохранения массы газа, массы частиц и числа частиц алюминия, выгорания реагента в газовой фазе, движения частиц в потоке газа, уравнения состояния газа. Решена задача расчета стационарной скорости смесового твердого топлива на основе перхлората аммония с добавлением частиц алюминия, в зависимости от давления над поверхностью горения и дисперсностью порошка алюминия.

Разработана физико-математическая модель горения металлизированного твердого топлива в поле массовых сил. Установлены зависимости скорости горения от давления над поверхностью горения, дисперсности порошка металла в составе топлива и величины и направленности поля массовых сил.

Разработана физико-математическая модель нестационарного горения металлизированного смесового твердого топлива. Модель основана на уравнениях переноса тепла и разложения окислителя в твердой фазе; двухфазной, двухскоростной, двухтемпературной модели реагирующего течения над поверхностью твердого топлива продуктов его разложения и газификации. На поверхности топлива выполнены условия сохранения потоков энергии и массы компонентов. Результаты расчета зависимости стационарной скорости горения смесового твердого топлива на основе ПХА с добавлением порошка алюминия от давления хорошо согласуются экспериментальным данным зависимости скорости от давления. Представлены результаты расчета нестационарной скорости горения при увеличении и уменьшении давления. Изучены переходные режимы в зависимости от скорости и величины изменения давления, в том числе погасание при резком сбросе давления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 9.9625.2017/8.9.

Список литературы

1. Порязов В. А., Крайнов А. Ю. Расчет скорости горения металлизированного смесового твердого топлива с учетом распределения агломератов по размерам // ИФЖ. 2016, Т. 89, № 3. С. 568-574.
2. Порязов В. А., Крайнов А. Ю. Математическая модель и расчет нестационарной скорости горения металлизированных твердых ракетных топлив // Вестн Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2017. № 50. С. 99-111.
3. Порязов В. А., Крайнов А. Ю. Горение твердого топлива с добавлением порошка алюминия при перегрузках // Вестн Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2017. № 45. С. 95-103.

ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ФАКТОРОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕТН

Т. Л. Празян, Ю. Н. Журавлев

Кемеровский государственный университет, Кемерово

Взрывчатые вещества являются органическими молекулярными кристаллами, образованными стабильными молекулами, которые фиксируются в элементарной ячейке преимущественно за счет водородной связи и дальнедействующих дисперсионных сил. Такие кристаллы за счет структуры и особенностей образования химической связи будут чувствительны к внешним воздействиям: температура и давление.

Первопринципные расчеты в настоящей работе выполнены с помощью пакета программ CRYSTAL'17 [1], методом линейной комбинации атомных орбиталей и теорией функционала электронной плотности в градиентном приближении с обменным и корреляционным функционалом в варианте PBE [2]. Силы межмолекулярного взаимодействия учтены с помощью схемы Гримма DFT-D3 (BJ) [3]. Дискретизация обратного пространства проводилась на сетке $4 \times 4 \times 4$ к-точек. Сходимость по энергии была не хуже 10^{-8} эВ.

Точные расчеты механических свойств энергетических материалов представляют большой интерес и играют важную роль в понимании физико-химической природы их свойств. В частности, возможность определения полных наборов упругих постоянных второго порядка C_{ij} позволяет изучить микроскопическую природу кристаллической системы и может быть использована для понимания и объяснения чувствительности и реакционной способности материалов при их механическом напряжении.

В работе получены ab initio результаты для структуры, упругих постоянных и механических характеристик тетрагонального кристалла РЕТН ($C_5H_8N_4O_{12}$). Наряду с известными факторами чувствительности, такими как чувствительность к удару, к электрической искре и трению, коэффициент упаковки, электростатический потенциал и кислородный баланс [4], предложено рассматривать скорость распространения продольных ν_p (м/с) и поперечных ν_s (м/с) волн, а также твердость по Виккерсу H_V (ГПа). Эти факторы чувствительности определяют стабильность кристаллов взрывчатых веществ при их механическом нагружении.

Скорости звука как параметры, характеризующие степень анизотропности кристалла, позволяют более точно исследовать процессы разрушения кристалла, что для взрывчатых веществ приводит к разрывам связей и цепочке детонации. Схожим показателем является твердость по Виккерсу, направленная на определение степени сопротивляемости поверхности материала к царапинам и точечным нагрузкам.

Список литературы

1. Dovesi R., Erba A., Orlando R., Zicovich-Wilson C.M., Civalleri B., Maschio L., Rérat M., Casassa S., Baima J., Salustro S., Kirtman B. Quantum-mechanical condensed matter simulations with CRYSTAL. WIREs Comput Mol Sci. 2018. N 1360.
2. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple. Phys. Rev. Lett. 1996. V 77. P. 3865–3868.
3. S. Grimme S., Ehrlich L., Goerigk J. Effect of the damping function in dispersion corrected density functional theory. Comput. Chem. 2011. V 32. P. 1456-1465.

4. Празян Т. Л., Журавлев Ю. Н. Компьютерное моделирование структуры, электронных и детонационных свойств энергетических материалов. Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53. № 6. С. 110-115.

МЕХАНИЗМ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В НАНОПОРИСТОМ КРЕМНИИ В КОНТАКТЕ С ОКИСЛИТЕЛЕМ

Д. М. Самосват, О. П. Чикалова-Лузина, Г. Г. Зегря

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

В настоящее время известно, что пористый кремний является перспективным материалом в микро-, нано- и оптоэлектронике. Его уникальные свойства легли в основу его использования для диагностики и лечения широкого спектра заболеваний [1]. В работе [2] рассматриваются более 15 научно-практических направлений, в которых с успехом может быть применён нанопористый кремний. В настоящей работе рассматривается применение нанопористого кремния с точки зрения его энергетических свойств. Дело в том, что он может гореть в чистом виде и, при этом, в сочетании с определенными окислителями у него появляется способность к взрыву (детонации) [3].

В настоящей работе впервые предложен механизм взрывчатых превращений основанный на резонансном переносе энергии от нанопористого кремния к молекуле окислителя и протекающий в несколько стадий. В этом процессе происходит поэтапное возбуждение колебательно-вращательных степеней свободы в молекуле окислителя посредством кулоновского взаимодействия. Такой процесс оказывается возможным благодаря ангармоническому характеру взаимодействия между атомами.

В настоящей работе предложено микроскопическое описание такого процесса в системе пористый кремний – молекула кислорода. При этом, кислород находится в своей жидкой форме. В качестве модельного потенциала взаимодействия между атомами принят потенциал Морзе [4]. Основной вклад в процесс переноса энергии дают диполь-дипольные члены с возбуждением дополнительно вращательных переходов и диполь-квадрупольные члены с переходами при одинаковом орбитальном квантовом числе. За счет ангармонического характера взаимодействия между атомами возможно возбуждение переходов с главным колебательным квантовым числом, отличающимся более чем на 1, что невозможно в случае гармонического осциллятора.

Вычислена скорость процесса переноса энергии для возбуждения через колебательно-вращательные переходы. Исследована дальнейшая кинетика цепной реакции и определены условия при которых осуществляется взрывной процесс.

Список литературы

1. Ксенофонтова О. И., Васин А. В., Егоров В. В., Бобыль А. В., Солдатенков Ф. Ю., Теруков Е. И., Улин В. П., Улин Н. В., Киселев О. И. Пористый кремний и его применение в биологии и медицине. ЖТФ. 2014. Т. 84. №1. С. 67 – 78.
2. Зимин С. П. Пористый кремний – материал с новыми свойствами. Соросовский образовательный журнал. 2004. Т. 8, №1. С. 101 – 107.

3. Михайлов Ю. М., Гаранин В. А., Ганин Ю. В., Гончаров Т. К., Ганина Л. В., Зегря Г. Г. Чувствительность к удару энергетических систем на основе нанопористого кремния и окислителя: влияние содержания водорода и удельной поверхности. Известия Академии Наук. Серия химическая. 2016. № 8. С. 2400 – 2404.
4. Флогге З. Задачи по квантовой механике Т.1 М. Мир. 1974

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПРИ ДЕТОНАЦИИ БЕНЗОТРИФУРОКСАНА

Н. П. Сатонкина^{1,2}, А. П. Ершов^{1,2}

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

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

В сохранных продуктах детонации конденсированных взрывчатых веществ с отрицательным кислородным балансом найдены разные модификации углерода – графит, алмаз, аморфная форма. Средний размер отдельных частиц порядка единиц нм. Для бензотрифуроксана (ВТФ) характерен значительно больший размер частиц – десятки нм (рис. 1). Так как ранее наблюдалась корреляция электропроводности и содержания углерода, можно было ожидать, что при детонации ВТФ распределение электропроводности будет сильно отличаться от распределения при детонации других взрывчатых веществ (ВВ). ВТФ имеет и другую особенность – в его составе нет водорода, поэтому в продуктах детонации ВВ нет воды, диссоциацией которой на ионы ранее объяснялась электропроводность за фронтом детонации [1].

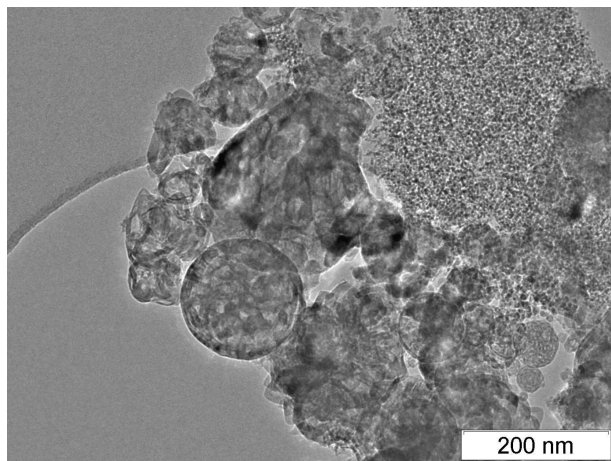


Рис. 1: Сохранные продукты ВТФ.

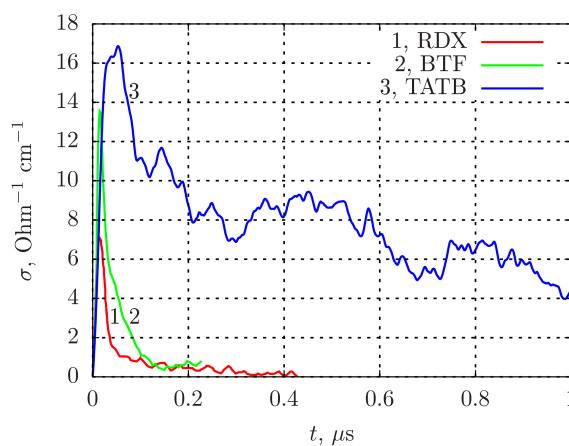


Рис. 2: Распределение электропроводности.

Разработанным ранее методом высокого разрешения получено распределение электропроводности при детонации БТФ. На рис. 2 приведены данные по электропроводности при детонации гексогена (RDX), ТАТВ и ВТФ. Для всех профилей характерно резко неоднородное распределение, максимальное значение коррелирует с содержанием углерода в молекуле, значение в волне Тейлора для ВТФ и гексогена совпадают.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 18-03-00227 и 18-03-00441).

Список литературы

1. Антпенко А. Г., Дремлин А. Н., Якушев В. В. О зоне электропроводности при детонации конденсированных взрывчатых веществ // Доклады АН СССР, 1975. Т. 225, №5. С. 1086-1088.

ПРИРОДА ВЫСОКОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Н. П. Сатонкина^{1,2}

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

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Исследование электрических свойств конденсированных ВВ насчитывает более 60 лет. В последние годы получены данные по распределению электропроводности при детонации для широкого спектра ВВ вида $C_aH_bO_cN_d$ при разной начальной плотности. Это позволило систематизировать экспериментальные данные и подтвердить высказанное ранее предположение [1-3] об определяющей роли углерода. Дальнейшее развитие гипотезы показало однозначную зависимость электропроводности от массовой доли углерода как для максимального значения, так и в предположении, что в точке Чепмена-Жуге величина электропроводности определяется конденсированным углеродом [4, 5]. А длительность области высокой электропроводности близка к длительности области химических реакций для максимальных плотностей. Это означает корреляцию электропроводности с химиком и позволяет диагностировать состояние вещества.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 18-03-00227).

Список литературы

1. Hayes B. On electrical conductivity in detonation products. In Proceedings of the 4th (International) Symposium on Detonation, White Oak, Maryland, ACR-126 (1965), pp. 595-601.
2. Gilev S. D. and Trubachev A. M. Study of physical-chemical transformations in detonation wave by the electric conductivity method. In Proceedings of the 12th international Detonation Symposium, San Diego, CA (2002), Paper No. ONR333-05-2, pp. 240-248.
3. Гилев. С. Д. Диссертация на соискание степени д.ф.-м.н., Институт гидродинамики, Новосибирск, 2009.
4. Satonkina N.P. The dynamics of carbon nanostructures at detonation of condensed high explosives. Journal of Applied Physics, Vol. 118 (2015), p. 245901.
5. Сатонкина Н.П. Связь электропроводности при детонации конденсированных взрывчатых веществ с содержанием в них углерода. ФГВ. 2016. Т. 52, № 4. С. 129-133.

УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПРЕССОВАННОГО НИТРАТА ГИДРАЗИНА

А. В. Уткин, В. М. Мочалова

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

Использование нитрат гидразина (hydrazine nitrate, HN) $N_2H_4 \cdot HNO_3$ в качестве одного из компонентов ракетных топлив требует определение его детонационных параметров, чувствительности к ударно-волновому воздействию, критических условий детонации. Имеющиеся данные о детонационных свойствах HN крайне ограничены и не всегда однозначны, что наиболее ярко проявляется на характере зависимости скорости детонации D от начальной плотности ρ_0 . Отсутствует также информация об ударной сжимаемости, величине критического диаметра, структуре детонационных волн. Экспериментальному исследованию этих вопросов посвящена данная работа. Опыты были проведены с образцами, приготовленными в результате прессования порошка HN со средним размером частиц около 0.5 мм. Регистрация волновых профилей осуществлялась лазерным интерферометром VISAR.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что детонационные свойства HN имеют ряд особенностей. Прежде всего, следует отметить низкую ударно-волновую чувствительность. Заметная скорость реакции за фронтом инициирующей ударной волны в зарядах максимальной плотности 1.68 г/см^3 наблюдается лишь при давлении выше 20 ГПа. При дальнейшем увеличении давления всего на несколько гигапаскалей резко, в несколько раз, сокращается расстояние выхода на стационарный режим. Т.е. надежное инициирование детонации реализуется, когда инициирующее давление лишь незначительно, на 10-15% ниже параметров в точке Чепмена-Жуге. Следует, однако, отметить, что даже при низких давлениях (3-5 ГПа) скорость за фронтом ударной волны возрастает, что свидетельствует о незначительном разложении HN с выделением энергии.

В условиях стационарной детонации при начальной плотности $\rho_0 = 1.68 \text{ г/см}^3$ в зарядах HN реализуется высокая скорость детонации D , равная 8.92 км/с. Изменение скорости детонации при варьировании начальной плотности не является монотонным, а имеет характерный s-образный вид: в интервале плотностей $1.5 - 1.6 \text{ г/см}^3$ D резко возрастает при увеличении ρ_0 . Такая зависимость $D(\rho_0)$ не позволяет отнести HN ко 2-й группе ВВ. Несмотря на сложный характер полученной зависимости $D(\rho_0)$, она не является уникальной особенностью HN. Похожий характер изменения скорости детонации при варьировании начальной плотности наблюдался авторами [1] для нитрогуанидина, что было связано ими с реализацией низкоскоростного режима детонации. Вероятно, аналогичный режим реализуется и в HN при $0 < 1.5 \text{ г/см}^3$.

На примере нитрогуанидина авторы [1] показали, что в различных интервалах начальной плотности свойства взрывчатых веществ могут соответствовать различным группам ВВ. Этот вывод имеет отношение и к HN, критический диаметр которого возрастает при увеличении начальной плотности, по крайней мере при $\rho_0 \geq 1.55 \text{ г/см}^3$, что типично для ВВ 2-й группы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-29-01002).

Список литературы

1. Donna Price and A.R. Clairmont Jr. Explosive behavior of nitroguanidine. Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. Published by Elsevier Inc., Volume 12, Issue 1, 1969, Pages 761-770.

ДЕТОНАЦИОННОЕ ДАВЛЕНИЕ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

А. С. Юношев^{1,2}, А. В. Пластинин¹, С. М. Караханов¹, С. А. Бордзиловский^{1,2}

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

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Существует много работ посвященных изучению детонационных характеристик эмульсионных взрывчатых веществ (ЭМВВ). На данный момент подробно измерена скорость детонации различных составов в широком диапазоне начальной плотности ЭМВВ. Несколько работ посвящены определению метательной способности ЭМВВ, измерению профилей детонационного давления и массовой скорости в ЭМВВ. Определение параметров Чепмена-Жуге исследуемых ЭМВВ по измеренным профилям затруднено из-за плавного изменения регистрируемых параметров. Это вызвано относительно большой шириной зоной реакции ЭМВВ (0.3-1.0 мкс), что приводит к незаметному сопряжению зоны реакции и волны разрежения.

В данной работе произведена попытка определения давления Чепмена-Жуге при детонации ЭМВВ, в котором в качестве сенсibilизатора использовались полимерные микробаллоны Ехрапсел. Начальная плотность составов варьировалась в диапазоне 0.2-1.2 г/см³. Профили давления записывались с помощью манганиновых датчиков в преградах из разных материалов в двух различных постановках: при нормальном падении детонационной волны на преграду и при распространении детонационной волны вдоль преграды. Сопоставление результатов измерений позволило построить зависимость давления Чепмена-Жуге от начальной плотности ЭМВВ (см. рис.1).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-03-00883).

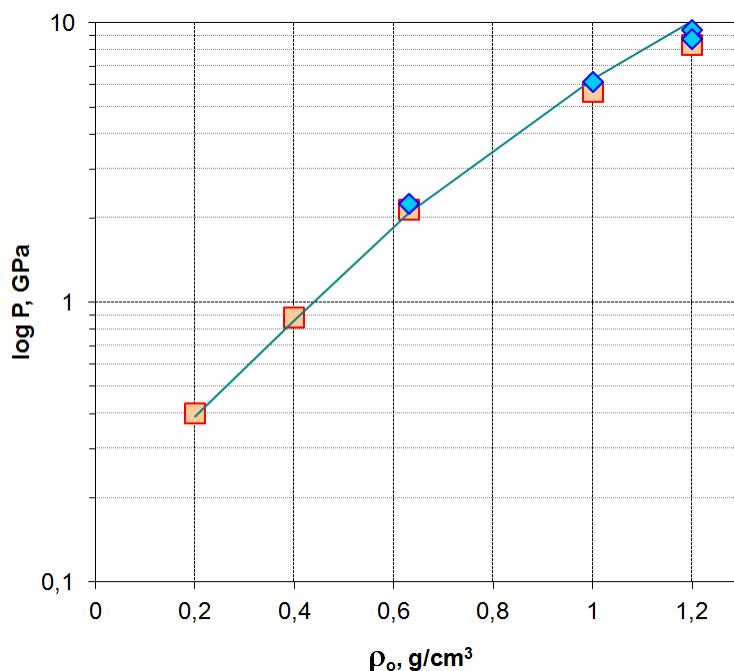


Рис. 1: Зависимость давления Чепмена-Жуге от начальной плотности ЭМВВ. Данные получены при: падении детонационной волны на преграду по нормали – квадраты; скользящая детонация – ромбы.

СКОРОСТЬ ЗВУКА В УДАРНОСЖАТЫХ ОБРАЗЦАХ ИЗ РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫХ СМЕСЕЙ ПОРОШКОВ НИКЕЛЯ И АЛЮМИНИЯ РАЗЛИЧНОЙ ДИСПЕРСНОСТИ

В. В. Якушев¹, С. Ю. Ананьев², А. В. Уткин¹, А. Н. Жуков¹, А. Ю. Долгобородов^{2,3}

¹*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка*

²*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

³*Институт химической физики РАН, Москва*

С использованием метода догоняющей разгрузки [1, 2] экспериментально определена скорость звука за фронтом ударной волны в образцах из эквиатомных смесей микро- и нанодисперсных порошков никеля и алюминия при давлениях 10, 30 и 60 ГПа с целью выявления реакции. Образцы изготавливались прессованием таблеток диаметром 20-40 мм и толщиной 2-8 мм, пористость таблеток 25 %. Нагружение образцов осуществлялось алюминиевыми ударниками, разогнанными продуктами взрыва до скоростей 1.4, 3.3 и 5.1 км/с. Регистрация профилей скорости движения границы образец – водяное окно проводилась с использованием лазерного интерферометра VISAR. Установлено, что скорость звука за фронтом ударной волны в нанодисперсной смеси выше, чем в микродисперсной. Причем с ростом давления скорости звука выравниваются и при 60 ГПа совпадают в пределах погрешности эксперимента. Показано, что данный эффект обусловлен плавлением компонентов и реакция не успевает развиться до начала разгрузки.

Список литературы

1. *McQueen R. G., Hopson J. W., Fritz L. N. Optical technique for determining rarefaction wave velocities at very high pressures // Rev. Sci. Instr. 1982. V.53. №2. P.245-250.*
2. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках. / Под ред. М.В. Жерноклетова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.

СТРУКТУРА ВЗРЫВЧАТЫХ КОМПОЗИТОВ, СОДЕРЖАЩИХ ОДНОСТЕННЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ

Г. Р. Дашапилов^{1,2}, А. О. Кашкаров^{1,2}, И. А. Рубцов^{1,2}, К. А. Тен¹

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

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

Детонационные, эксплуатационные и другие свойства взрывчатых веществ (ВВ) определяются неоднородностями его структуры. При уменьшении размеров неоднородностей структуры ВВ до десятков и сотен нанометров происходит изменение таких свойств, как чувствительность к удару и температура возгорания. Промышленные методы позволяют легко получать неоднородности структуры на субмикронных масштабах. Одним из возможных вариантов их модификации на наноструктурном уровне является внедрение в ВВ одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ).

Проводилось изучение образцов композитов взрывчатых веществ (ВВ) тринитротолуола, пентаэритрита тетранитрата и гексогена с ОУНТ методом малоуглового рентгеновского

рассеяния. Получены дифракционные картины распределения интенсивности для каждого образца, что свидетельствует о наноразмерах неоднородностей. Также были сняты дифракционные картины чистых ОУНТ и сплава алюминия с ОУНТ.

Анализ полученных данных показал, что сигнал МУРР для образцов с ОУНТ не совпадает по форме с сигналом чистых ОУНТ и сплава алюминия с ОУНТ. Предположительно, рассеивание в образцах ВВ с ОУНТ происходит не на ОУНТ, а на порах, образованных в процессе получения композитов. Получен средний размер пор в модели шара порядка 30-40 нм. Для этого использовалось приближение Гинье в малых углах для модели рассеивающих неоднородностей в виде шаров.

Дополнительно проведено сравнение с фотографией с электронного микроскопа показавшее, что полученный размер пор согласуется с размерами видимых пор.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ТАТБ НА ОСНОВЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

*М. А. Бирюкова¹, Д. В. Петров¹, А. Ю. Гармашев¹, А. К. Музыря¹, Ю. М. Ковалёв²,
Е. Б. Смирнов¹*

¹РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск

²ЮУрГУ (НИУ), Челябинск

Данная работа посвящена построению аналитической модели уравнения состояния на основе теоретических представлений о строении ТАТБ и верификация параметров уравнения состояния на основе экспериментальных данных, полученных в статических и динамических экспериментах.

Теоретически обоснованное уравнение состояния позволило проводить согласование различных экспериментальных данных с целью максимального использования эмпирической информации. Можно ожидать, что использование полученного уравнения состояния позволит повысить точность описания термодинамических параметров непрореагировавшего ВВ ТАТБ при численном моделировании ударно-волновых и детонационных процессов.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ ПО КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ В ПЛАСТИЧНОМ ВВ

А. Н. Киселев, А. В. Коваль, А. Ю. Гармашев, С. М. Долгих, Е. Б. Смирнов

РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск

Известно, что на величину скорости детонации ВВ влияют различные факторы, как физико-химические, так и термодинамические. В данной работе исследовалось влияние на скорость распространения детонации еще одного фактора: искривления траектории распространения детонационной волны.

В работе приводятся постановки и результаты экспериментов, в которых показано влияние кривизны траектории распространения детонации в прутке из пластичных ВВ.

ГАЗОДИНАМИКА САМОПОДРЫВА РДТТ ПРИ ЗАПУСКЕ ДВИГАТЕЛЯ

С. В. Сухинин

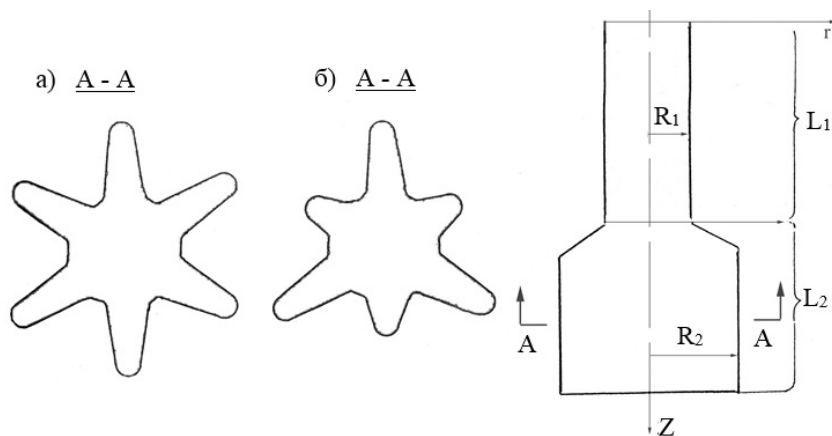
Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Современные ракетные двигатели твердого топлива должны быстро разгоняться на старте и иметь предельные скоростные характеристики. Эти требования определяют сильную неоднородность распределения быстрогорящего топлива в камере сгорания. Неоднородность распределения топлива определяет нестационарную газовую динамику сгорания в газовой полости камеры сгорания при запуске двигателя.

На рисунке приведены два примера газовой полости камеры сгорания канально-щелевых конструкций. Так как эффективные радиусы 1 и 2 существенно различны, то давление в соответствующих областях будет существенно различным на стадии запуска. Поэтому в камере сгорания РДТТ возникает нелинейная продольная волна давления в канале с упругими стенками. Обычно такие волны называют гидроударом, следуя терминологии Н.Е. Жуковского. В настоящей работе эта волна называется гидроупругой.

Распространение этой волны описывается при помощи квазилинейной гиперболической системы уравнений [1]

$$\begin{pmatrix} p \\ u \end{pmatrix}_t + \begin{pmatrix} u & \rho c^2 \\ 1/\rho & u \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ u \end{pmatrix}_z + \begin{pmatrix} u \rho c^2 A_x/A \\ 0 \end{pmatrix} = 0$$



Здесь продукты сгорания имеют плотность $\rho = \rho(p)$, давление $p = p(z, t)$ и продольная скорость $u = u(z, t)$, z - осевая координата канала, t - время, $A(p, z)$ - площадь сечения канала в точке z .

Считается, что $\rho(p)$ и $A(p, z)$ являются известными функциями от давления и осевой координаты, $c = \sqrt{A/(\rho A)_p}$ - местная скорость распространения гидроупругих волн в канале. Скорость гидроупругих волн существенно меньше скорости звука в продуктах сгорания это обуславливает появление сильных разрывов (градиентных катастроф) в камере сгорания РДТТ. Появления сильных разрывов приводит к самоподрыву РДТТ.

В работе предложена методика определения места и времени появления градиентных катастроф при помощи методов теории распространения слабых разрывов [2, 3].

Список литературы

1. Лайтхилл Д. Волны в жидкостях. М.: Мир, 1981.

2. *Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н.* Системы квазилинейных уравнений и их приложения в газовой динамике. М.: Наука, 1978.
3. *Gavrilyuk S.L., Makarenko N.I., Sukhinin S.V.* Waves in Continuous Media. Springer, 2017.

ДОПОЛНЕНИЕ К ОСНОВНЫМ СООТНОШЕНИЯМ НА ФРОНТЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

В. Ф. Анисичкин, Э. Р. Прууэл

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

Основные соотношения на фронте ударной волны позволяют рассчитать плотность, давление и внутреннюю энергию среды за фронтом ударной волны [1]. Однако, для построения уравнения состояния при высоких плотностях энергии этих данных недостаточно. Поэтому дополнительно используются различные приближенные зависимости, например, для коэффициента Грюнайзена, характеризующего отношение тепловой составляющей давления p_h к тепловой энергии E_h . Впервые такая зависимость была предложена в работе [2]. В дальнейшем предлагались и другие подобные, также качественные зависимости, например [3]. В практических расчетах часто пользуются упрощенными зависимостями коэффициента Грюнайзена только от объема или даже его постоянными значениями. Однако, в ряде случаев, надежности и точности таких подходов недостаточно. Поэтому цель работы заключается в обосновании более точного соотношения между параметрами состояния среды за фронтом ударной волны для построения уравнения состояния.

Уравнение состояния конденсированной среды можно представить в виде суммы потенциальной p_p и тепловой p_h составляющих полного давления [1]:

$$p(V, T) = p_p(V) + p_h(V, T).$$

В работе [4] из сравнения низкотемпературных изотерм и ударных адиабат ряда веществ получено, что отношение давления за фронтом ударной волны к потенциальной составляющей может быть принято, для не очень высоких давлений, следующим:

$$p = p_p \frac{\rho}{\rho_1} \quad (1)$$

В работе [5] качественно, из физических соображений обосновывается соотношение (1). Соотношение (1) доказано нами моделированием методами молекулярной динамики. С этой целью система взаимодействующих частиц подвергалась ударному сжатию, измерялись плотность и давление такой моделируемой среды. Затем частицы мгновенно останавливались в реальных положениях, отличных от равновесных, и также измерялось давление. Моделирование проводилось для двух разных потенциалов взаимодействия частиц, степенного Леннарда-Джонса и экспоненциального Букингема.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что соотношение (1) может принято как дополнительное при построении уравнения состояния конденсированных сред.

Список литературы

1. *Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
2. *Slatter J. C.* Introduction in the Chemical Physics. McGraw Book Company, Inc., New York, London, 1939.
3. *Молодец А. М.* Изохорно-изотермический потенциал алмаза. ФГВ. 1998. Т. 34. № 4. С. 94-101.
4. *Анисичкин В. Ф.* Обобщенные ударные адиабаты и нулевые изотермы элементов. ФГВ. 1979. Т. 15. № 2. С. 152-157.
5. *Анисичкин В. Ф.* Уравнение состояния для расчета температуры материалов при обработке взрывом. ИФЖ. 2017. Т. 90. № 4. С. 1025-1035.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ФУРАЗАНОТЕТРАЗИНДИОКСИДА, ДИНИТРОДИАЗАПЕНТАНА И ТЕТРАЗОЛЬНОГО СОПОЛИМЕРА

В. Н. Симоненко¹, А. Б. Кискин¹, В. Е. Зарко¹, П. И. Калмыков², К. А. Сидоров²

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

²Открытое акционерное общество «Федеральный научно-производственный центр «Алтай» (ОАО ФНПЦ «Алтай»), Бийск

Ранее изучены характеристики горения высокоэнергетических бинарных систем на основе фуразанотетразиндиоксида (FTDO) и динитродиазапентана (DNP), с металлическими и энергетическими добавками (Al, AlH₃, перхлорат аммония, аммонийдинитрамид, октоген). Оценены скорость, устойчивость и характерные температуры горения при вариации давления. Установлено, что существует критический уровень скорости горения, при превышении которого послойное горение переходит во взрыв. Критические условия зависят от состава композиций [1]. Для обеспечения термопластичных свойств в бинарную систему введен винилтетразолсодержащий сополимер МПВТ-31. При исследовании характеристик горения тройных систем установлено, что введение МПВТ-31 полностью подавляет взрывной характер перехода в нестационарный режим горения. Условия «мягкого» перехода в нестационарный режим (рис. 1) зависят от соотношения компонентов в составе и уровня скорости горения. Определено оптимальное соотношение компонентов FTDO/DNP=0.95 – 1.15 и содержание сополимера МПВТ-31 не более 7%. При отклонении от этих параметров наблюдаются различные формы перехода в нестационарный режим горения. Следует отметить, что при использовании жидко-вязких составов, не прошедших процедуру отверждения (кристаллизация FTDO/DNP), горение проходит в стационарном режиме даже при содержании сополимера МПВТ-31 до 15%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-03-00217).

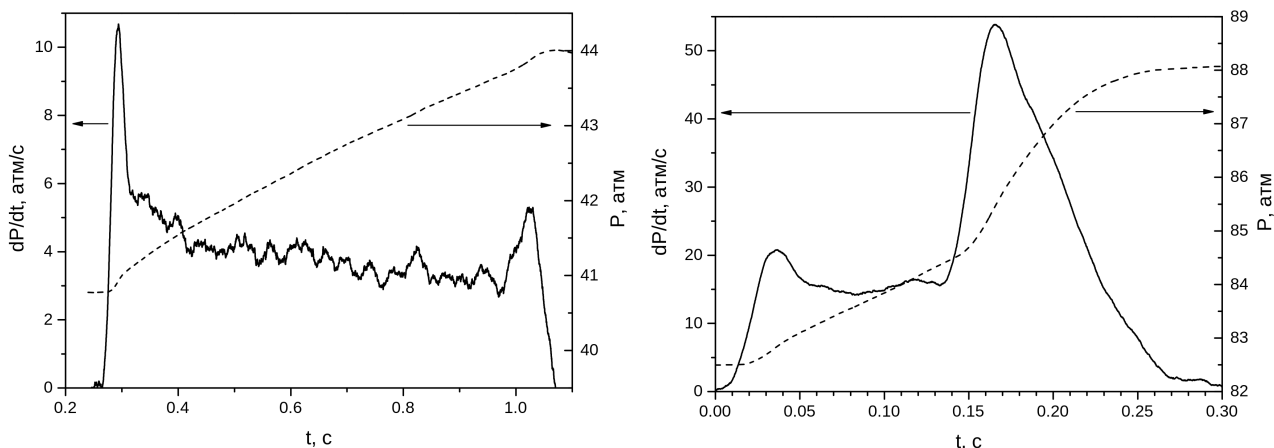


Рис. 1: Пример двух режимов горения для составов с оптимальным содержанием компонентов. (а): FTDO/DNP=1.1, МПВТ-31=7%; $P \approx 40$ атм стационарный режим горения. (б): FTDO/DNP=1.2, МПВТ-31=6.5%; $P \approx 80$ атм переход стационарного режима горения в нестационарный.

Список литературы

1. Симоненко В.Н., Калмыков П.И., Кискин А.Б., Глотов О.Г., Зарко В.Е., Сидоров К.А., Певченко Б.В., Никитин Р.Г. Исследование горения модельных композиций на основе фуразанотетразиндиоксида и динитродиазапентана. I. Бинарные системы. ФГВ. 2014. Т. 50. № 3. С. 68-77.

ДИНАМИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ УЛЬТРА-ДИСПЕРСНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ЧАСТИЦ В ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛНАХ

В. М. Титов¹, К. А. Тен¹, Б. П. Толочко², В. М. Аульченко³

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

²Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск

³Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск

Характерные временные масштабы явлений, сопровождающих детонацию конденсированных взрывчатых веществ, составляют единицы микросекунд и менее. Колоссальные давления и высокие температуры определяют не только фундаментальный интерес к физике и химии протекающих при этом процессов, но и постоянный поиск практических применений и необходимость решений возникающих при этом технических задач. Одним из важных вопросов физики взрыва стала кинетика химических реакций во фронте детонации, причем не только в газовой фазе, но и определяющая формирование конденсированных продуктов детонации, в основном состоящих из разнообразных форм углерода. Интерес к исследованию конденсации углерода был в значительной мере подогрев публикацией работ по синтезу ультрадисперсного алмаза в продуктах взрыва сотрудниками Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева в 1983 году. Впоследствии, изучению конденсации углерода прежде всего в виде наноалмаза было посвящено более тысячи работ. Основное усилие исследователей было направлено на

модификацию конечной морфологии детонационного углерода и технологии очистки нано-алмазов от остальных углеродных форм. В начале 2000х сотрудниками Института гидродинамики в коллаборации с Институтом ядерной физики и Институтом химии твердого тела была создана экспериментальная станция, позволяющая проводить динамические исследования формирования углеродного продукта. Метод основан на регистрации малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР), возникающего при взаимодействии коротких длительностью около 1 нс высоко-периодичных всплесков синхротронного излучения с детонирующим зарядом взрывчатого вещества. Интенсивность сигнала МУРР пропорциональна флуктуациям электронной плотности в плоскости луча, обусловленных формированием конденсированного углерода, а его форма определяется размерами рассеивающих центров. Предложенный метод оказался весьма информативным и успешным, так, несколько лет назад подобная установка была создана и зарубежным коллективом ученых на базе Advanced Photon Source в США.

Экспериментальная методика постоянно модернизировалась и развивалась в направлении увеличения допустимой массы исследуемых образцов и сокращения времени регистрации сигнала. В настоящее время проектируется третья станция, которая планируется к вводу в эксплуатацию в 2024 году.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-03-00251.

PROPAGATION RATE OF DADNE POLYCRYSTALS' EXPLOSION PRODUCTS INITIATED BY PULSED ELECTRON BEAM

I. Y. Liskov¹, A. P. Nikitin¹, N. N. Ilyakova², A. S. Zverev²

¹*Institute of Coal Chemistry and Material Science, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, Kemerovo*

²*Kemerovo State University, Kemerovo*

The work is devoted to measurement of the explosion products' rate of DADNE polycrystals propagation, when it is initiated by a pulsed electron beam (0.24 MeV, 20 ns, 25 J/cm²). In this work, an explosive decomposition of DADNE polycrystals is realized, initiated by an e-beam of the accelerator with an explosive-emitting cathode. Samples were prepared by pressing to a density of ~ 1.7 g/cm³ and installed in the vacuum chamber of the electron accelerator. After the absorption of the e-beam, the products evolved in vacuum expand and beat the surface of the piezoceramic (PZT-19) detector. The signal from the detector was registered with the oscilloscope AKIP-4119/4. The dependence of the explosion products' propagation time on the distance from the sample to the piezodetector was obtained.

The propagation rate was determined as $V = 8320 \pm 300$ m/s using the slope of the obtained linear dependence. Thus, the explosive decomposition of DADNE polycrystals by an e-beam has been realized for the first time. The results for the products' propagation rate V correlate with the work [1].

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-33-00349 mol_a.

References

1. *S. Karlsson, H. Östmark, C. Eldsäter, T. Carlsson, H. Bergman, S. Wallin, and A. Pettersson* Detonation and sensitivity properties of FOX-7 and formulations containing FOX-7 // 12th International Detonation symposium., San Diego (2002).

5 Динамические течения с химическими реакциями

УСКОРЕНИЕ ПЛАМЕНИ И ВОЗНИКНОВЕНИЕ ГОРЯЧИХ ТОЧЕК ПРИ ПЕРЕХОДЕ ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В СМЕСЯХ $(C_2H_2 + 2,5 O_2) + 70\% Ar/60\% N_2$ В ГЛАДКОЙ ТРУБЕ

Е. А. Баранышин, О. Г. Пенязьков, П. Н. Кривошеев, К. Л. Севрук

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

Несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных работ по исследованию перехода горения в детонацию (ПГД) в газах вопрос о механизме возникновения горячих точек и факторах влияющих на их появление остается в настоящее время открытым.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования ПГД в стехиометрической смеси ацетилен-кислород, разбавленной на 70 % Ar и 60 % N₂ в круглой гладкой трубе диаметром 0.04 м в режиме слабой инициации горения искровым разрядом (0.8 мДж).

Одновременная регистрация распространения ударных волн сжатия высокочастотными датчиками давления, а фронта реакции ионизационными датчиками позволила получить количественные данные о динамике формирующейся ударной волны, локальных скоростях фронта пламени и его пространственной конфигурации (относительно стенок трубы).

Для обеих исследованных газовых смесей при распространении пламени со скоростями меньше скорости звука в продуктах детонации наблюдались сильные поперечные колебания его фронта относительно стенок трубы. При достижении скоростей сравнимых со скоростью звука в продуктах детонации отмечалось распространение пламени со стабильной пространственной ориентацией фронта и возникновение горячих точек, появление которых приводило к локальному взрыву смеси и формированию детонационной волны.

Выполненная высокоскоростная видеорегистрация свечения при ПГД позволила зарегистрировать появление горячих точек и определить их положение относительно стенок трубы и переднего фронта пламени.

В исследованных смесях появление горячих точек происходило в пристеночной области между лидирующей ударной волной и фронтом пламени. В смеси, разбавленной N₂, отмечено возникновение, как правило, одной или нескольких горячих точек, причем их появление не всегда приводило к возникновению локального взрыва и формированию детонационной волны. В некоторых экспериментах из появившейся горячей точки распространялась новая волна горения, которая сливалась с первоначальной. Такая ситуация регистрировалась на больших расстояниях (до 1 м) пока из очередной горячей точки не происходило развитие детонационной волны. В смеси разбавленной Ar зачастую регистрировалось возникновение нескольких горячих точек, которые практически сразу становились центрами развития детонации.

ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ В ВОЛНАХ МНОГОФРОНТОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

А. А. Васильев^{1,2}

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

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Классическая теория волн горения и детонации, основанная на законах сохранения массы, импульса и энергии, хорошо известна с конца 18 века из работ Михельсона-Чепмена-Жуге. Традиционно под химическим энерговыделением смеси Q понимается разность между суммарной энтальпией образования исходных компонент смеси (индекс i) и суммарной энтальпией образования продуктов химической реакции (индекс j):

$$Q = \sum \alpha_i H_{f_i}^\circ - \sum \alpha_j H_{f_j}^\circ,$$

здесь α – численные коэффициенты при участвующих в реакции химических веществах, $H_{f_i}^\circ$ – энтальпия образования этих веществ при стандартной температуре ($T^\circ = 298.15$ К).

Именно эта величина стоит в уравнении энергии классической теории детонации с плоским фронтом

$$H_0 + Q + u_0^2/2 = H + u^2/2,$$

где u_0 и u – скорости втекающего и вытекающего потока в системе фронта волны, а термодинамическая часть удельной энтальпии каждого индивидуального вещества определяется формулой

$$H_{i,j} = \int_{298.15}^T c_{p_{i,j}} dT,$$

Несмотря на почти 70-летнюю историю обнаружения неустойчивости классической одномерной модели с гладким плоским фронтом и открытия многофронтной структуры газовой детонации практически неисследованным является вопрос об энерговыделении в многофронтной детонации, где значительная пространственная и временная неоднородности являются существенными признаками детонационной волны (ДВ). В данной работе представлены некоторые идеи и данные, касающиеся этой неисследованной области.

Предложена методика определения энерговыделения Q горючей смеси, основанная на обработке траектории расширяющейся волны с позиции модели сильного взрыва. Теория сильного взрыва [1–2] в инертной среде дает соотношение между мгновенно выделившейся энергией взрыва E_ν , начальной плотностью ρ_0 , координатой взрывной волны r и временем t в виде:

$$r(t) = (E_\nu / (\alpha_\nu \rho_0))^{1/(\nu+2)} \cdot t^{2/(\nu+2)},$$

где $\nu=1,2,3$ для плоского, цилиндрического и сферического случая. В координатах $r^{(\nu+2)}$ – t^2 эта зависимость должна изображаться прямой линией. По ее наклону можно определить E_ν , которой в данном случае следует приписать смысл энергии инициирования или “полезной” энергии источника.

Сравниваются траектория волн при критическом иницировании многофронтной детонации в горючей смеси и траектория взрывной волны от этого же инициатора в инертной смеси,

газодинамические параметры которой эквивалентны параметрам горючей смеси. Энерговыведение смеси определяется как разность совместного энерговыведения инициатора и горючей смеси при критическом инициировании и энерговыведения инициатора при возбуждении взрывной волны в инертной смеси.

Приведены результаты экспериментальной проверки данной методики.

Обнаружены заметные отклонения экспериментального профиля Q от существующих модельных представлений.

ГИПЕРБАРИЧЕСКАЯ КОНВЕРСИЯ ЛЕГКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ БЫСТРЫМ ЦИКЛИЧЕСКИМ СЖАТИЕМ

Б. С. Ездин, В. В. Каляда, А. Е. Зарвин, А. С. Яскин

Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Предложен метод одностадийной переработки легких углеводородов в оксигенаты быстрым циклическим бездетонационным сжатием сырья в газовой фазе. Известные ранее подходы имеют существенные ограничения либо по давлению в реакторной зоне [1,2], либо по частоте автоколебаний и управляемости процессом [3]. Реактор гипербарического сжатия (РГС) представляет собой тепловую машину циклического действия, в которой осуществляется адиабатическое сжатие реакционной смеси парой поршень – цилиндр до температуры и давления, необходимых для быстрого протекания химической реакции. Затем, в стадии расширения, продукты реакции охлаждаются, происходит их закалка. Таким образом, РГС совмещает нагреватель, собственно реактор и закалочное устройство, препятствующее протеканию обратных реакций [4].

Новые конструкционные решения и использование керамического покрытия, полученного технологией микродугового оксидирования для компрессионного узла РГС - пары «поршень-цилиндр» - позволили отказаться от использования компрессионных колец и смазки, достичь высокой степени сжатия и получить давление и температуру в реакторной зоне, необходимые для окислительной конверсии.

В эксперименте в качестве химических реагентов использовалась смесь кислорода и легких углеводородов (метан, этилен, пропан, бутан). Пропорциональное соотношение окислителя и углеводородов выбиралось так, чтобы исходная реакционная смесь была «богатой», т.е. существовал избыток углеводородов в стехиометрическом балансе процесса парциального окисления. Выполнение этого условия позволяет избежать детонационных режимов работы РГС и режимов полного окисления – горения углеводородов в реакторном объеме с образованием воды и диоксида углерода. Прохождение реакции окисления контролировалось в режиме on-line при помощи газового анализатора UGA-200. Одновременно контролировалось изменение давления в реакторном объеме. Появление оксигенатов, большего количества водорода указывало на прохождения конверсионных реакций, а исчезновение или малое количество исходных реагентов - на полноту реакции переработки. В случае сжатия углеводородной смеси и кислорода в соотношении 4 : 1 количество насыщенных паров метанола в газообразной пробе полученного продукта доходило до 2 %, что соответствовало переработке приблизительно 12 % исходного сырья. Бедные смеси характеризовались возникновением области детонации, в которой давление возрастало до 300 ат. и более. При этом продуктом реакции являлись диоксид углерода, вода и водород.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Прикладная физика» НГУ при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, гранты 3.5918.2017/ИТР, 3.5920.2017/ИТР.

Список литературы

1. *Арутюнов В.С.* Окислительная конверсия природного газа. М.: КРАСАНД, 2011.- 640 с.
2. *Арутюнов В.С., Веденеев В.И., Климовецкая С.Ю., и др.* Влияние давления на образование продуктов неполного окисления метана. Теоретические основы химической технологии. 1994. Т. 28. № 6. С. 627.
3. *Glouchenkov M., Kronberg A.* Pulsed compression: advanced technology for synthesis gas production. International Conference Gas-Fuel 05, Brugge (Belgium), Nov. 13-16, 2005.
4. *Ездин Б.С., Зарвин А.Е., Яскин А.С., и др.* Установка быстрого циклического сжатия для передела лёгких углеводородо . ХНГМ. 2016. № 1. С. 17-19.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТЕЧЕНИЕ В БЛИЖНЕМ СЛЕДЕ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ ЗА СЧЕТ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГОРЕНИЯ КОМПОЗИТОВ

И. К. Ермолаев¹, В. В. Боголепов², Л. Д. Сухановская³

¹НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына МГУ, Москва

²ЦАГИ имени профессора Н.Е. Жуковского, Моск. обл.

³НИИ механики МГУ, Москва

В работе рассмотрена возможность увеличения донного давления, поиск оптимальных способов тепломассоподвода и рациональных конструктивных схем его реализации с целью получения донной тяги.

Разработан способ увеличения донного давления с использованием донных тепловых газогенераторов (ДТГ) нетрадиционной конструктивной схемы (с отделяющимся дном). Экспериментальные исследования проведены на аэродинамической установке А-3 при числе Маха $M_1 = 3.0$. Дно тела вращения крепилось так, чтобы при выбросе пылевой плазмы, получаемой при горении оксидно-металлического порошкового композита на основе окиси вольфрама, оно отделялось и в момент отделения работало, как пластина во фронте пламени. В момент отделения дна часть пылевой плазмы выбрасывается на боковую поверхность ДТГ. Показано, при дальнейшем горении композита образующаяся пылевая плазма занимает все донное пространство, выходя из области, ограниченной линиями стекания, что приводит к реализации течения, когда зона отрыва объединяется с зоной рециркуляции в донной области. Исследовано влияние времени нахождения отделяющегося дна в донной области на изменение величины донного давления: чем более длительное время находится пылевая плазма в зоне рециркуляции донной области, тем больше донное давление. Установлено, что в этом случае наблюдается увеличение донного давления по сравнению со статическим давлением. С целью увеличения зоны рециркуляции проведен эксперимент на усовершенствованной модели ДТГ с отделяющимся дном в виде параболоида (цилиндр, торцевая поверхность которого выполнена в виде параболоида). Отбрасываемое дно какое-то время находясь в донной области, отражает поток газа из фокуса параболы на плоское дно тела вращения, увеличивая тем самым донное давление, которое больше статического. При развороте фокуса параболы от оси симметрии тела вращения и выхода отбрасываемого дна из донной области на плоское дно тела вращения не поступает отраженный из фокуса параболы газовый поток и давление становится меньше статического.

Таким образом, показано, что для увеличения донного давления возможность использования тепломассоподвода за счет горения высокоэнергетических композитов является перспективным направлением и существуют резервы увеличения донного давления за счет дальнейшего совершенствования газодинамической схемы ДТГ с отделяющимся дном.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15–01–07687.

НЕПРЕРЫВНАЯ СПИНОВАЯ И МНОГОФРОНТОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ СМЕСЕЙ МЕТАН/ВОДОРОД – ВОЗДУХ

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

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

Обзор современного состояния экспериментальных исследований непрерывной спиновой детонации (НСД) в проточных кольцевых камерах сгорания (вариант воздушно-реактивного двигателя) для ряда топливоздушных смесей (ТВС): ацетилен-воздух, водород-воздух, синтез-газ-воздух представлен в [1]. Цель настоящей работы – реализация и исследование непрерывной детонации с поперечными детонационными волнами (ПДВ) в проточной кольцевой цилиндрической камере сгорания диаметром 503 мм (ДК-500) самых трудно детонирующих газовых смесей CH_4/H_2 -воздух с массовыми долями H_2 в горючем $m_{\text{H}} = 1/9 \div 1/2$. Эксперименты проведены в ДК-500 (кольцевая щель для подачи воздуха $\delta = 3,5$ мм, кольцевой зазор между стенками камеры $\Delta = 18$ мм, длина $L_c = 540$ мм) в диапазоне удельных расходов смеси $g_{\Sigma} = 64 \div 1310$ кг/(с·м²) при коэффициенте избытка горючего $\phi = 0.78 \div 1.56$. Истечение продуктов происходило в окружающую атмосферу с давлением $p_a = 10^5$ Па.

Результаты экспериментов. В смесях CH_4+8H_2 +воздух и CH_4+4H_2 +воздух впервые были осуществлены одноволновые и двухволновые режимы НСД с частотой вращения ПДВ $f = 1.66 \rightarrow 0.65$ кГц (скоростью детонации $D = 1.3 \rightarrow 1.02$ км/с) и $f = 1.36 \rightarrow 0.56$ кГц ($D = 1.1 \rightarrow 0.84$ км/с), соответственно. В смесях CH_4+4H_2 +воздух и $\text{CH}_4+1.5\text{H}_2$ +воздух впервые реализована непрерывная многофронтная детонация (НМД) с двумя встречными ПДВ с частотой $f = 0.86 \div 1.34$ кГц. В смеси CH_4+4H_2 +воздух – наблюдали как горение в камере, так и НСД вне камеры сгорания с ПДВ, вращающимися с частотой $f = 1.01 \div 1.1$ кГц. Установлено, что при одинаковых значениях удельных расходов смесей CH_4/H_2 +воздух уменьшение доли водорода в составе горючего однозначно приводит к уменьшению скорости ПДВ. Получены нижние пределы непрерывной детонации по удельному расходу смеси 64, 100, 200 и 790 кг/(с·м²) для горючего составов CH_4+8H_2 , CH_4+4H_2 , CH_4+2H_2 , $\text{CH}_4+1.5\text{H}_2$ соответственно, а также по массовой доле водорода в составе горючего метан/водород - $m_{\text{H}} \approx 0.16$. Определены и проанализированы удельные импульсы при НСД в зависимости от состава бинарного горючего метан/водород.

Итак, реализация в проточной кольцевой цилиндрической камере ДК-500 режимов НСД и НМД самой трудно детонирующей смеси метан-воздух с добавками водорода означает, что все газовые ТВС могут детонировать в режиме непрерывной детонации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00102).

Список литературы

1. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Современное состояние исследований непрерывной детонации топливоздушных смесей (обзор). ФГВ. 2015. Т. 51, № 1. С. 31 - 46.

УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ ОКОЛОЗВУКОВОЙ ОБЛАСТИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ С ПОМОЩЬЮ ДРОССЕЛИРУЮЩЕЙ СТРУИ И ПРИСТЕНОЧНОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕПЛА

А. П. Калинина^{1,2}, В. П. Замураев^{1,2}

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

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Разработка прямоточных воздушно-реактивных двигателей ведется в различных направлениях, проводятся как численные, так и экспериментальные исследования. Численные исследования проводятся в основном с использованием модели расширяющегося канала с источниками энергоснабжения. В качестве одной из эффективных схем следует рассматривать подачу основной массы топлива в расширяющейся части канала (непрерывное или ступенчатое расширение), при этом в секции постоянного сечения может осуществляться только предварительное торможение потока до околозвуковых скоростей. Впервые такой способ был предложен авторами [1]. Способ заключается в применении дросселирующей струи и подаче газообразного топлива выше по потоку от нее. Данная схема позволяет избежать процесса запираания канала, когда избыточное тепловыделение в секции постоянного сечения приводит к ударной волне, распространяющейся вверх по потоку. В [2] предложено использовать относительно низкий перепад давлений между газогенераторами струй и основным потоком в канале. Благодаря этому решается проблема запираания канала — при избыточном тепловыделении давление в канале повышается, перепад давлений исчезает, подача газообразного топлива прекращается. Однако при этом развивается колебательный процесс, который делает поток неоднородным и мешает устойчивому тепловыделению в расширяющейся части канала. В результате этого параметры потока на выходе также приобретают колебательный характер. Потенциально колебания могут быть опасны с точки зрения прочности конструкции, поэтому свойства развивающегося колебательного процесса требуют отдельного изучения, чему и посвящена данная работа. В качестве газообразного топлива рассмотрены водород и этилен. Получено, что на амплитуду колебаний параметров потока значительное влияние оказывает уровень турбулентной кинетической энергии.

Работа выполнена в рамках проекта СО РАН III.22.6.2 и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-08-00183).

Список литературы

1. Третьяков П. К., Забайкин В. А., Прохоров А. Н. Высокоскоростной ПВРД с пульсирующим режимом запуска. XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теор. и прикл. мех. Казань: Изд.-во Казанского ун-та. 2015. С. 3778–3780.
2. Замураев В.П., Калинина А.П. Формирование околозвуковой области при теплогазодинамическом воздействии на сверхзвуковой поток в канале. Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25. № 1. С. 157-160.

УПРАВЛЕНИЕ ВОЛНОЙ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗОВОЙ СМЕСИ

В. А. Левин^{1,2,3}, Т. А. Журавская^{1,2}

¹НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

²ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский

³ИАПУ ДВО РАН, Владивосток

Используя детальный кинетический механизм химического взаимодействия [1], численно исследовано детонационное горение стехиометрической водородно-воздушной смеси с целью изучения возможности управления волной детонации.

Рассмотрено детонационное горение покоящейся предварительно подготовленной смеси, в которой часть молекулярного водорода и молекулярного кислорода предварительно преобразовывалась в атомарные газы. Установлено, что указанная конверсия газовой смеси приводит к уменьшению поперечного размера детонационной ячейки и увеличению скорости распространения самоподдерживающейся волны, что позволяет использовать ее для управления детонационным горением. Так, рассмотрено распространение волны детонации в плоском канале с поперечным препятствием (барьером). Известно, что взаимодействие волны с препятствием, высота которого превышает некоторое (критическое) значение, приводит к срыву детонации [2]. Установлено, что критическая высота препятствия для подготовленной смеси превышает критическую высоту для неподготовленной, что позволяет использовать предварительную конверсию для сохранения детонационного горения в каналах с барьерами.

Обнаружено, что скорость распространения детонации можно существенно уменьшить добавлением в горючую смесь мелких инертных частиц. Установленная возможность контроля скорости волны была использована для стабилизации детонационного горения в сверхзвуковом потоке газовой смеси в симметричном плоском канале с сужением. Проведенное численное моделирование показало, что в ряде случаев, когда геометрические параметры канала не обеспечивают стабилизацию детонации в сверхзвуковом потоке (волна выходит из канала против потока), добавление в поступающую в канал газовую смесь мелких инертных частиц приводит к стабилизации волны. Установлено, что изменение концентрации частиц в поступающей в канал горючей смеси позволяет управлять положением в потоке стабилизированной волны с целью повышения эффективности детонационного сжигания газовой смеси.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ (договор 14.G39.31.0001 от 13.02.2017). Влияние добавленных в газовую смесь инертных частиц на стабилизацию детонационного горения в потоке исследовано при поддержке РФФИ (проекты 16-29-01092, 18-01-00883). Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [3].

Список литературы

1. Старик А. М., Титова Н. С., Шарипов А. С., Козлов В. Е. О механизме окисления синтез-газа. ФГВ. 2010. Т. 46. № 5. С. 3–19.
2. Журавская Т. А. Распространение волн детонации в плоских каналах с препятствиями. МЖГ. 2007. № 6. С. 135–143.
3. Воеводин Вл. В., Жуматий С. А., Соболев С. И., Антонов А. С., Брызгалов П. А., Никитенко Д. А., Стефанов К. С., Воеводин Вад. В. Практика суперкомпьютера "Ломоносов". Открытые системы. 2012. № 7. С. 36–39.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕДАЧИ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ВЗРЫВЕ ГРЕМУЧЕГО ГАЗА, ЗАКЛЮЧЕННОГО В УПРУГУЮ ОБОЛОЧКУ

В. А. Марков, А. А. Васекин, Д. В. Гелин, Н. Д. Гелин, Д. А. Лысов, А. В. Петюков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Экспериментальные исследования передачи детонации от активного заряда, состоящего из газовой смеси, заключённой в упругую оболочку к пассивному заряду, также состоящему из газовой смеси, заключённой в упругую оболочку через воздух и через жидкую среду (воду), проводились на лабораторной установке, созданной на кафедре «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана [1-3]. Установка представляет собой ударную трубу, изготовленную из прозрачной гладкостенной трубки из оргстекла длиной 1000 мм с внешним диаметром 40 мм и соответственно внутренним диаметром 30 мм, закреплённую вертикально на специальном штативе. Нижняя часть прозрачной трубки помещена в металлический кожух. Кожух выполняет две задачи, первое – это предотвращения разрыва трубки во время подрыва активного заряда и второе кожух используется для подвода системы инициирования к активному заряду. Иницирующее устройство, связанное с активным зарядом гибкой прозрачной трубкой, позволяет с помощью системы клапанов накопить газовую смесь в камере сгорания, гибкой прозрачной трубке и активном заряде, осуществить в нужный момент времени воспламенение смеси и передать импульс к активному заряду. Активный заряд представлял собой наполненную гремучим газом смесь упругую оболочку, помещённую в нижнюю часть ударной трубы. Пассивный заряд также представлял собой наполненную гремучим газом упругую оболочку, помещённую в верхнюю часть ударной трубы на требуемом расстоянии от активного заряда. По условиям экспериментов промежуток между зарядами был либо заполнен воздухом, либо заполнялся жидкостью (водой). Установка располагалась во взрывной камере, подсветка и видеорегистрация процессов высокоскоростной видеокамерой Phantom 1610 осуществлялись через иллюминаторы. Скорость видеосъёмки составляла 84000 кадр/с.

В результате проведенных исследований была показана возможность изучения механизмов перехода горения в детонацию с помощью оптических методов регистрации быстропротекающих процессов; экспериментально доказана передача детонации через определенный размер зазора, заполненного различными средами (воздух, вода).

Список литературы

1. Патент 2619501 Российской Федерации. Исследовательская пусковая установка / Гелин Д.В., Гелин Н.Д., Лысов Д.А., Марков В.А., Марков И.В., Селиванов В.В., Сотская М.М., Сотский М.Ю. Оpubл. в 2017, Бюл.№14.
2. Патент 2625404 Российской Федерации. Способ ускорения тела в баллистическом эксперименте и устройство для его осуществления / Гелин Д.В., Гелин Н.Д., Лысов Д.А., Марков В.А., Марков И.В., Селиванов В.В., Сотская М.М., Сотский М.Ю. Оpubл. в 2017, Бюл.№20.
3. Сотский М.Ю., Гелин Д.В., Гелин Н.Д., Лысов Д.А., Марков В.А., Марков И.В., Селиванов В.В., Сотская М.М. Наблюдение нестационарных процессов в баллистических опытах для верификации расчетных моделей // Материалы XXIII Международного симпозиума “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” им. А.Г. Горшкова. Т.2. М.: ООО «ТР-принт», 2017. С.170-172.

МГД ЭФФЕКТЫ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

Е. Л. Попов¹, А. Н. Самсонов², Ф. А. Быковский², Е. Ф. Ведерников²

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск

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

Рассматривается принцип генерации электроэнергии МГД системой на непрерывной спиновой детонации (НСД). В последнее время к НСД проявляют интерес специалисты, работающие в области аэрокосмической техники. Однако прямого преобразования энергии вращающейся детонационной волны в электрическую до настоящего времени разработано не было, хотя сообщения об этом появлялись в СМИ, но без упора на какие-либо экспериментальные результаты. Цель работы – экспериментально показать возможность генерации электрической энергии при использовании в качестве рабочего тела продуктов реакции при НСД в окрестности фронта поперечных детонационных волн (ПДВ). В качестве топливных компонентов использовался водород и кислород.

Установка включает в себя кольцевую камеру детонационного сгорания диаметром $d_{c1} = 40.5$ мм с зазором $\Delta = 5.25$ мм и длиной $L_c = 100$ мм. Топливные компоненты (водород и кислород) отдельно подавались в камеру. Форсунки со скрещивающимися струями обеспечивали перемешивание компонентов в области распространения фронта ПДВ на расстоянии около 15 мм от форсунок. Расходы кислорода и водорода в течение опыта (~ 0.3 с), определяемые по методике [1], принимали значения $G_{r,ox} = 29.5 \rightarrow 21.9$ г/с и $G_{r,f} = 3.7 \rightarrow 2.7$ г/с, находясь вблизи стехиометрии – $\phi = 1.0 \pm 0.01$ (стрелкой показано направление изменения параметра в течение эксперимента). Продольное магнитное поле \mathbf{B} в зазоре Δ создавалось ниодимовым магнитом высотой 20 мм. Электрический сигнал снимался с кольцевых контактов шириной $b = 15$ мм, расположенных на наружной и внутренней стенках камеры в области распространения фронта ПДВ. В отдельных экспериментах измерялись как э.д.с. на контактах, так и напряжение на сопротивлении $R_H = 445$ Ом. Процесс инициировался пережиганием электроком проволоочки или открытым огнём на выходе из камеры. Продукты выбрасывались в атмосферу. Процесс в камере фотографировался высокоскоростной камерой типа Photron Fastcam SA5 в режиме съемки 775000 кадр/с. Датчики давления регистрировали средние статические давления в ресиверах кислорода и водорода, их коллекторах и в камере сгорания. Компьютер регистрировал и обрабатывал сигналы, подаваемые через АЦП: с видеокамеры, а также электрические сигналы с датчиков давления и с электродов. Система управления синхронизировала работу отдельных элементов установки.

Результаты экспериментов. Впервые экспериментально показана возможность преобразования химической энергии газообразной топливной смеси в электрическую МГД способом при использовании НСД. Измерена удельная проводимость продуктов детонации в области вращения фронта детонационной волны – около $3 \cdot 10^{-2}$ Ом⁻¹·м⁻¹. Обнаружено разделение зарядов в области вращения детонационной волны без наличия магнитного поля. Рассмотрена структура поперечных детонационных волн, измерена их скорость – 2220 ± 50 м/с, и изучено течение в их окрестности. Для используемой экспериментальной установки проведена оценка степени преобразования химической энергии топлива в электрическую.

Список литературы

1. *Быковский Ф.А., Ждан С.А.* Непрерывная спиновая детонация. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. С. 423.

СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ НА СУБЛИМИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И ЕГО ЛИНЕЙНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

С. А. Гапонов, Б. В. Смородский

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

Ламинарно-турбулентный переход до настоящего времени остается актуальной проблемой механики жидкости и газа.

Результаты. Оказалось, что, совершенно аналогично инъекции тяжелого газа в сверхзвуковой пограничный слой [6-9], устойчивость ПС, развивающегося на сублимирующей поверхности, повышается вследствие благоприятного изменения профиля плотности бинарной смеси (воздух+сублимант) поперек слоя.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 18-01-00070).

Список литературы

1. *Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б.* Тепловая защита. М.: Энергия, 1976, 392 с.
2. *Лапин Ю.В.* Турбулентный пограничный слой в сверхзвуковых потоках газа. М.: Наука, 1970, 343 с.
3. *Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р.* Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: ИЛ, 1961, 929 с.
4. *Charwat A.F.* Exploratory Studies on the Sublimation of slender Camphor and Naphthalene Models in a Supersonic Wind-Tunnel. ARPA Memorandum RM-5506, July 1968.
5. *Charwat A.F.* The Preparation of Camphor Models for Wind-Tunnel Sublimation Studies: Preliminary Results of the Sublimation of a Pointed Cone. Santa Monica, CA: RAND Corporation, P-2611, 1962.
6. *Гапонов С.А., Смородский Б.В.* Управление параметрами сверхзвукового пограничного слоя путем вдува инородного газа // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2015. № 1(16). С. 28–32.
7. *Gaponov S.A., Smorodsky B.V.* Supersonic boundary layer of binary mixture and its stability // Int.J. of Mechanics. 2016. Vol.10. P. 312–319.
8. *Лысенко В.И., Смородский Б.В., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д.* Экспериментальное исследование влияния инъекции тяжелого газа в сверхзвуковой пограничный слой на его устойчивость // Теплофизика и аэромеханика, 2018, том 25, № 2, 191-198.
9. *Лысенко В.И., Смородский Б.В., Ермолаев Ю.Г., Гапонов С.А., Косинов А.Д., Семенов Н.В., Яцких А.А.* Влияние инъекции тяжелого газа в пристеночный слой сверхзвукового пограничного слоя на его переход // Сибирский физический журнал. 2017. Т.12, №1. С.50–56.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРЕГУЛЯРНОЙ ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРЫ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ДВУХ-ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ

А. В. Троцюк, П. А. Фомин

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

Предложена приведенная модель кинетики для описания химических превращений в двух-топливной смеси вида $C_nH_m + a_1O_2 + a_2CO + a_3N_2$, $a_1 \geq n/2$. Она является дальнейшим развитием предложенной ранее модели химической кинетики детонационного сгорания метановых смесей [1]. Модель является двустадийной (период индукции и зона основного тепловыделения). Константы Аррениусовской формулы для расчета периода индукции в одно-топливных смесях углеводорода и СО с окислителем полагаются известными.

Реальные многостадийные процессы, проходящие во время периода индукции, заменяются брутто-реакцией, которая удовлетворяет следующим условиям. (i) Суммарное тепловыделение химических реакций к моменту окончания периода индукции много меньше максимально возможного теплового эффекта. (ii) К моменту окончания периода индукции все молекулы метана успевают разложиться. Молекулы СО при этом химических превращений не испытывают. В зоне основного тепловыделения молярная масса газа рассчитывается с помощью одного обыкновенного дифференциального уравнения. Показатель адиабаты и внутренняя энергия смеси вычисляются по явным алгебраическим формулам в зависимости от молярной массы, давления и температуры.

Константы модели имеют четкий физический смысл. Она проста, согласована со вторым началом термодинамики и удовлетворяет принципу Ле-Шателье.

Предложенная модель кинетики использована для численных двумерных расчетов детонационной волны в смеси синтез-газа с кислородом. Для расчета периода индукции рассматриваемой двух-топливной смеси использован подход из [2]. В расчетах получено, что при увеличении доли окиси углерода регулярная структура детонационной волны сменяется нерегулярной, которая характеризуется хаотическим несогласованным движением основных поперечных волн (ПВ), многочисленными вторичными (третичными и т.д.) поперечными волнами, составляющими иерархию уменьшающихся по размерам возмущений лидирующего ударного фронта волны, «тонкой» (многофронтной) структурой как основных так и вторичных ПВ, наличием значительных областей непрореагировавшего газа за фронтом волны, что полностью соответствует эксперименту. Рассчитанные размеры детонационных ячеек хорошо соответствуют экспериментальным данным и расчетам по общепринятой аналитической модели Васильева-Николаева.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-03-01351-а).

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 CH₄ with air. *Combustion Science and Technology*. 2014. Vol. 186. № 10-11. P. 1716-1735.
2. Васильев А.А. Задержка воспламенения в многотопливных смесях. *Физика горения и взрыва*. 2007. Т. 43. № 3. С. 42-46.

ТУНГУССКОЕ СОБЫТИЕ КАК ДЕТОНАЦИЯ ПРИРОДНОЙ ОБЪЕМНО-ДЕТЕНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Ю. А. Николаев, П. А. Фомин

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

Данное сообщение основано на работе [1], где путем экспериментального и физико-математического моделирования показано, что широко известное Тунгусское событие представляло собой детонацию тороидального облака, образованного разовым выбросом газогидратного метана в атмосферу. Детонация инициирована полого летевшим метеоритом, характерный размер которого составлял от нескольких до десятка метров, а его скорость к моменту инициирования замедлилась до нескольких километров в секунду.

Выяснена газогидратная природа выброса метана и указана область, откуда произошел выброс.

На основе решения обратной задачи движения метеорита рассчитаны его возможные траектории, не противоречащие фактическим данным и физическим законам, и сделана оценка его максимального размера. Определено вероятное место падения метеорита. Оно находится на расстоянии 20–100 км от эпицентра Тунгусского взрыва.

Вывал леса при Тунгусском взрыве моделировался взрывом тора из незамкнутого кольца, состоящего из детонирующих шнуров над “лесом” из проволочек. Общая масса взрывчатки – 25 г. Детонатор располагался в нижней части кольца. Разрыв в связке детонирующих шнуров составлял около 2 см. Диаметр и средняя высота кольца над поверхностью составляли 15 см и 19 см соответственно. Наклон плоскости кольца к горизонтали составлял 30°. Лес имитировался вертикально стоящими медными проволочками высотой 3 см и диаметрами 2.7 мм и 0.5 мм, расположенными в шахматном порядке (30×30 ячеек) с шагом 5 см. Из эксперимента и его статистической обработки следует, что вывал проволочек похож на реальную картину вывала леса не только чисто внешне (совпадение внешних контуров вывалов, наличие так называемых «телеграфного» леса и «обратного» вывала), но и эквивалентен ей статистически (наличие и величина общей «закрутки» вывала и т.д.).

Дано объяснение световым, акустическим и атмосферным явлениям (серебристые облака, озонный слой, магнитная буря), связанным с Тунгусским событием. Объяснено отсутствие значительного количества метеоритного вещества в области эпицентра. Проанализирована вероятность взрывов наподобие Тунгусского. Совокупность полученных результатов подтверждает рассматриваемую гипотезу, не противоречит известному фактическому материалу и физически корректно объясняет все особенности Тунгусского явления.

В [1] оценка массы горючего в облаке (200 кг), и, соответственно, его геометрических размеров, сделана из условия равенства энерговыделения при взрыве стехиометрической смеси метана с воздухом и характерной энергии Тунгусского взрыва, выраженной в тротиловом эквиваленте. Получено, что диаметр облака и высота его центра над поверхностью земли равнялись приблизительно 5–7 км. Угол его наклона к горизонту составлял порядка 30°. Если же эквивалентную массу метана в облаке определять по равенству давления в ударной волне от взрыва заряда ТНТ и детонации облака, то масса взорвавшегося при Тунгусском взрыве метана получится в несколько раз меньше, чем по оценке [1].

Список литературы

1. Николаев Ю. А., Фомин П. А. Тунгусская катастрофа как взрыв метано-воздушного облака, инициированного небольшим медленно летящим металлическим метеоритом // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47, № 2. С. 112–127.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ В КАНАЛЕ С ПЕРИОДИЧЕСКИ РАСПОЛОЖЕННЫМИ УГЛУБЛЕНИЯМИ

В. А. Шаргатов¹, А. П. Чугайнова², С. В. Горкунов¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

²Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва

Получено аналитическое решение задачи Римана для распада начального разрыва давления и плотности в прямоугольном канале с углублениями (прорезями) в стенках. Канал состоит из двух секций. В правой секции в нижней стенке канала имеются углубления прямоугольного сечения. В левой части канала нижняя стенка гладкая. В начальный момент времени газ покоится и давление в левой секции выше, чем в правой. В результате распада разрыва в левой секции канала возникает волна разрежения, а в правой части - ударная волна.

Аналитическое решение основано на ранее полученной в [1] эффективной ударной адиабате для канала с периодически расположенными барьерами. Эта задача также решена с помощью численного моделирования. Показано, что приближенное аналитическое решение правильно предсказывает скорость распространения лидирующего газодинамического разрыва. За лидирующим газодинамическим разрывом следует зона релаксации, в которой существуют длинноволновые и коротковолновые осцилляции потока, как показано на рис. 1. Коротковолновые возмущения возникают вследствие взаимодействия лидирующего скачка с боковой поверхностью прорези, а длинноволновые осцилляции вызваны циркуляцией волн сжатия и разрежения между нижней границей прорези и верхней стенкой канала. Приближенное аналитическое решение позволяет получить значения скорости лидирующего разрыва, параметров потока в конце зоны релаксации и сделать оценку минимального давления, при котором такая квазистационарная структура существует. Эти значения находятся в хорошем согласии с данными численного расчета.

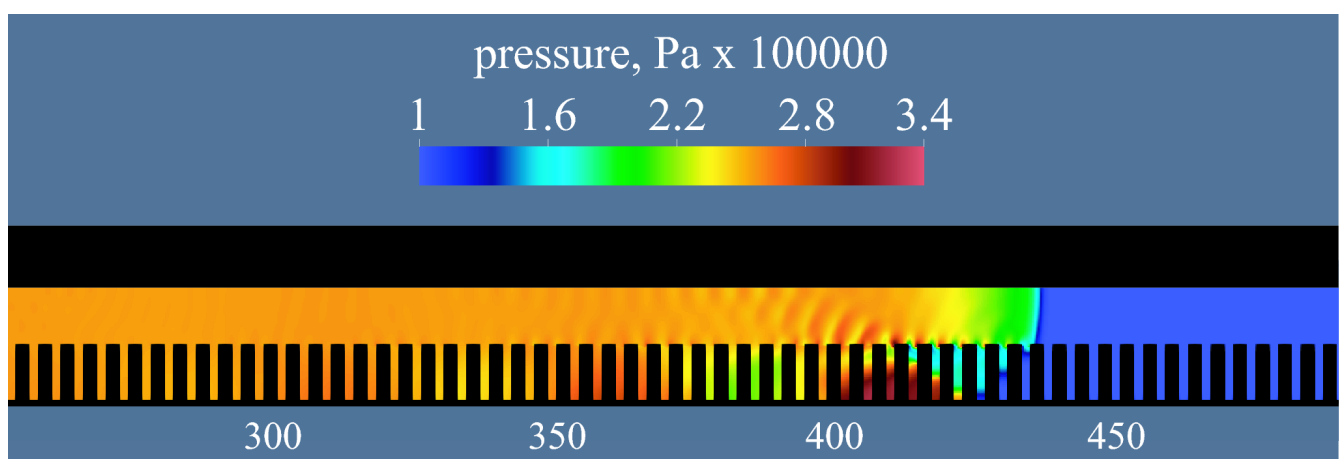


Рис. 1: Распределение давления при распространении ударной волны в канале с углублениями. Начальное давление в секции высокого давления 1 МПа, в секции низкого давления – 100 кПа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 16-19-00188).

Список литературы

1. *Shargatov V.A., Chugainova A.P., Gorkunov S. V. and. Sumskoï S. I.* Flow Structure behind a Shock Wave in a Channel with Periodically Arranged Obstacles. Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics. 2018.V.300. P.206-218.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ВОЛНЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗА НАГРЕТЫМ УЧАСТКОМ ИНЕРТНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Е. В. Манжос¹, Н. А. Какуткина¹, А. А. Коржавин¹, А. Д. Рычков²

¹Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск

²Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

Проведено численное моделирование нестационарного процесса фильтрационного горения газов (ФГГ) – инициирования волны ФГГ нагретым участком пористой среды. Рассмотрен процесс формирования волны горения. Установлено наличие пределов зажигания волн ФГГ по некоторым параметрам системы. Определена предположительная природа пределов зажигания.

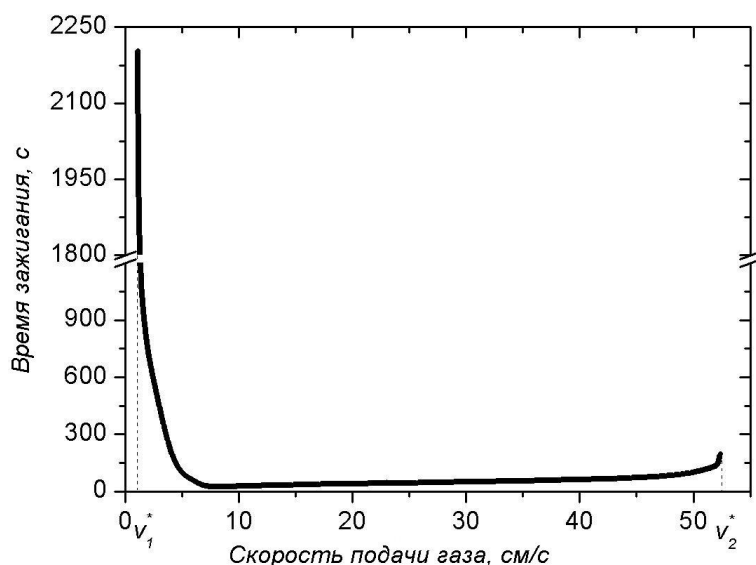


Рис. 1: Зависимость времени зажигания волны ФГГ от скорости подачи газа

Список литературы

1. Теория фильтрационного горения: общие представления и состояние исследований/ Алдушин А.П., Мержанов А.Г. // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988.
2. *Лаевский Ю.М., Бабкин В.С.* Фильтрационное горение газа// Распространение тепловых волн в гетерогенных средах / Ю.Ш.Матрос. – Новосибирск: “Наука”, 1988.
3. *Доброго К.В., Жданок С.А.* Физика фильтрационного горения газов. Минск: Национальная Академия наук Беларуси. Институт тепло-массообмена им. Лыкова А.В., 2002.

4. *Футыко С.И., Жданок С.А.* Химия фильтрационного горения газов. Минск: Беларуская навука. 2004.
5. Моделирование нестационарных процессов фильтрационного горения газа. Какуткина Н.А., Рычков А.Д. Физика горения и взрыва. 2010. Т.46. №3. С. 44–51.

УСТОЙЧИВОСТЬ СТРУКТУРЫ ОСОБЫХ РАЗРЫВОВ ДЛЯ ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ КОРТЕВЕГА-ДЕ ВРИЗА–БЮРГЕРСА

В. А. Шаргатов¹, А. П. Чугайнова²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

²Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва

Особые разрывы – это разрывы, на которых помимо соотношений, следующих из законов сохранения, должны выполняться также дополнительные соотношения, которые вытекают из требования существования структуры разрывов. К особым разрывам относятся, например, хорошо известные фронты горения в газах, разрывы со структурой в нелинейной теории упругости, слабонелинейные электромагнитные волны в слабоанизотропном диэлектрике, а также структуры образующиеся, когда газ, проходя через разрыв, приобретает или теряет теплопроводность в присутствии магнитного поля.

Обобщенное уравнение Хопфа является одним из самых простых уравнений, которое может иметь решения, содержащие ударные волны. Если функция потенциала $\varphi(u)$ имеет больше одной точки перегиба, то задача Римана о распаде разрыва для этого уравнения может иметь бесконечное несчетное множество автомодельных решений. В работе [1] для отбора разрывов, использовавшихся для построения решений уравнения Хопфа со сложной нелинейностью, выставлялось требование существования стационарной или периодической структуры разрывов. Структура разрывов описывалась обобщенным (в смысле нелинейности) уравнением Кортевега–де Вриза–Бюргерса.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \varphi(u)}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - m \frac{\partial^3 u}{\partial x^3}, \mu > 0, m > 0 \quad (1)$$

где, $\varphi(u) = (u - 1)^4 - (u - 1)$.

В [1] показано, что при $m > 0$ множество разрывов, обладающих стационарной структурой состоит из классических и особых разрывов. Число особых разрывов конечно для заданного значения коэффициента дисперсии, но может быть сколь угодно большим. Нами в [2] методом функции Эванса была изучена спектральная (линейная) устойчивость стационарных структур, описываемых обобщенным уравнением Кортевега–де Вриза–Бюргерса. Полученные результаты по исследованию устойчивости классических и особых разрывов дают основание выдвинуть следующие гипотезы. Спектрально устойчив только один особый разрыв, имеющий наименьшую скорость. Он является допустимым. Неособые разрывы, которые нельзя заменить последовательностью спектрально устойчивых разрывов и неопрокидывающихся простых волн, устойчивы и являются допустимыми, даже если не имеют стационарной структуры и спектрально неустойчивы. Неособые разрывы, которые могут быть заменены последовательностью спектрально устойчивых разрывов и неопрокидывающихся простых волн, всегда спектрально неустойчивы и всегда обладают распадной неустойчивостью.

Введение требования устойчивости структуры в понятие допустимости разрывов ликвидировало неединственность решения задачи о распаде произвольного разрыва, обнаруженную в предыдущих исследованиях. Впервые представлены аналитические решения для особых разрывов с немонотонной структурой.

Список литературы

1. А.Г. Куликовский, А.П. Чугайнова. Классические и неклассические разрывы в решениях уравнений нелинейной теории упругости. Успехи матем. наук, 2008, Т.63, №2. С. 85–152.
2. А.Т. Ильичев, А.П. Чугайнова, В.А. Шаргатов. Спектральная устойчивость особых разрывов. Докл. РАН. Матем. 2015. Т. 462. № 5. С. 512–516.

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ ВОДОРОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА OPENFOAM

А. И. Рыбников, Е. В. Симонов

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

В настоящее время рассматривается способ сжигания различных видов топлив в режиме непрерывной спиновой детонации (НСД) с поперечными детонационными волнами (ПДВ) [1]. В данной работе, на основе работы [2], в рамках трехмерной нестационарной газодинамической постановки сформулирована замкнутая модель непрерывной спиновой детонации для водородовоздушной смеси в кольцевой цилиндрической камере сгорания типа ЖРД. На входе в камеру, аналогично работе [2], задавался вдув горючей смеси через систему микросопел Лаваля, на выходе - условие нулевого градиента. В качестве начальных данных ставилась неподвижная стехиометрическая водородовоздушная смесь.

Для численного решения задачи о НСД впервые использован программный пакет OpenFOAM. Основные преимущества OpenFOAM: удобный синтаксис, открытый исходный код, многогранные возможности построения сеток, параллельные вычисления, наличие готовых к использованию моделей. Инициирование ПДВ происходило путем мгновенного увеличения давления и температуры в части камеры сгорания. На рис. 1 показана трехмерная структура течения в камере (изотермы). Видно, что перед ПДВ натекает треугольный слой свежей холодной смеси. Вниз от ПДВ отходит косая ударная волна – шлейф. Средняя за период скорость ПДВ $\langle D \rangle \approx 1.7$ км/с.

Таким образом, впервые проведены трехмерные расчеты НСД по схеме Годунова и модели химической кинетики Николаева [2]. Показана принципиальная возможность использования пакета OpenFOAM для решения трехмерных задач о НСД. Полученная скорость детонации меньше скорости идеальной детонации Чепмена-Жуге, $\langle D \rangle / D_{CJ} \approx 0.87$.

Список литературы

1. Быковский Ф.А., Ждан С.А. Непрерывная спиновая детонация. Новосибирск. Изд-во СО РАН, 2013, 423 с.

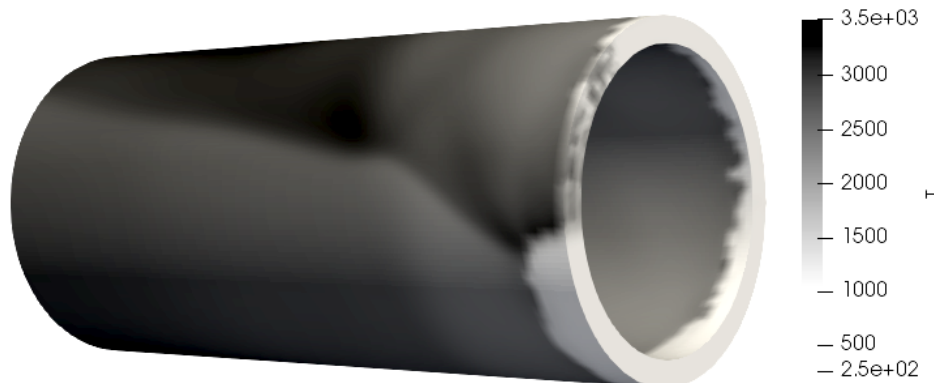


Рис. 1: Трехмерная структура течения в камере (изотермы).

2. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. Исследование непрерывной спиновой детонации водородокислородных смесей. 1. Камеры кольцевой цилиндрической геометрии. Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44. № 2. С. 32–45.

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО МЕТАНИЯ МАССИВНЫХ ТЕЛ

В. М. Фомин, В. И. Звезгинцев, Е. Я. Брагунцов

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

В настоящее время существует множество работ, посвященных методам разгона очень легких (с массой в несколько граммов) тел до огромных скоростей полета (десятки километров в секунду) с помощью легкогазовых баллистических установок [1, 2]. Исследования в области методов высокоскоростного метания массивных тел (с массой в десятки килограммов) сосредоточены в основном на совершенствовании традиционных артиллерийских систем, которые обеспечивают скорости не более 2 км/с.

В докладе рассматриваются современные идеи и конструктивные схемы газодинамических методов разгона, которые в принципе позволяют достичь скоростей 3 – 4 км/с при массе разгоняемых тел в 10 – 20 кг. Формулируются научно-технические проблемы и направления их исследований.

Список литературы

1. Голубятников А.Н., Леонтьев Н.Е., Пилюгин Н.Н. Методы повышения эффективности легкогазовых баллистических установок. Успехи механики, т.2, №2, 2003. - с. 97-125.
2. Мерзиевский Л.А., Титов В.М., Фадеенко Ю.И., Швецов Г.А. Высокоскоростное метание твердых тел. Физика горения и взрыва, 1987, т. 23, № 5, с. 77-91.

6 Задачи промышленности и безопасность

ЦЕПНАЯ ПРИРОДА ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА МЕТАНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ И ВОЗДЕЙСТВИЕ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПРИСАДОК

В. В. Азатьян¹, А. А. Трубицын², Н. В. Трубицына²

¹*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мерджанова, Черногловка*

²*ОАО "НЦ ВостНИИ Кемерово"*

I. Однозначными показателями цепной природы горения и взрыва углеводородов, а также многих других газов являются:

1. Характеристические времена реакций, составляющие тысячные доли секунды в режиме горения и десятки микросекунд в режиме взрыва. Модели же реакции только валентно-насыщенных соединений, принятой в тепловой теории горения, соответствуют времена, на несколько порядков больше реальных времен.

2. Сильное и селективное влияние малых примесей многих соединений на скорость и на критические условия горения.

3. Наличие в зоне пламени свободных атомов и радикалов в концентрациях на несколько порядков превышающих равновесные значения при температурах горения.

II. Скорость реакции цепного горения находится в экспоненциальной зависимости от концентраций исходных реагентов и от констант скорости их реакций. Это обеспечивает сильное и не аддитивное влияние малых примесей на все характеристики горения и взрыва, а также наблюдаемую чрезвычайно сильную зависимость от температуры. Используемая же в традиционной тепловой теории горения функция Аррениуса относится только к константе скорости и принципиально не применима к скорости реакции. Этой функции принципиально отличной от реальной температурной зависимости скорости, соответствует несравненно более слабая температурная зависимость, не способная обеспечить горение.

III. В силу сказанного в предыдущем пункте, смеси малых присадок ингибиторов и инертных газов позволяют предотвратить возгорание и взрыв метано-воздушных смесей. В докладе приводятся и обсуждаются иллюстрации экспериментальными данными. Некоторые экспериментальные иллюстрации приведены также в предыдущих публикациях авторов.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Т. В. Гоффарт

ООО НПФ «Гранч», Новосибирск

Современные нормативные документы обязывают угольные шахты иметь многофункциональную систему безопасности (МФСБ), которая должна обеспечивать мониторинг и предупреждение условий возникновения опасностей геодинамического, аэрологического и техногенного характера; оперативный контроль соответствия технологических процессов заданным параметрам; применение систем противоаварийной защиты людей, оборудования и сооружений. Но зачастую на местах принимаются формальные меры для выполнения предписаний и требований надзорных органов, сосредотачиваются на проблемах вывода людей при аварии

и поиска пострадавших, и упускается тот важный момент, что главной задачей является не ликвидация аварий и их последствий, а недопущение их возникновения.

Большую актуальность сегодня имеет риск-ориентированный подход к обеспечению безопасности в угольной отрасли. Стремясь свести показатель травматизма к нулю, угледобывающие предприятия оснащают производство самой современной автоматикой, пытаются минимизировать человеческий фактор, проводят обучение персонала, ведут контроль нарушений, но, тем не менее, аварии случаются.

Уже сегодня на отечественном рынке есть МФСБ, не просто удовлетворяющие нормативным требованиям, но и способные действительно прогнозировать аварийные ситуации и позволяющие принять меры по предотвращению аварии заблаговременно. Примером такой системы может служить комплекс «Умная шахта» производства ООО НПФ «Гранч», г. Новосибирск. В России создана уникальная технология сканирующего газового анализа, позволяющая собирать данные для прогноза возникновения пожара, взрыва и детонации на опасных производственных объектах, а также заблаговременного оповещения персонала шахты. Технология успешно применяется с 2010 года и позволяет оперативно реагировать на возникновение опасных концентраций метана и принимать меры по предотвращению возникновения аварийных ситуаций. Благодаря этой технологии на шести угольных шахтах Кузбасса в течение последних восьми лет собирается огромное количество статистических данных о распределении метана в горных выработках шахт. Однако, на сегодня отсутствует методология и программно-аппаратные средства для комплексного анализа получаемых данных и формирования прогноза возникновения динамических явлений. Актуально также проведение работ по созданию законодательной основы общегосударственного использования системы прогноза возникновения пожаров, взрывов, детонации на основе технологии сканирующего газового анализа, а также работ по совершенствованию существующих нормативных требований к МФСБ и ее подсистемам.

Комплекс «Умная шахта» является расширяемым - его архитектура позволяет легко наращивать функционал для решения широкого круга задач по предупреждению аварий, в том числе:

- анализ статистики по нескольким газам и прогноз газодинамических явлений;
- обнаружение места вспышки, оперативное управление действием систем контроля и управления средствами взрывозащиты;
- обнаружение нагретых механизмов и отслеживание износа оборудования для своевременной замены узлов (деталей) резервными.

Все эти задачи являются актуальными для реализации возможности предотвращения аварий на опасных производственных объектах и могут быть использованы не только в сфере угледобычи.

Список литературы

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах». – Серия 05. – Выпуск 40. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. – 200 с.
2. ГОСТ Р 55154-2012 «Оборудование горно-шахтное. Системы безопасности угольных шахты многофункциональные. Общие технические требования»: введ. 22.11.2012. – М.: Стандартинформ, 2013.
3. Гоффарт Т.В., Новиков А.В., Паневников К.В. Сканирующий (динамический) газовый контроль в угольных шахтах, журнал «Безопасность труда в промышленности» №6, 2017, С. 59.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЕРТИЗАЦИИ РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ В ВЫРАБОТКАХ АВАРИЙНОГО УЧАСТКА УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

*В. Н. Костеренко¹, Д. Ю. Палеев², О. Ю. Лукашов², И. М. Васенин³, Э. Р. Шрагер³,
А. Ю. Крайнов³*

¹*Сибирская угольная энергетическая компания, Москва*

²*Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, Кемерово*

³*Томский государственный университет, Томск*

Представлена физико-математическая модель инертизации рудничной атмосферы в выработках аварийного участка угольной шахты [1]. Модель основана на пространственных нестационарных уравнениях газовой динамики в пористом пространстве обрушенной среды выработанного пространства. Приведен пример расчета инертизации обрушенного пространства с использованием генератора инертных газов ГИГ-3000.

Математическое описание трехмерного нестационарного течения инертного газа от генератора инертных газов и рудничной атмосферы в выработанном пространстве угольной шахты проведено при следующих основных допущениях: Течение газа описывается пространственными уравнениями газовой динамики в неподвижном пористом пространстве обрушенной среды выработанного пространства угольной шахты. Горения метана и угля в выработанном пространстве нет. Температура газовой смеси равна температуре обрушенной среды. Оценки показывают, что из-за большой теплоемкости обрушенной среды и развитой поверхности теплообмена газ быстро приходит в температурное равновесие с материалом каркаса пористой среды. Материал обрушенной среды абсолютно жесткий, закрытая пористость отсутствует. Вязкость проявляется только в процессе силового взаимодействия газовой смеси и материала обрушенной среды. Характеристики обрушенной среды (пористость, коэффициент сопротивления) изменяются непрерывно (разрывы этих характеристик внутри среды отсутствуют). Тепло, возникающее за счет работы сил сопротивления среды при вязком обтекании ее частиц, полностью возвращается в газ.

На основе разработанной модели проведено численное моделирование аэрогазодинамических процессов при инертизации рудничной атмосферы в обрушенной среде выработанного пространства. Получена нестационарная динамика вытеснения рудничной атмосферы из пористого обрушенного пространства выработки.

Разработанная математическая модель аэрогазодинамических процессов в выработанных пространствах и выработках шахты позволяет прогнозировать динамику инертизации рудничной атмосферы в обрушенной среде выработанного пространства. Поэтому при разработке схем инертизации рудничной атмосферы и проведении работ целесообразно проводить предварительное компьютерное моделирование аэрогазодинамических процессов при инертизации.

В настоящей работе использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 8.2.09.2018 Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

Список литературы

1. *Пучков Л.А.* Аэродинамика подземных выработанных пространств. Изд-во МГГУ, 1993.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЕНТИЛЯЦИИ ШАХТЫ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПОЖАРА

*В. Н. Костеренко¹, Д. Ю. Палеев², О. Ю. Лукашов², И. М. Васенин³, Э. Р. Шрагер³,
А. Ю. Крайнов³*

¹Сибирская угольная энергетическая компания, Москва

²Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, Кемерово

³Томский государственный университет, Томск

Разработана газодинамическая модель нестационарных процессов вентиляции сети горных выработок угольной шахты, учитывающая тепло- и массообмен потоков рудничной атмосферы со стенками выработок, конвективный перенос примесей метана в рудничной атмосфере, тепловыделение в областях, охваченных пожаром, естественно-конвективное движение рудничной атмосферы в поле силы тяжести при неоднородном распределении плотности и температуры газа, реальную топологию сети горных выработок, работу вентиляционного оборудования.

Математическая модель основана на предположениях об одномерном движении газа в прямолинейных выработках, полном и мгновенном перемешивании потоков в узлах сопряжения прямолинейных выработок. Эффекты турбулентной вязкости и теплопроводности учитываются в уравнениях в правых частях с использованием интегральных коэффициентов аэродинамического сопротивления горных выработок и мест их пересечения, которые подробно изучены экспериментально. В математической модели учитываются эффекты естественной конвекции неизотермического газа при его движении в наклонных выработках. Для прогнозирования влияния естественной конвекции на аэродинамику рудничной атмосферы в сети выработок учитывается теплообмен рудничной атмосферы со стенками выработок, а также изменение температуры стенок при теплообмене. Неоднородное распределение легких примесей в рудничной атмосфере приводит к естественно-конвективному движению в наклонных выработках, которое также учитывается в математической модели. Процессы вентиляции определяются пространственной топологией выработок и расстановкой и режимами работы вентиляционного оборудования (вентилятора главного проветривания, вентиляторов местного проветривания, газоотсасывающих установок, вентиляционных сооружений, располагающихся в выработках шахты).

Разработана методика расчёта нестационарных процессов вентиляции сети горных выработок угольной шахты с учетом работы вентиляционного оборудования, и программа ЭВМ. Проведено численное моделирование развития локального очага пожара. Локальный очаг возгорания в наклонной выработке угольной шахты приводит к опрокидыванию воздушного потока в течение малого промежутка времени; направление развития пожара от локального возгорания определяется направлением потока горячих газообразных продуктов сгорания. Расстановкой вентиляционных сооружений и изолирующих перемычек в местах, примыкающих к выработке, в которой происходит горение, возможно управлять скоростью распространения пожара и направлением распространения газообразных продуктов сгорания в сети выработок угольной шахты при возникновении и развитии пожара [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-48-700732 р_а.

Список литературы

1. Васенин И.М., Костеренко В.Н., Крайнов А.Ю., и др. Газодинамический метод расчета нестационарных нормальных и аварийных режимов проветривания шахты // Пожарная безопасность. 2018. № 1. С. 32–41.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ СЛАНЦЕВОГО ПЛАСТА

А. Г. Князева¹, А. Л. Маслов²

¹*Томский Политехнический университет, Томск*

²*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск*

Внутрипластовая термическая переработка горючих сланцев является перспективным способом переработки горючих сланцев, так как не требует извлечения породы на поверхность. Образующаяся смесь газообразных и жидких продуктов, представляет ценность как энергетическое и химическое сырье.

Разработана математическая модель процесса термического разложения сланцевого пласта [1-2], состоящая из уравнений теплопереноса для твердой фазы и газа, уравнений химической кинетики, уравнения движения и уравнения состояния. В модели учтены межфазный тепло- и массообмен, тепловые эффекты химических реакций и другие физические явления. Так как точный состав продуктов разложения точно неизвестен, то неизвестно и точное значение коэффициента концентрационного расширения, который вычисляется через мольные объемы компонентов смеси, поэтому варьировать этот параметр можно в сравнительно широких пределах. При этом концентрационное расширение способное изменить характер течения в порах и качественно повлиять на ход процесса. Таким образом, конкретный вид уравнения состояния важен для правильного определения поля скоростей продуктов разложения и распределения их концентрации на позднейших стадиях разложения.

Список литературы

1. *Князева А.Г., Мартынянов С.М., Маслов А.Л.* A two-phase model of shale pyrolysis. Fuel. 2018. V.228. P. 132–139.
2. *Маслов А.Л., Князева А.Г.* Идентификация параметров модели термического разложения горючих сланцев. Химическая физика и мезоскопия. 2017. Т. 19, № 3. С. 371–378.

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ИСПЫТАНИЙ АППАРАТУРЫ НА ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ УДАРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

С. А. Орлов¹, К. А. Матвеев², Г. И. Расторгуев²

¹*АО ИСС имени М.Ф. Решетнева, Железногорск*

²*ФГБОУ ВО Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск*

Одной из проблем при отработке аппаратуры летательных аппаратов (ЛА) (например, космических аппаратов) остается воспроизведение высокоинтенсивных ударных воздействий. Источником таких воздействий является срабатывание различных пиротехнических устройств ЛА [1,2]. Требования задаются, как правило, в виде ударных спектров, ускорений [1-3], а основное испытательное оборудование ориентировано на создание одиночных импульсов ускорений [4]. Использование копровых стендов с падающими столами приводит к значительному

перегрузению аппаратуры (до 3-4 раз), т. к. вместо нестационарной вибрации, возникающей в месте установки аппаратуры на ЛА создается одиночный импульс ускорений [5]. При этом отечественная нормотивно – техническая литература не рекомендует использование копровых стендов для ударных испытаний чувствительной к таким воздействиям аппаратуры (аппаратура, включающая в свой состав, микропереключатели, кварцевые генераторы, многослойные платы и т. д.) [6].

Предлагаемый выход из сложившейся ситуации заключается в следующем: на этапе разработки программно-методической документации проводится численное моделирование ударных испытаний и рекомендуется метод проведения ударного нагружения (тип стенда), затем на динамическом макете аппаратуры отрабатывается методика испытаний. При необходимости в состав применяемого стенда вводятся дополнительные резонансные устройства. Например, установка на ударный стенд К200 дополнительной резонансной плиты позволяет проводить испытания аппаратуры созданием нестационарной вибрации.

В докладе приводятся примеры испытаний различной аппаратуры на копровых стендах, на пиротехнических стендах и стендах с падающими столами.

Список литературы

1. Product verification requirements for launch, upper-stage and space vehicles. MIL-STD-1540D, 15 January, 1999. – 308p.
2. *Adriano Calvi* “Spacecraft Loads Analysis” ESA / ESTEC, Noordwijk, The Netherlands November 21, 2011-126p.
3. Pyroshock test criteria. NASA-STD-7003 may 18, 1999.-26p.
4. *S.A. Orlov, K.A. Matveev and G.I. Rastorguev* Rationing and shock testing on-board equipment of spacecrafts// IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 894 (2017) 012131
5. ECSS-E-HB-32-25A. Space engineering. Mechanical shock design and verification handbook. 14 July 2015 – 541p.
6. ОСТ 92-5100–2002. Аппаратура космических комплексов. Общие технические условия. Федеральное космическое агентство, 2002. 174 с.

ВЗРЫВНЫЕ КАМЕРЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ЭКРАНАМИ

Ю. П. Мещеряков¹, А. А. Штерцер², Б. С. Злобин¹

¹Конструкторско-технологический филиал Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

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

Разрабатываемые в КТФ ИГиЛ СО РАН взрывные камеры (ВК) для утилизации элементов боеприпасов и других применений, когда при подрыве зарядов могут разлетаться твердые фрагменты экспериментальных сборок, отличаются наличием металлических экранов для защиты оболочек взрывных камер (ВК) от повреждений осколками и снижения нагрузок на элементы конструкции ВК [1-3]. В настоящее время уже разработан ряд конструкций ВК с экранами, примеры которых приводятся в докладе. Опыт эксплуатации взрывных камер с

различными защитными экранами показывает, что параметры толщин и остаточных зазоров могут принципиально менять поведение экранов под воздействием взрывных нагрузок и как следствие влиять не только на их собственный ресурс, но и ресурс оболочки. Полученная в ходе эксплуатации камер информация ставит ряд значимых вопросов: выявление всех возможных режимов работы экранов, установление существования границ допустимых величин толщин и остаточных зазоров, определение потенциальных возможностей экранов влиять на ресурс оболочки в различных режимах работы.

Для ответа на поставленные вопросы проведены численные исследования зависимостей величин остаточных зазоров, эквивалентных напряжений в защитных экранах и оболочках взрывных камер от толщин стенок, марок применяемых сталей и величин начальных зазоров. В результате выполненных расчетов выявлены границы допустимых значений, в рамках которых должны находиться величины толщин экранов и пределы упругости сталей с целью предотвращения возникновения нежелательного режима биений. Получено, что бесконтактный режим обеспечивает меньший уровень напряжений в оболочке ВК. С другой стороны, использование тонких экранов, выполненных из марок сталей с меньшим пределом упругости, чем применяемые для изготовления оболочек ВК может, причем без существенного повышения уровня напряжений в оболочке ВК, предоставить преимущества в обслуживании и проведении ремонтных работ.

Список литературы

1. Демчук А.Ф., Исаков В.П. Металлические взрывные камеры: монография. Красноярск: Издательский дом Красноярского государственного университета, 2006.
2. Shtertser A., Stoyanovskii O., Zlobin B., Meshcheryakov Yu., Skorniyakov Yu. Designing and manufacturing of explosion chambers for scientific research and explosive working of materials. Archives of Metallurgy and Materials. 2014. V. 59. issue 4. P. 1619-1624.
3. Stoyanovskii O. I., Zlobin B. S., Shtertser A. A., Meshcheryakov Yu. P. Metal explosion chambers: designing, manufacturing, application. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2017. V. 894. 012091.

ВЛИЯНИЕ ВЫХОДА ЛЕТУЧИХ КОМПОНЕНТОВ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ АЭРОВЗВЕСИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

К. М. Моисеева, А. Ю. Крайнов

Томский государственный университет, Томск

В докладе представлены результаты численного решения задачи о скорости горения аэровзвеси угольной пыли в зависимости от размера и массовой концентрации частиц и содержания летучих компонентов в частицах. Математическая постановка задачи основана на двухфазной, двухскоростной модели реагирующей газодисперсной среды. Метод решения основан на методе распада произвольного разрыва С. К. Годунова для газа и алгоритма распада разрыва в среде, лишенной собственного давления, для частиц.

Метод решения и основные допущения математической модели описаны в работе [1]. Задача [1] дополнена учетом выхода летучих компонентов из частиц и решалась для плоского

очага зажигания с целью корректного определения видимой и нормальной скорости распространения фронта горения. Кинетические параметры аэровзвеси угольной пыли представлены в работе [2]. Радиус частиц в расчетах варьировался в диапазоне $5 \cdot 10^{-7}$ до $2 \cdot 10^{-6}$ м, масса частиц варьировалась в диапазоне $0.1 \div 0.4$ кг/м³ (соответствует избытку горючего в смеси), массовое содержание летучих компонент в частицах задавалось равным $0.1 \div 0.3$. Видимая скорость перемещения фронта горения определялась по изменению координаты x , в которой значение парциальной плотности окислителя ρ_{O_2} составляло 0.1 от начального значения, $\rho_{O_2} = \rho_{O_2,b}$. Нормальная скорость горения определялась как разность между видимой скоростью перемещения фронта и скоростью движения газа. Некоторые результаты расчета представлены на рис.1–2.

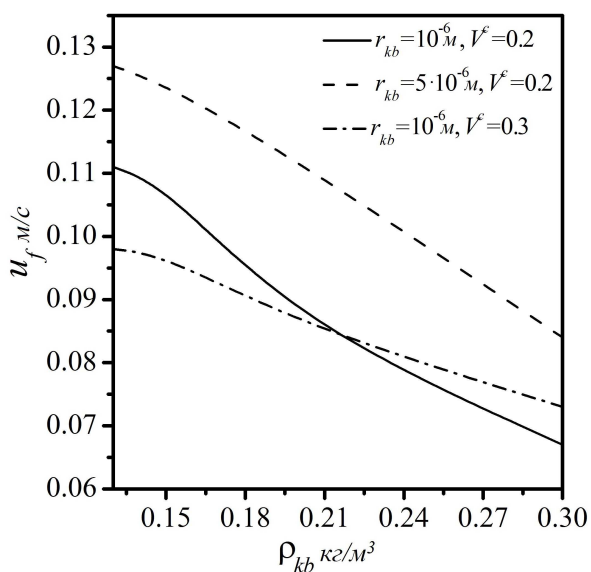


Рис. 1: Зависимость видимой скорости горения аэровзвеси угольной пыли от параметров частиц

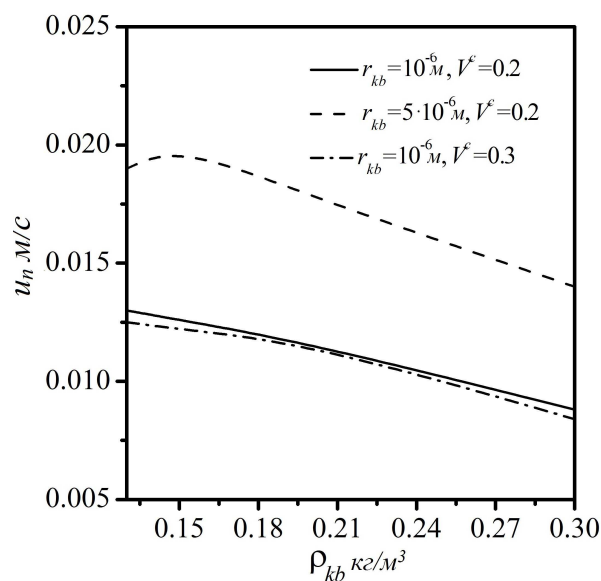


Рис. 2: Зависимость нормальной скорости горения аэровзвеси угольной пыли от параметров частиц

Исследование выполнено за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект №16-33-60091 мол_а_дк).

Список литературы

1. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю. Численное моделирование искрового зажигания аэровзвеси угольной пыли // ФГВ. 2018. Т. 54, № 2. С. 61–70.
2. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю. Влияние состава угольной пыли на скорость распространения фронта горения по аэровзвеси с неоднородным распределением частиц // КИМ. 2018. Т. 10, № 2, С. 221–230.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЗАЖИГАНИЯ БИДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ В ВОЗДУХЕ

К. М. Моисеева, А. Ю. Крайнов, А. А. Дементьев

Томский государственный университет, Томск

В докладе представлены результаты численного решения задачи искрового зажигания бидисперсного порошка алюминия. Целью работы являлось определение критических условий зажигания порошка алюминия в зависимости от размера и массовой концентрации частиц, а также процентного содержания крупных и мелких частиц в порошке.

Постановка задачи основана на физико-математических постановках [1, 2] и формулировалась для следующих допущений. Предполагается, что в воздухе равномерно распределена бидисперсная взвесь порошка алюминия с общей массовой концентрацией частиц m_{dust} , начальным размером частиц $r_{Al,1}^0$ и $r_{Al,2}^0$. Нитевидный мгновенный источник зажигания расположен в центре. Внешняя граница расчетной области полагается бесконечно удаленной от источника зажигания. Потерями тепла на электроды пренебрегается. Коэффициенты диффузии и теплопроводности газа зависят от температуры [1]. Горение частиц алюминия описывается на основе экспериментальных данных [3], воспламенение частицы алюминия происходит при достижении ею температуры зажигания T_{kz} . Скорость гетерогенной химической реакции на частицах описывается с учетом массоотдачи. Учитывается тепловое и динамическое взаимодействие между частицами и газом. Полагается, что при горении частицы алюминия радиус алюминия в частице $r_{Al,i}$ уменьшается, радиус самой частицы $r_{k,i}$ растет за счет нарастания оксидного слоя. До начала химических реакций в частице полагается, что $r_{k,i} = r_{Al,i}^0$. Математическая модель основана на двухфазной двухскоростной модели реагирующей газодисперсной среды и определяется системой уравнений сохранения массы, импульса, полной энергии газа (с учетом теплопроводности) и частиц с учетом химической реакции на поверхности, уравнений сохранения массы компонентов газовой смеси с учетом их диффузии и выгорания и уравнения выгорания частиц. Метод решения системы уравнений математической модели подробно представлен в [1].

В расчетах варьировались: радиус частиц от $5 \cdot 10^{-7}$ м до $11 \cdot 10^{-6}$ м, общая масса частиц в диапазоне от 0.1 до 0.4 кг/м³ и процентное соотношение между фракциями частиц. Из расчетов получены зависимости минимальной энергии искрового зажигания от процентного содержания частиц радиуса $5 \cdot 10^{-7}$ м и частиц второй фракции. Определено, что зависимости имеют нелинейный вид.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20011).

Список литературы

1. Моисеева К.М., Крайнов А.Ю. Численное моделирование искрового зажигания аэровзвеси угольной пыли // ФГВ. 2018. Т. 54, № 2. С. 61–70.
2. Порязов В.А., Крайнов А.Ю., Крайнов Д.А. Математическое моделирование горения пороха Н с добавлением порошка алюминия // ИФЖ. 2015, Т. 88, № 1. С. 93–101.
3. Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Коротков А.И. О горении и воспламенении частиц мелкодисперсного алюминия // ФГВ. 1968. Т. 4, № 3. С. 323–329.

О ВЗРЫВЧАТОСТИ СУЛЬФИДНЫХ РУД В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

А. В. Пинаев, А. А. Васильев

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

В шахтах возможны взрывы угольной, серной и сульфидной пыли, наименее взрывоопасна сульфидная пыль. Воспламенение пылей может происходить от теплового и механического действия ударных волн (УВ) и разлетающихся продуктов детонации ВВ. Вероятность взрыва возрастает с уменьшением размера частиц до 100-10 мкм. Для выяснения степени реагирования и возможности самовозгорания руд при повышенных температурах обычно проводят длительное по времени термогравиметрическое исследование их окисления. Воспламенение и взрывчатость аэровзвесей сульфидных руд при кратковременном ударноволновом нагреве практически не изучены. В настоящей работе дополнительно к термогравиметрическому анализу окисления исследована взрывчатость аэровзвесей богатой, медистой и вкраплённой руд с размером частиц 1-5 мкм при воздействии на них УВ и продуктов газовой детонации. Для всех образцов руд определён атомарный (элементный) состав и массовый процентный состав химических соединений с целью выяснения их изменения на поверхности частиц.

Среднеобъёмная плотность ρ_s взвесей руд изменялась от 40 до 450 мг/л. Температура за фронтом УВ превышала температуру воспламенения сульфидов железа (700-920 К), в продуктах газовой детонации температура около 4000 К. В падающих УВ не зарегистрировано воспламенение пыли непосредственно за передним ударным фронтом. При малой величине ρ_s свечение отсутствовало и в отражённых волнах. Свечение в пылевом облаке появлялось при большей ρ_s в отражённых волнах, что связано с наличием химических реакций, но это не приводило к возникновению самоподдерживающихся детонационных режимов. Взвеси руд в наших опытах также не проявляют склонность к взрыву при воздействии продуктов детонации газовой смеси.

В исследованных рудах преобладает пирротин (Fe_7S_8). В богатой руде его по массе больше 60%, после ударно-волнового воздействия выгорание пирротина достигает 27% масс. Сульфид железа FeS (менее 2% масс.) и сера сгорают в поверхностном слое частиц полностью. Опыты по динамическому нагреву богатой руды показали, что температура взрывного самовоспламенения пирротина превышает 920 К (это примерно на 220 К выше, чем для сульфидной пыли). Высокой температурой самовоспламенения пирротина и наличием реакций в тонком поверхностном слое частиц объясняется крайне низкая способность к взрывному воспламенению руд. Медистая и вкраплённая руды гораздо слабее, чем богатая руда, реагируют с кислородом воздуха. Увеличение начальной температуры руды до 45-50°C и начального давления до 0.12-0.15 МПа не вызывает разложение пирротина и горение серы.

Содержание серы в представленных образцах богатой руды составляет примерно 32% масс., в остальных рудах (вкраплённой, медистой) содержание серы примерно в 6 раз меньше. Все исследованные образцы руд не могут быть отнесены к категории взрывоопасных, поскольку содержание серы в рудах меньше 35% (ГОСТ 8606-93 (ИСО 334-92)). Ударные волны в аэровзвесах руд затухают, самоподдерживающиеся режимы детонации не обнаружены. Аэровзвеси руд с частицами размером 10-100 мкм будут химически ещё более инертными по сравнению с исследованными мелкодисперсными взвесями.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИНГИБИРУЮЩИХ СОСТАВОВ И УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА ВОЗГОРАНИЕ И ВЗРЫВ МЕТАНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

В. В. Азатян¹, С. К. Абрамов¹, В. М. Прокопенко¹, А. А. Трубицын², Н. В. Трубицына², Ю. М. Филатов²

¹*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова, Черногоровка*

²*ОАО "НЦ ВостНИИ Кемерово"*

Проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование влияния экологически чистых ингибиторов: трифторметана (фреона 23) и его смесей с азотом, на возгорание и распространение пламени метано-воздушных смесей при наличии угольной пыли четырех разных марок, а также в отсутствии пыли. В различных исследованиях авторов реакции проводились на экспериментальных и испытательных стендах с реакционными объемами до 43 м³ и разной формы при давлениях 1–6 атм. В данной работе приводятся в основном результаты воздействия комбинированных ингибиторов при наличии и в отсутствии угольной пыли. Горение инициировалось искрой с энергией разряда 3,6 Дж.

Экспериментально показано, что в хорошем согласии с выводом разработанной теории, горение метано-воздушных смесей протекает только при активном участии свободных атомов и радикалов, вступающих в быстрые цепные реакции с молекулами метана и кислорода. Установлено, что присадки трифторметана подавляют горение и предотвращают возгорание как в отсутствии угольной пыли, так и в ее присутствии. В отличие от влияния инертных газов, влияние трифторметана обусловлено именно его участием в обрыве реакционных цепей, чем и определяется несравненно более сильное воздействие этого фреона по сравнению N₂, CO₂ и CF₄. Полученные авторами результаты по воздействию фреона 23 подтверждены многочисленными испытаниями в различных организациях.

Измерения показали, что угольная пыль расширяет концентрационную область воспламенения метано-воздушных смесей, значительно интенсифицирует горение. В смесях, содержащих 7–12 % метана, угольная пыль всех изученных марок переводит процесс в режим прогрессивного самоускорения, ведущего ко взрыву.

Предсказан и использован эффект не аддитивного усиления совместного влияния фреона 23 и инертных газов на горение. Использование этого эффекта – синергизма, позволяет сильно уменьшить необходимое количество ингибитора. При содержаниях ингибиторов, ниже тушащей концентрации горение протекает пассивно.

В целях предупреждения вспышек метановоздушной смеси и предупреждения эндогенных пожаров в угольных шахтах были проведены исследования и осуществлены разработки основных элементов комплексной технологии нейтрализации метана во всех возможных местах его скопления (призабойная зона проходческих и очистных забоев, кутковые зоны, выработанное пространство очистных забоев, локальные места выделения метана при ведении горных работ).

Разработан способ предотвращения воспламенения метановоздушной смеси, включающий пневмогидроорошение зоны проведения горных работ, автоматический контроль содержания метана датчиками и введение в шахтную атмосферу ингибитора (защищены патентами РФ как способ в целом, так и автоматическая система пневмогидроорошения и ингибирования взрывоопасной метановоздушной смеси и ее отдельные элементы).

Совместно с новосибирскими учеными ФГБУН «Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН» ведется проработка элементов системы пылевзрывозащиты горных выра-

боток, которая будет сочетать в себе комбинацию подходов как сланцевой инертизации, так и газового ингибирования взрывоопасных сред.

В настоящее время проводится разработка технологии автоматической локализации и гашения взрыва пылеметановоздушной смеси, которая включает в себя следующий комплекс необходимых работ:

- Исследование и разработка комплекса безопасных средств инициирования взрывчатых веществ для предотвращения вспышек пылеметановоздушной смеси.
- Разработка и опытно-промышленные испытания автоматических взрыволокализирующих заслонов для предотвращения распространения взрывного горения пылеметановоздушной смеси в горных выработках угольных шахт.
- Разработка и опытно-промышленные испытания автоматической системы предотвращения взрыва пылеметановоздушной смеси на базе комбинированных модулей с использованием данной системы на взрывоопасных участках угольных шахт.
- Создание производственной базы по организации производства и сервисному обслуживанию комплекса безопасных средств инициирования взрывчатых веществ для предотвращения вспышек пылеметановоздушной смеси, автоматических взрыволокализирующих заслонов и автоматической системы предотвращения взрыва пылеметановоздушной смеси (комбинированный автоматический модуль для предотвращения взрыва пылеметановоздушной смеси).

Разработка и внедрение указанной инновационной технологии обусловит снижение развития взрыва пылеметановоздушной смеси, приведет к ограничению распространения взрыва по сети горных выработок, что, в свою очередь, предотвратит гибель работников угольных шахт.

7 Обработка и синтез материалов при динамическом воздействии

ПОЛУЧЕНИЕ, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОЗОЛЕЙ И ГЕЛЕЙ ДЕТОНАЦИОННОГО НАНОАЛМАЗА

А. Е. Алексенский, А. Я. Вуль, А. Т. Дидейкин, А. В. Швидченко, Е. Б. Юдина

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

Как хорошо известно, детонационный наноалмаз, получаемый как конденсированный продукт при детонации взрывчатых веществ с отрицательным кислородным балансом, содержит алмазные нанокристаллы со средним размером порядка 5 нм, что определяется, например рентгеновским методом. С другой стороны, микроскопические и гидродинамические измерения размеров частиц показывают размеры не ниже 15-30 нм. Эти сложные частицы назвали агломератами. Таким образом, была сформулирована проблема получения коллоидных растворов, содержащих свободные 5 нм алмазные частицы, и наши исследования в значительной степени были сконцентрированы на решении этой проблемы. Первоначально агломерация детонационного наноалмаза связывалась с высоким уровнем загрязнений промышленных продуктов, однако, по мере развития методов очистки наноалмаза стало ясно, что проблема деагломерации носит более фундаментальный характер.

Впервые эта задача была решена методом помола агломерированных частиц с помощью шариков из окиси циркония, впоследствии были разработаны еще два чисто химических метода деагломерации, включающие предварительную очистку, отжиг на воздухе или в водороде, обработку ультразвуком и последующее отделение гидрозоля от остатка центрифугированием. В нашей недавней работе [1] было предложено объяснение строения прочных агломератов наноалмаза, объяснен механизм их разрушения и обоснована электростатическая природа стабильности получаемых гидрозолей.

Свойства гидрозолей и гидрогелей деагломерированного наноалмаза сильно отличаются от свойств обычного наноалмаза, в частности для них характерно высокое поглощение света и неограниченная по времени агрегативная устойчивость.

Нами было также продемонстрировано [2], что при сгущении гидрозолей отдельных частиц ДНА образуются гидрогели. Порог гелеобразования равен около 4,5–5.0 % в зависимости от знака заряда поверхности частиц. При этом, в отличие от гелей на основе SiO_2 , образование геля наноалмаза является обратимым. Это явление объясняется образованием цепочек из частиц наноалмаза при их взаимной ориентации, поскольку частицы имеют хотя и высокую, но не сферическую симметрию.

Получение свободных наночастиц сделало возможным использование их в системах доставки лекарств (drug delivery) и конструирование сложных частиц для этой цели и других специализированных применений (радио и магнитотерапия, томография). При этом была решена практически важная задача стабилизации алмазных наночастиц в физиологическом растворе.

Кроме этого, разработан еще целый ряд применений гидрозолей и гелей свободных частиц детонационного наноалмаза.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного фонда (код проекта 14-13-00795-П «Синтез оптически активных материалов на основе наноалмазов, модифицированных ионами 3d – 4f элементов»).

Список литературы

1. A.T. Dideikin, A.E. Aleksenskii, et al. Rehybridization of carbon on facets of detonation diamond nanocrystals and forming hydrosols of individual particles. Carbon, 2017, V122, pp 737-745.
2. A.Ya. Vul, A.E. Aleksenskii, et al. Transition sol-gel in nanodiamond hydrosols. Carbon. 2017, V114, pp 242-249.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВЗРЫВНОГО ОБЖАТИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ КОРУНД / МЕДЬ ТРУБОК

И. А. Балаганский¹, И. С. Батраев², В. Ю. Ульяницкий^{1,2}, А. В. Пластинин²,
А. А. Штерцер², О. А. Зимоглядова¹

¹Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

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

Известно, что при взрывном обжатии цилиндрических кумулятивных облицовок возможно образование кумулятивных струй, если скорость звука в облицовке превышает скорость детонации заряда ВВ [1].

В работе [2] было изучено формирование гиперскоростного потока керамических частиц при обжатии корундовых трубок и его действие по стальной мишени. Однако, при взрывном обжатии керамических трубок не формируются сплошные кумулятивные струи.

В статье [3] было высказано и численно обосновано предположение о возможности получения гиперскоростных сплошных кумулятивных струй при взрывном обжатии двухслойных корунд / медь трубок.

В данной работе экспериментально и численно проанализированы особенности взрывного обжатия таких трубок. Результаты численного моделирования показали, что при взрывном обжатии двухслойных трубок должны возникать сплошные медные кумулятивные струи со скоростью головной части до 22 км/с. При этом максимальная скорость обжатия 1.4 км/с, максимальное давление в точке контакта 500 ГПа, давление на стационарной стадии 330 ГПа, максимальная температура в струе около 1500 К.

На регистрациях, полученных с использованием импульсной рентгеновской установки было зафиксировано образование медной кумулятивной струи.

Интересной особенностью, хорошо заметной на рентгеновских снимках, является волнообразный характер взрывного обжатия медных трубок. Возможными причинами этого могут являться реверберации волн при отражении между слоями керамики и меди. Другой причиной могут быть проявления неустойчивости при сжатии трубки к оси заряда. Возможно, имеет место влияние нестационарности детонационного процесса на границе ВВ с керамической трубкой, связанной с влиянием опережающей волны в керамической трубке на слой ещё не прореагировавшего ВВ [4].

При численном моделировании эти особенности отсутствуют, поскольку моделирование проводилось без учёта кинетики взрывного разложения ВВ.

Список литературы

1. *Тришин Ю.А.* О некоторых физических проблемах кумуляции // ПМТФ.-2000. -Т.41.-№5.-С.10-26.
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 гипер-скоростных потоков частиц при взрывном обжати керамических трубок //ФГВ, 2018.-Т.54.-№1.- С. 132-138.
3. *I.A. Balagansky, A.V. Vinogradov, L.A. Merzhievsky* Modelling of fast jet formation under explosion collision of two-layer alumina/copper tubes // The International Journal of Multiphysics. – 2017. – Vol. 11, № 3. – P. 265-375.
4. *И.А. Балаганский, Л.А. Мерзиевский* Взрывные системы с инертными высокомодульными элементами: монография / Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 172 с. (серия «Монографии НГТУ»).

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕНОК РЕАКТОРА ПРИ СИНТЕЗЕ КОМПОЗИТОВ ИЗ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ В РЕЖИМЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА

Н. В. Букрина¹, А. В. Барановский²

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск*

²*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск*

Перспективным методом получения карбидов является метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [1, 2]. В основе этого метода лежит нагрев смеси порошков до определенной температуры, при достижении которой происходит самопроизвольная реакция в режиме горения или теплового взрыва (ТВ).

Установка для исследования синтеза композитов из порошковых смесей в режиме ТВ представляет собой цилиндрическую трубу толщиной 3.5 мм, с запаянным дном. Верхняя часть установки закрывается крышкой, в которой расположено два электрических ввода для контактов термопары ВР20-ВР5, а также газовые входы. Над дном установки подвешен столик в которую помещают спрессованную смесь порошков. Внутренний объем установки составляет 841 см³. До проведения эксперимента производится продувка реакционного объема аргоном (4 л/мин, 1 мин). В процессе проведения эксперимента поддерживалось постоянное избыточное давление инертного газа на уровне 1 атм. Далее трубу помещают в прогретую до 830°C печь и нагревают до достижения процесса ТВ. Время от помещения устройства в печь до инициации ТВ составляло около 20 минут. В результате теплового взрыва может происходить разрушение термопары. Это приводит к потере данных при эксперименте. Восстановление участков термограмм может быть проведено при помощи математического моделирования.

В настоящей работе предложена математическая модель стадии нагрева прессовки порошков, в описанном эксперименте. Из условий эксперимента известно, что нагрев образца по высоте происходит однородно, поэтому реализовано одномерное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат. Схематичное изображение установки и условий

нагрева показано на рисунке 1. С учетом полученных результатов предложена модель высокотемпературного синтеза композита с титановой матрицей и с включениями карбидов в режиме динамического теплового взрыва с учетом детальной кинетики химических реакций. Кинетический закон учитывает сильное торможение скорости реакций слоем продукта синтеза.

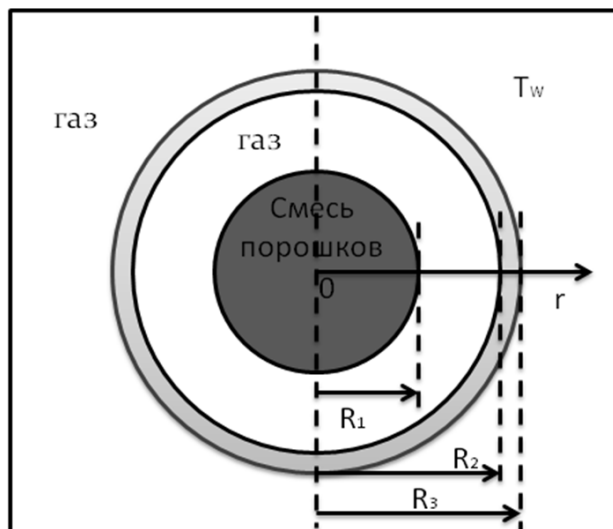


Рис. 1: Схематическое изображение процесса синтеза композитов из порошковых смесей в режиме динамического теплового взрыва в цилиндрической стальной трубе. T_w — температура в печи, R_1 , R_2 , R_3 — радиусы порошковой прессовки, внутренний и внешний радиус стальной трубы.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н., профессору Князевой Анне Георгиевне за замечания в процессе обсуждения работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ №17-19-01425.

Список литературы

1. Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез. Физическая химия. 1983. Т. 3. № 44. С. 6–45.
2. Merzhanov A.G. History and recent developments in SHS. Ceram. Int..1995. V. 21. Issue 5. PP. 371-379.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КОСОГО СОУДАРЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

С. П. Киселев¹, В. И. Мали²

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

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

Расчет высокоскоростного косоугольного соударения металлических пластин представляет собой сложную задачу, лежащую на стыке физики твердого тела, механики деформированного твердого тела и вычислительной математики. При высоких скоростях соударения в окрестности точки контакта пластин развиваются большие пластические деформации. Это приводит к большим ошибкам при использовании стандартных методов расчета, обусловленных нарушением аппроксимации уравнений механики сплошной среды вблизи поверхности контакта пластин. В работах [1-3] было предложено использовать метод молекулярной динамики для моделирования косоугольного соударения металлических пластин. В настоящее время разработаны многочастичные потенциалы взаимодействия атомов металла, что позволяет при численном моделировании методом МД воспроизводить с большой точностью физические процессы, протекающие при соударении пластин. Одним из недостатков данного метода является то, что он позволяет рассчитывать соударение нанопластин, геометрические размеры которых на 4 – 5 порядков меньше размеров пластин, изучаемых в экспериментах. В работах [1-3] для переноса результатов численного моделирования на экспериментальный уровень предложено использовать Пи-теорему. В [1-3] показано, что расчеты и эксперименты, выполненные при одинаковых безразмерных параметрах (числах Рейнольдса и Эйлера) дают близкие результаты. В докладе будут представлены результаты расчетов методом МД и экспериментов соударения пластин с образованием кумулятивных струй и процессов волнообразования при сварке взрывом.

Список литературы

1. *Киселев С.П., Мали В.И.* Численное и экспериментальное моделирование образования струи при высокоскоростном косом соударении металлических пластин // ФГВ. 2012. Т. 48, № 2. С. 100 – 112.
2. *Киселев С.П.* Численное моделирование методом молекулярной динамики образования волн при косом соударении пластин // ПМТФ. - 2012. - Т. 53, № 6. С. 121 – 133.
3. *Годунов С.К., Киселев С.П., Куликов И.М., Мали В.И.* Моделирование ударно – волновых процессов в упругопластических материалах на различных (атомный, мезо и термодинамический) структурных уровнях. М. Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований. 2014.

О ВЛИЯНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ НА ВОЛНООБРАЗОВАНИЕ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Б. С. Злобин, В. В. Киселев, А. А. Штерцер

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

Хотя феномену волнообразования посвящено множество публикаций, необходимость вернуться к его рассмотрению возникла в ходе работ по сварке малопластичных материалов, где требуется уменьшать деформации чтобы избежать трещинообразование. Известны классические формулы для оценки длины λ и амплитуды a волн, образующихся в зоне соединения металлов при сварке взрывом [1]:

$$\lambda = (16 - 26)\delta \sin^2(\gamma/2), \quad (1) \quad 0.14 \leq a/\lambda \leq 0.3, \quad (2)$$

где δ – толщина метаемой пластины, γ – угол соударения. Эти формулы предложены для случая, когда δ много меньше толщины неподвижной пластины, они не учитывают физико-механические свойства соударяющихся материалов. Однако наши эксперименты по сварке высокопрочных малопластичных сталей через тонкую пластичную прослойку [2, 3], показывают, что твердость и плотность оказывают существенное влияние на размер волн. Было обнаружено существование крупных и мелких волн, возникающих при одном и том же режиме соударения [2]; а на следующем этапе исследований показано, что волна может иметь любую длину и амплитуду, величины которых укладываются в диапазон, задаваемый формулами [3]

$$(0.76R + 18.5)\delta \sin^2(\gamma/2) \leq \lambda \leq (0.73R - 1.70)\delta \sin^2(\gamma/2), \quad (3)$$

$$0.14(\rho_{min}/\rho_{max})^{2.6} \leq a/\lambda \leq 0.30(\rho_{min}/\rho_{max})^{2.6}, \quad (4)$$

$$R = \frac{(\rho_1 + \rho_2)\nu_c^2}{2(HV_1 + HV_2)}, \quad (5)$$

где ρ_1 и ρ_2 – плотности, HV_1 и HV_2 – твердости материалов соударяющихся пластин, ν_c – скорость точки контакта, R – параметр, называемый специалистами по сварке взрывом числом Рейнольдса.

В последующих экспериментах наблюдалось существенное отклонение от линейной зависимости λ от δ , если метаемая пластина предварительно плакирована тонким слоем пластичного металла. На наш взгляд, для теоретического описания полученных экспериментальных данных наиболее пригодна модель Ландау [4], впервые использованная для описания волнообразования в [5].

Список литературы

1. *Дерибас А.А.* Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.
2. *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.
3. *Zlobin B.S., Kiselev V.V., Shtertser A.A., Plastinin A.V.* The peculiarities of wave formation at explosive welding via thin interlayer. In: Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations. M.: TORUS PRESS, 2018. P. 311-314.

4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988.
5. Пай В.В., Лукъянов Я.Л., Кузьмин Г.Е., Яковлев И.В. Волнообразование при высокоскоростном симметричном соударении металлических пластин. ФГВ. 2006. Т. 42. № 5. С. 132–137.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ РАЗРУШЕНИЯ НАНОКРИСТАЛЛА ИНТЕРМЕТАЛЛИДА $TiAl_3$

С. П. Киселев, В. П. Киселев

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

В данной работе представлены результаты численного моделирования синтеза и разрушения нанокристаллов интерметаллидов $TiAl_3$ при одноосном растяжении в широком диапазоне температур от 300 К до 1270 К. Использовался метод молекулярной динамики (МД) аналогично как в работе [1]. Схема расчета методом МД задачи разрушения нанокристалла интерметаллида $TiAl_3$ состояла из двух этапов. На первом этапе аналогично [1] моделировалось образование монокристалла интерметаллида $TiAl_3$, а на втором этапе – его разрушение при постоянной температуре при одноосном растяжении. Рассматривались два случая растяжения монокристалла $TiAl_3$ – с периодическими условиями на боковых границах (одноосно – деформированное растяжение) и со свободными боковыми границами (одноосно – напряженное растяжение).

В результате расчетов было показано, что в случае одноосно – деформированного растяжения разрушение идет за счет роста пор, а в случае одноосно – напряженного растяжения – за счет образования и увеличения шейки. Отмечено, что при температуре меньше, чем 0.6 от температуры плавления реализуется хрупкое разрушение, при более высокой температуре – вязкое разрушение.

Список литературы

1. Киселев С.П. Моделирование кристаллизации наночастицы Ti-Al методом молекулярной динамики // Докл. Ак. Наук. 2016. Т. 466, № 4. С. 406–408.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНТЕЗА КОМПОЗИТОВ В РЕЖИМЕ ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА: ИСТОРИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ

А. Г. Князева^{1,2}

¹*Томский политехнический университет, Томск*

²*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск*

Синтез композиционных материалов в объеме или синтез материалов в режиме теплового взрыва обладает преимуществом по сравнению с синтезом в режиме послойного горения. Это связано с возможностью получения более однородного продукта и возможностью контролировать процесс за счет изменения условий нагрева, сочетания нагрева с другими видами воздействия, варьирования состава исходных композиций, дисперсности порошков и др. Состав конечного продукта зависит от всех этих факторов и, как правило, оказывается неравновесным. Моделирование синтеза новых материалов имеет долгую историю и стартует с открытия явления СВС. Первые работы в этой области были сделаны по аналогии с представлениями, развитыми для теплового взрыва в газовых системах. В дальнейших исследованиях введены такие понятия как динамический тепловой взрыв, замедление реакции слоем твердого продукта, реакционная ячейка (в которой последовательность образования фаз задавалась в соответствии с равновесной диаграммой состояния); изучалось влияние геометрии сосуда; способа нагрева и поддержания температуры синтеза; влияние доли инертных включений, внешнего механического нагружения и др. В настоящее время режим синтеза в объеме привлекает внимание в связи с возможностью получения композитов сложного состава, состоящих из металлической и/или интерметаллидной матрицы и неметаллических включений типа карбидов, боридов, силицидов и оксидов. Основываясь на многочисленных экспериментальных работах, можно выделить разные варианты организации процесса синтеза и предложить развитие классических моделей за счет учета детальной кинетики химических превращений в конденсированной фазе с целью предсказания неравновесного фазового состава. В качестве объектов исследования были выбраны нестехиометрические смеси $Ti(+Al)+C, B, Si$ с избытком титана; смеси $Ti+Ni$ и $Ni-Al$ с добавками инертных частиц; смеси типа $Al + Fe_2O_3 + Fe + Cr + Ni$, в которых возможны металлотермические реакции. Простейшие модели не учитывают распределение температуры в объеме, однако предполагают плавление в некотором температурном интервале. Следующий этап – учет распределения температуры и условий нагрева (в объеме, с торцов, с боковой поверхности цилиндрической прессовки). Комбинация нагрева с механическим нагружением, например, в условиях HIP (Hot Isostatic Pressing) или SPS (Spark Plasma Sintering), позволяет получать высокоплотные продукты. В этом случае модели включают большее число управляющих параметров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, номер гранта 17-19-01425.

РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ СВАРИВАЕМОСТИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

Е. В. Кузьмин, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, М. П. Королев

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

Современный уровень развития большинства отраслей промышленности и техники напрямую связан с созданием новых материалов, сочетающих высокие технико-эксплуатационные свойства с низкой себестоимостью производства. Перспективным направлением для решения этой проблемы является разработка и внедрение качественно новых технологий, в том числе основанных на комбинированном воздействии нескольких видов энергии или совмещении различных способов ее подвода. Получение композиционных материалов сваркой взрывом – единственно приемлемое технологическое решение для ряда материалов и конструкций, так как позволяет получать качественные соединения, широко используемые в различных отраслях промышленности при сравнительно низкой себестоимости технологического процесса, не требующего применения сложного или специального оборудования. Однако, при сварке взрывом трудносвариваемых материалов с резко отличающимися физико-механическими свойствами, диапазон получения качественного соединения значительно уже, чем при сварке металлов с удовлетворительной металлургической совместимостью, и любое отклонение от оптимальных значений параметров взрывного нагружения приведет к образованию различного рода дефектов, снижающих прочностные и эксплуатационные свойства соединения [1].

Актуальной задачей является расширение диапазона свариваемости, которое возможно за счет совместного действия процесса взрывного нагружения и воздействия ультразвука на структуру и свойства в процессе формирования соединений [2].

В работе рассмотрено влияние одновременного воздействия ультразвука в ходе взрывного нагружения на электрофизические свойства соединения меди с алюминием. Установлено, что при сварке взрывом с воздействием ультразвука наблюдается существенное уменьшение количества оплавленного металла во всем диапазоне свариваемости. При этом принципиально меняется и форма участков оплавленного металла, граница соединения имеет более прямой профиль, нежели в образцах, сваренных взрывом без воздействия ультразвука. Показано, что применение медно-алюминиевых переходников, полученных сваркой взрывом с одновременным воздействием ультразвука, позволяет существенно снизить падение напряжения на участке «бюмс–клемма» до 2.6...2.8 mV, тогда как при использовании штатных переходников, полученных сваркой взрывом без применения ультразвука, падение напряжения значительно выше – 5.6...6.1 mV.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках “Совета по грантам Президента РФ” (СП-1940.2016.1)

Список литературы

1. *Кузьмин Е.В., Пеев А.П., Лысак В.И., Кузьмин С.В.* Создание новых энергосберегающих композиционных переходных элементов и узлов электротехнического назначения. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2017. № 4. С. 17-22.
2. *Кузьмин Е.В., Пеев А.П., Кузьмин С.В., Лысак В.И.* Особенности формирования структуры и свойств соединения меди с алюминием при сварке взрывом под воздействием ультразвука. ФММ. 2017. Т. 118. № 8. С. 861-868.

МИКРО- И НАНОСТРУКТУРНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ДЕТОНАЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ

А. А. Штерцер, В. Ю. Ульяницкий, И. С. Батраев, Д. К. Рыбин

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

Микроструктурные покрытия получают с применением традиционных технологий газотермического напыления (плазменное, холодное газодинамическое, детонационное, HVOF, HVOF и др.), когда используются порошки с размером частиц от 10 до 100 мкм. При этом детонационное напыление (ДН) обеспечивает получение МП с высокими прочностными и диэлектрическими параметрами [1]. Примерно с середины 1990-х в зарубежных странах начались исследования, в которых в газовый поток подается суспензия на основе порошков с субмикронными частицами. Технология получила название Suspension Thermal Spraying (STS), при этом наиболее распространены суспензионное плазменное (SPS) и HVOF (S-HVOF) напыление [2, 3]. Применение суспензий на основе наноразмерных порошков позволяет наносить тонкие наноструктурные покрытия. Отметим полное отсутствие в настоящее время публикаций по применению суспензий в ДН. С целью исследования возможности реализации суспензионного детонационного напыления (СДН), на установке CCDS2000 [4] был впервые осуществлен процесс СДН и получены покрытия из субмикронных частиц, жидкой составляющей суспензии был этиловый спирт. Некоторые свойства полученных СДН- и ДН-покрытий из Al_2O_3 , TiO_2 и гидроксиапатита приведены в таблице.

Таблица 1: Микротвердость и пористость покрытий.

Материал	СДН-покрытия				ДН-покрытия	
	Al_2O_3	TiO_2	TiO_2	Гидроксиапатит	Al_2O_3	TiO_2
Размер частиц, мкм	0.1	30-90	0.24	0.1	20-30	30-90
Микротвердость, HV_{50}	916	1102	816	383	>1500	1182
Пористость, %	<1	1.6	<1	1.6	3.5	<1

Полученные результаты дают основания для развития нового направления – суспензионного детонационного напыления, позволяющего наносить тонкие наноструктурные покрытия. Работы выполнялись при частичной поддержке РФФИ, грант № 18-43-540008.

Список литературы

1. *V. Ulianitsky, A. Shtertser, I. Batraev, I. Smurov* Deposition of dense ceramic coatings by detonation spraying, Proceed of International Thermal Spray Conference & Exposition (ITSC-2014), May 21-23, 2014, Barcelona/Spain, DVS-Berichte Volume 302, DVS Media GmbH, Düsseldorf – 2014, p. 349 – 352.
2. *Fauchais P., Etchart-Salas R., Rat V., Coudert J.F., Caron N., Wittman-Teneze K.* Parameters controlling liquid plasma spraying: solutions, sols, or suspensions. J. Therm. Spray Technol. 2008. V.17. P. 31-59.
3. *Killinger A., Müller P., and Gadow R.* What do we know, what are the current limitations of suspension HVOF spraying. J. Therm. Spray Technol. 2015. V. 24. P. 1130-1142.

ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО БИМЕТАЛЛОВ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ ДЛЯ АТОМНОГО, НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО И СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Л. Б. Первухин

ООО "Битруб Интернэшнл"

Комплекс исследований процесса образования соединения при сварке взрывом, выполненный на листах промышленных размеров, показал, что в сварочном зазоре создаются условия для образования в пограничном слое между ударно-сжатым газом (УСГ) и свариваемыми поверхностями неравновесной ударной плазмы: гиперзвуковая скорость обтекания свариваемых поверхностей УСГ; высокая температура пограничного слоя; время её воздействия на свариваемые поверхности, зависящее от его длины и скорости; наличие шероховатости свариваемых поверхностей.

Ударная плазма имеет много общего с обычной разрядной плазмой, но существуют некоторые особенности: отсутствие внешнего электрического поля, высокие температуры ($T=3000-20000$ К) и наличие быстрых хемоионизационных реакций с участием возбуждённых атомов и молекул. Ударная плазма взаимодействует с твердым телом, при этом происходит разрушение и испарение поверхностных слоёв твёрдого тела, диссоциация окислов, сгорание органических загрязнений и насыщение ими УСГ, а также оплавлению в первую очередь вершин микронеровностей. В результате происходит очистка и активация свариваемых поверхностей до соударения.

Эти исследования позволили сделать важный для практики вывод. Качество сварки взрывом определяется в первую очередь процессами, идущими впереди точки контакта, то есть очисткой и активацией соединяемых поверхностей. Для обеспечения прочного соединения в начале процесса сварки взрывом, исключения начальных непроваров, необходимо к моменту начала сварки обеспечить в сварочном зазоре впереди точки контакта требуемые параметры ударно-сжатого газа (УСГ) для очистки и активации свариваемых поверхностей до соударения и обеспечить их заданный уровень в течение всего процесса сварки.

При производстве биметалла методом сварки взрывом для изготовления изделий в атомном и судостроительном машиностроении для второго и третьего класса безопасности требуется разработка нормативно-технической документации на основании испытаний, её согласование и утверждение в установленном ПНАЭ Г правилами, а в судостроении правилами Морского регистра.

В докладе приводятся результаты испытаний и исследований двухслойных листов марки 22К+08Х18Н10Т применительно к изготовлению оборудования для АЭС по второму классу безопасности, проведенные совместно с АО НПО ЦНИИТМАШ. Даны примеры производства двухслойных листов размерами 60(55+5)х2500х9900 мм для изготовления ёмкостей САОЗ Нововоронежской АЭС.

На предприятии разработана и освоена совершенная технология сварки взрывом титана со сталью в среде защитных газов, которая позволяет качественно без дефектов сплошности производить двухслойные листы неограниченных размеров. В докладе приводятся результаты комплекса исследований структуры и свойств двухслойных листов сталь-титан, проведенные совместно с ФГУП ЦНИИ КМ "Прометей", и их производства для трубных решёток конденсаторов АЭС и атомного ледокола.

Исследованы особенности сварки взрывом длинномерных цилиндрических изделий, длина которых превышает десять диаметров. Разработана и освоена импортозамещающая технология промышленного производства сваркой взрывом двухслойных длинномерных стержней титан-медь (длина 1500 мм, диаметр 20 и 32 мм) для токоподводов электролизёров кобальта и никеля для Кольского ГОК.

ПОЛУЧЕНИЕ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ВЗРЫВНЫМ ПРЕССОВАНИЕМ СМЕСЕЙ ПОРОШКОВ КАРБИДОВ С МЕТАЛЛАМИ

В. О. Харламов, А. В. Крохалев, М. А. Тупицин, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

Взрывное компактирование является одним из перспективных видов импульсного прессования и существенно расширяет возможности технологий порошковой металлургии в области созданию новых материалов. Взрывная обработка дает возможность одновременно достигать давлений, достаточных для равномерного уплотнения порошков до практически беспористого состояния, и температур, необходимых для консолидации (сварки) структурных компонентов порошкового материала. Кратковременность воздействия высоких давлений и температур открывает возможность предотвращения вторичного взаимодействия между компонентами сплавов, что позволяет использовать в качестве материала связки химически активный при высокой температуре металл - титан. Однако применение титана в качестве металла матрицы ввиду его высокой химической активности дает возможность протекания вторичных межфазных процессов в процессе эксплуатации при высокой температуре, что требует пристального внимания и исследования путем термодинамических расчетов с последующими прямыми экспериментами.

В работе приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований методами растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализа фазового состава твердых сплавов, полученных взрывным прессованием порошков карбида хрома Cr_3C_2 с титаном, в исходном состоянии и после нагрева до 1200 °С.

В опытах использовались образцы твердого сплава системы $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ti}$, содержащие 40 масс. % титана, полученные взрывным прессованием смеси порошков чистого карбида хрома Cr_3C_2 КХНП-1 (ТУ 14-22-28-90) с порошками титана ПТС (ТУ 14-22-57-92) на подложке из стали 09Г2С по схеме с нормально падающей детонационной волной [1].

В процессе взрывного прессования разогрев порошковой смеси в ударных волнах составлял 500-600 °С, максимальное давления сжатия 11-12 ГПа, что гарантировало получение монолитного твердого сплава системы $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ti}$ на стадии прессования [2]. Далее образцы нагревали в печи без защитной атмосферы при температуре от 300 до 1200 °С, выдержке 1 час. Охлаждение проводили на спокойном воздухе.

Установлено, что при нагреве до 600 °С фазовый состав твердых сплавов не изменяется и соответствует составу исходных компонентов порошковой смеси. С увеличением температуры нагрева до 650 °С наблюдается появление новых мелкодисперсных фаз на границе раздела «карбид хрома – титан». При температуре 700 °С образуются два отдельных диффузионных слоя, которые растут в противоположных направлениях. За счет их роста при температуре 1200 °С исходные фазы в сплаве полностью исчезают, а твердый сплав переходит в равновесное состояние: основной карбидной фазой становится карбид титана TiC , а связкой – карбид хрома Cr_7C_3 .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект №18-19-00518.

Список литературы

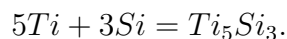
1. *Рогозин В.Д.* Взрывная обработка порошковых материалов / ВолгГТУ. Волгоград: РПК «Политехник», 2002. 136 с.
2. *Крохалев А.В., Харламов В.О., Кузьмин С.В., Лысак В.И., Гринберг Б.А.* Тонкое строение межфазных границ в твердых сплавах системы карбид хрома – титан. Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2015. № 2. С. 38-43.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНТЕЗА ГОРЕНИЕМ КОМПОЗИТА ИЗ СМЕСИ ПОРОШКОВ $Ti - Al - C$

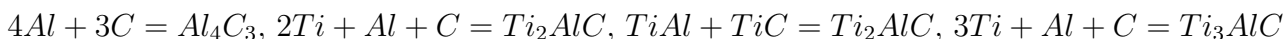
Ю. А. Чумаков

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

В последнее двадцать лет значительное внимание исследователей сфокусировано на получении тугоплавких тройных карбидов металлов, в том числе, и на системе $Ti - Al - C$ [1]. Получаемые различными методами в этих системах тройные карбиды Ti_3AlC_2 , Ti_2AlC и Ti_3AlC также называются МАХ-фазами. Из всего разнообразия способов получения тройных карбидов самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) привлекает исследователей своей высокой энергоэффективностью по сравнению с другими технологиями. Но поскольку в экспериментальных работах не всегда возможно выявить и объяснить причины существования различных режимов синтеза горением, необходимо привлекать математическое моделирование процессов, происходящих в смесях порошков, начиная со стадии иницирования реакции. В настоящей работе исследуется математическая модель процесса синтеза горением композита из смеси порошков $Ti - C - Al$. Модель соответствует следующим условиям. Образец представляет собой двухслойный цилиндр радиуса r , состоящий из порошковых насыпок, аналогично [2]. Полагаем, что слой 1 (воспламенитель) – стехиометрическая смесь порошков титана Ti и кремния Si , толщина насыпки равна l . Второй слой толщиной L (поджигаемая смесь) – смесь порошков с избытком титана: титана Ti , углерода C (сажи) и алюминий (Al). Полагаем, что Ti полностью не расходуется в реакции. Считаем, что химические превращения в первом реакционном слое описываются суммарными реакционной схемой типа «реагент – продукт реакции»:



Для второго слоя учитываем детальную кинетику, которая включает 4 реакции:



В уравнении энергии учитываем теплопотери в окружающую среду за счет конвекции (если синтез осуществляется в атмосфере инертного газа; в этом случае возможно участие в реакциях кислорода) и за счет теплового излучения. Иницирование реакции осуществляется искровым разрядом воспламенительной смеси на границе $x = 0$. Поскольку структура композита нам заранее неизвестна, в расчетах используются эффективные свойства, которые рассчитываются по правилу смеси. Модель реализована численно.

Расчеты показали, что в зависимости от массового соотношения исходных компонентов (реагентов) и характера влияния слоя продукта, накапливающегося в результате реакции, возможны различные варианты распространения волны горения в прессовках после перехода волны горения от воспламенителя.

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 17-19-01425.

Список литературы

1. *Sadeghi E., Karimzadeh F., Abbas M.H.* Thermodynamic analysis of Ti–Al–C intermetallics formation by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*. 2013. V. 576. P. 317–323.
2. *Чумаков Ю.А., Князева А.Г., Прибытков Г.А.* Синтез композитов на основе титана в режиме горения. *Химическая физика и мезоскопия*. 2017. Т.19. № 4. С.524-537

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ДЕТОНАЦИОННЫХ НАНОАЛМАЗАХ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВЫХ И РАДИАЦИОННЫХ НАГРУЗОК

В. П. Ефремов, Е. И. Закатилова

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

На сегодняшний день все больше стран производит в лабораторных условиях детонационные алмазы. В естественных условиях алмазы образуются, например, в планетах-гигантах, таких как Уран и Нептун [1]. Возникла необходимость в исследовании теплофизических свойств в условиях тепловых и радиационных нагрузок. Это позволило бы расширить области применимости детонационных наноалмазов (ДНА), т.к. на сегодняшний день их применение ограничено. Это связано со сложным строением частиц порошка, которое оказывает влияние на его свойства.

Проанализированы литературные данные по тепловой стабильности ДНА. По этим данным температура начала графитизации лежит в широком диапазоне от 670 С [2] до 980 С [3]. Проведенные нами экспериментальные исследования по тепловой стабильности ДНА показали, что процесс фазового перехода происходит выше 800 С [4]. Однако было обнаружено, что выше 600 С происходит уменьшение алмазной фазы, а образование графита не наблюдалось [4]. Процесс твердотельного фазового перехода при тепловой обработке начинается с поверхности алмазного кристаллического ядра частицы. Увеличение температуры приводит к распространению «волны графитизации» вглубь частицы. Зная зависимость температуры графитизации от размера частиц, можно создать двухфазные частицы (графитовая оболочка и алмазное ядро), обладающие уникальными свойствами. Тем не менее экспериментально получено, что тепловая стабильность части исследованного ДНА превышает 1500 С [4].

Исследования различных условий воздействия на порошок ДНА позволит более обширно понимать механизмы структурных изменений. Поэтому был проведен литературный анализ радиационного воздействия на алмазную фазу. Радиационное воздействие образует различные повреждения в кристаллической решетке: от точечных дефектов до фазовых переходов. Также как и тепловое воздействие возможно создание двухфазных частиц. Облучение частиц вызывает фазовый переход в центре частицы. Поэтому радиационное воздействие может создать частицы с sp^2 фазой, окруженной алмазной sp^3 фазой.

Список литературы

1. *D. Kraus, J. Vorberger, A. Pak, N. J. et al.* Formation of diamonds in laser-compressed hydrocarbons at planetary interior conditions // *Nature Astronomy* V. 606. 2017. Pp. 606–611.

2. *Xu N.S., Chen Jian, Deng S.Z.* Effect of heat treatment on the properties of nano-diamond under oxygen and argon ambient // *Diamond and Related Materials*. 2002. V. 11. № 2. Pp. 249–256.
3. *Popov V.A., Egorov A.V., Savilov S.V., and et al.* Features of the Transformation of Detonation Nanodiamonds into Onion-Like Carbon Nanoparticles // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2013. V. 7. № 6. Pp. 1034 – 1043.
4. *Efremov V.P., Zakatilova E.I.* The analysis of thermal stability of detonation nanodiamond // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. № 774. P. 012014.

СИНТЕЗ НАНЕСЕННЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЕТОНАЦИОННЫМ СПОСОБОМ

*А. О. Кашкаров^{1,3}, Э. Р. Прууэл^{1,3}, К. А. Тен¹, Е. Ю. Герасимов^{2,3}, С. И. Кременко^{1,3},
П. А. Пыряев², Б. Л. Мороз^{2,3}*

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

²*Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск*

³*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

Производство катализаторов – важнейшая отрасль промышленности, влияющая на развитие других отраслей, в частности, химической, нефтеперерабатывающей и т.д. В последнее время катализ все чаще используют для защиты окружающей среды. Отдельную отрасль составляет производство катализаторов на основе редких и благородных металлов, таких как платина, палладий, родий, рений и т. д. При этом для более эффективного использования самого металла его наносят на носители – материалы, обладающие высокими значениями удельной поверхности и механической прочности.

В настоящей работе осуществлен синтез Au– и Pd–содержащих катализаторов методом термического разложения различных прекурсоров во фронте детонационной волны. При этом реализуется одновременный синтез частиц как активного компонента, так и носителя, состоящего из детонационных углеродных форм. Методами ПЭМВР и РФА было произведено исследование морфологии и структуры нанесенных катализаторов, полученных в результате детонации различных предшественников. Образцы, синтезированные из различных предшественников содержащих разное количество Pd, отличались друг от друга степенью дисперсности Pd. Наблюдаемые частицы углеродного компонента имеют достаточно развитую поверхность для использования их в качестве носителей в процессах катализа. Поэтому было произведено исследование полученных образцов Au/C и Pd/C, полученных в результате детонации, в условиях, моделирующих дожигание примеси СО (1 объемн.%) в потоке влажного воздуха. Показано, что Au – содержащий катализатор не активен в реакции вследствие формирования в условиях взрыва углеродной оболочки на частицах активного компонента. Для катализатора на основе Pd были подобраны режимы активации, позволяющие удалить эту оболочку, по крайней мере, частично, и показано, что катализаторы, подвергнутые такой обработке, активны в реакции окисления СО.

Возможность варьирования весового содержания активного компонента и размеров его частиц позволяет использовать детонационный метод для синтеза углероднанесенных катализаторов различных процессов.

АЛЛОТРОПНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ПРОДУКТАХ ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА В ПРИСУТСТВИИ КАТАЛИЗАТОРОВ

В. Г. Исакова¹, В. П. Исаков², А. И. Лямкин^{1,2}

¹ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск

²Сибирский федеральный университет, Красноярск

Углерод — вещество с самым большим числом аллотропических модификаций. Это связано с наличием на внешней оболочке 4 электронов, что позволяет формировать связи между атомами многими способами. После обнаружения явления синтеза алмазов в продуктах детонации взрывчатых веществ (ВВ) многие изучали состав конденсированных продуктов взрыва (КПВ), состоящих в основном из углерода. Однако, аллотропический состав КПВ зависел от способа охлаждения продуктов взрыва. В случае применения водной или ледяной оболочки вокруг заряда ВВ КПВ включали алмаз и аморфный углерод. При использовании инертных газов и CO_2 в КПВ находили алмаз и графит. Нами были зафиксированы рефлекссы фуллерена в КПВ, но в очищенных наноалмазах (НА) такие рефлекссы отсутствовали. Очистка НА осуществлялась отжигом его в смеси с ацетилацетонатом калия с последующей кислотной обработкой. Заслуживает внимания появление рефлекссов фуллерена, соответствующих отражению от плоскостей 111, 220, 311 гранецентрированной решетки фуллерена ($2\theta = 10.75; 17.59; 20.66$) соответственно в дифрактограммах продуктов взаимодействия смеси НА с ацетилацетонатом палладия ($\text{Pd}(\text{acac})_2$), протекающего в режиме низкотемпературного горения ($\sim 200\text{ C}$) с выделением наночастиц Pd. На фотографиях КПВ с просвечивающего микроскопа наблюдались отдельные частицы НА размером 4 нм и графитовые пластины, напоминающие шестиугольник с характерным размером вдвое и более превышающим размер НА. Это говорит в пользу того, что пластинки графита появились в результате термического отделения внешних слоев НА при спаде давления в расширяющихся продуктах взрыва. Если продолжить аналогию, то можно предположить, что возможно и фуллерены в присутствии катализатора палладия формируются из поверхностных углеродных слоев частиц НА. Процесс наиболее эффективен, когда размер частиц катализатора сравним с размером частиц нанообъектов. Эффект самовозгорания и низко-температурного горения смеси НА с ацетилацетонатом натрия либо калия в воздушной среде был использован для выжигания «неалмазного» углерода из КПВ. Предварительное выжигание неалмазного углерода позволяет существенно сократить расход смеси кислот, которые используются для последующего растворения примесей оксидов металлов, и окисления остаточного неалмазного углерода, сократить время кислотной обработки, и главное — достичь высокой степени очистки НА. Для инициирования сжигания аморфной сажи в углеродном конденсате нами использовался процесс термического разложения ацетилацетоната железа. При возгорании и произвольном горении смеси углеродного конденсата и ацетилацетоната железа, убыль массы достигает 80%, уменьшение массы связано преимущественно с термоокислением и газификацией дисперсного аморфного углерода. Твердофазным продуктом реакции по данным рентгеновского дифракционного анализа, мессбауэровской спектроскопии, электронного парамагнитного резонанса, является смесь фуллеренов с наноразмерными частицами магнетита железа, которые не подвергались окислению при сжигании и были стабильны к действию растворов HCl.

Авторский указатель

А

Абдуллина Д. Н., 56
Абрамов С. К., 122
Адамьян Ю. Э., 18, 55
Адуев Б. П., 60, 61, 78, 79
Азатян В. В., 112, 122
Алексеев Д. И., 18, 55
Алексенский А. Е., 124
Ананьев С. Ю., 88
Анисичкин В. Ф., 91
Антишин Д. В., 62
Астафьев В. В., 53
Астахов А. М., 62
Атаманов М. К., 73
Аульченко В. М., 93
Ахметов Д. Г., 45
Ахметшин Р. М., 51

Б

Бабкин А. В., 15, 18
Бадретдинова Л. Х., 63
Базотов В. Я., 63
Балаганский И. А., 125
Барановский А. В., 126
Баранышин Е. А., 95
Батраев И. С., 125, 133
Белокуров Г. М., 60, 61, 78, 79
Бирюкова М. А., 89
Боголепов В. В., 98
Боднарюк А. Д., 29, 30
Бойко М. М., 51
Болеста А. В., 24
Большакова Е. С., 25
Бордзиловский С. А., 33, 87
Борискин А. С., 17
Борисков Г. В., 17
Брагунцов Е. Я., 10, 20, 111
Бродова И. Г., 53
Букрина Н. В., 126
Быков А. И., 17
Быковский Ф. А., 99, 103
Бычков А. Л., 37

В

Васекин А. А., 102
Васенин И. М., 114, 115

Васецкий В. А., 36
Васильев А. А., 96, 121
Васильев В. В., 19
Ведерников Е. Ф., 99, 103
Власов А. Н., 41
Власова А. М., 27
Власова М. А., 16
Воронин М. С., 57
Востриков В. А., 66
Вуль А. Я., 124
Вшивков В. А., 25

Г

Гапонов С. А., 104
Гаркушин Г. В., 56
Гармашев А. Ю., 47, 58, 89
Гелин Д. В., 40, 102
Гелин Н. Д., 102
Георгиевский П. Ю., 48
Герасимов Е. Ю., 138
Гилев С. Д., 25
Головнев И. Ф., 57
Головнева Е. И., 57
Горбашова М. А., 26
Гордеев В. В., 64, 65
Горкунов С. В., 107
Гоффарт Т. В., 112
Грищенко В. М., 36
Грязнов Е. Ф., 51
Губин А. С., 29, 30
Губский К. Л., 26, 34
Гусарова Е. В., 65
Гуськов А. В., 27

Д

Давыдов В. Ю., 29, 30
Данилко Д. А., 66
Дашапилов Г. Р., 88
Дегтярёв А. А., 52, 58
Дементьев А. А., 120
Демидов В. А., 17
Демин Р. В., 20
Дидейкин А. Т., 124
Долгих А. В., 39
Долгих С. М., 47, 58, 89
Долгобородов А. Ю., 67, 88

Дорохов Н. С., 31
Дорошко М. В., 36
Дубков А. П., 71
Дудин С. В., 68
Дьячков С. А., 76

Е

Егорова М. С., 32, 76
Ездин Б. С., 97
Елсуков В. П., 46
Ерёмин Г. В., 51
Ермолаев И. К., 98
Ершов А. П., 69, 70, 84
Еськов Д. А., 31
Ефремов В. П., 137

Ж

Жаховский В. В., 32, 76
Ждан С. А., 99
Жуков А. Н., 88
Журавлев А. В., 41
Журавлев Ю. Н., 82
Журавская Т. А., 101

З

Забабахин И. Е., 46
Завьялов В. С., 51
Зайцев М. Ю., 45
Закатилова Е. И., 137
Замураев В. П., 100
Зарвин А. Е., 97
Зарко В. Е., 92
Звегинцев В. И., 10, 111
Звёздкин В. М., 71
Зегря Г. Г., 83
Зелепугин С. А., 42
Зельдович В. И., 52
Зимоглядова О. А., 125
Злобин Б. С., 117, 129
Зубарева А. Н., 72

И

Исаков В. П., 139
Исакова В. Г., 139

К

Казутин М. В., 64, 65
Какуткина Н. А., 108
Калинина А. П., 100
Калмыков П. И., 92
Каляда В. В., 97

Канунников Р. Н., 47
Караханов С. М., 33, 87
Карпов Д. И., 37
Картунов А. А., 19
Кашкаров А. О., 41, 65, 69, 88, 138
Кедринский В. К., 25
Кинеловский С. А., 43
Киселев А. Н., 89
Киселев В. В., 129
Киселев В. П., 130
Киселев С. П., 128, 130
Кискин А. Б., 92
Клёнов А. И., 58
Климачков С. И., 51
Клыпин В. В., 39
Князева А. Г., 116, 131
Ковалёв Ю. М., 89
Коваль А. В., 52, 53, 89
Козырев Н. В., 64, 65
Колпаков В. И., 11
Копьев В. Ф., 45
Коржавин А. А., 108
Коробейников С. М., 37
Коробенкова А. Ю., 37
Королев В. Ю., 65
Королев М. П., 132
Коршунов А. С., 17
Костеренко В. Н., 114, 115
Костицын О. В., 63
Крайнов А. Ю., 81, 114, 115, 118, 120
Краус Е. И., 35
Кременко С. И., 47, 138
Кривошеев П. Н., 95
Кривошеев С. И., 18, 55
Крохалев А. В., 135
Круглов П. В., 11
Крутов И. С., 40
Крутова И. Ю., 49
Кузавов В. Т., 54
Кузнецов А. П., 26, 34
Кузнецова Т. В., 27
Кузьмин Е. В., 132
Кузьмин С. В., 132, 135
Куперштох А. Л., 37
Курепин А. Е., 73

Л

Лавров В. В., 72
Ладов С. В., 12, 15, 18

Левин В. А., 48, 101
Лисков И. Ю., 60, 78, 79
Лопатникова Т. В., 13
Лукашов О. Ю., 114, 115
Лукьянов Я. Л., 14
Лысак В. И., 132, 135
Лысов Д. А., 40, 102
Лямкин А. И., 139

М

Магазинов С. Г., 18, 55
Маевский К. К., 43
Малев В. В., 47
Мали В. И., 128
Манжос Е. В., 108
Мансуров З. А., 73
Марков В. А., 40, 102
Марков И. В., 40
Маслов А. Л., 116
Матвеев К. А., 116
Матросов А. Д., 18
Махнач А. И., 36
Медведев Д. А., 37
Мельников А. Ю., 35
Мередова М. Б., 37
Мещеряков Ю. П., 117
Милевский К. Е., 27
Михайлов А. Л., 74
Михайлюк А. В., 34
Моисеева К. М., 118, 120
Мороз Б. Л., 138
Мочалова В. М., 75, 86
Музыря А. К., 47, 89
Мурзов С. А., 32, 76

Н

Нелюбина Н. В., 60, 61
Николаев А. Ю., 47
Николаев Ю. А., 106
Никольская Я. М., 12
Никулин В. В., 45
Норкин С. В., 26, 34
Нурмухаметов Д. Р., 60, 61, 78, 79

О

Орлов С. А., 116
Охитин В. Н., 51

П

Пай В. В., 14

Палеев Д. Ю., 114, 115
Пальчиков Е. И., 38, 39
Паршиков А. Н., 32, 76
Пашенцев В. А., 41
Пенязьков О. Г., 95
Первухин Л. Б., 134
Перевалов И. А., 51
Петров Д. В., 46, 47, 58, 89
Петрова А. Н., 53
Петухов Е. А., 58
Петюков А. В., 80, 102
Пинаев А. В., 121
Пластинин А. В., 14, 45, 87, 125
Плотников А. А., 13
Попов Е. Л., 103
Порязов В. А., 81
Празян Т. Л., 82
Прокопенко В. М., 122
Прууэл Э. Р., 57, 69, 91, 138
Пырьев В. А., 80
Пыряев П. А., 138

Р

Разоренов С. В., 56
Рассоха С. С., 15
Расторгуев Г. И., 116
Репин П. Б., 17
Ридель А. В., 37
Романов В. В., 20
Рубцов И. А., 41, 69, 70, 88
Рыбин Д. К., 133
Рыбников А. И., 110
Рыкова В. Е., 75
Рычков А. Д., 108
Рябчун А. М., 39

С

Самойленко М. С., 39
Самосват Д. М., 83
Самсонов А. Н., 103
Сатонкина Н. П., 69, 84, 85
Свирский О. В., 16
Севрук К. Л., 95
Селезнев А. А., 65
Селемир В. Д., 17
Середа Н. В., 13
Сидоров К. А., 92
Сидоров К. С., 58
Симоненко В. А., 46
Симоненко В. Н., 92

Симонов Е. В., 110
Смеликов В. Г., 13
Смирнов В. Н., 41
Смирнов Е. Б., 41, 47, 52, 53, 58, 63, 89
Смородский Б. В., 104
Сосиков В. А., 68
Сотский М. Ю., 40
Станкевич А. В., 63
Станкевич С. В., 18
Столбиков М. Ю., 41
Сутырин О. Г., 48
Сухановская Л. Д., 98
Сухинин С. В., 90

Т

Тарасов Ф. И., 47
Таценко О. М., 17
Тен К. А., 41, 63, 65, 69, 88, 93, 138
Терещенко М. Н., 29, 30
Тесленко В. С., 44
Титов В. М., 14, 93
Толкачев В. Ф., 42
Толочко Б. П., 63, 93
Торунов С. И., 68
Троцюк А. В., 105
Трубицын А. А., 112, 122
Трубицына Н. В., 112, 122
Тупицин М. А., 135

У

Ульяницкий В. Ю., 125, 133
Уткин А. В., 51, 72, 75, 86, 88

Ф

Федоров С. В., 12, 18
Филатов Ю. М., 122
Фомин В. М., 10, 24, 35, 111
Фомин П. А., 105, 106
Фролова Н. Ю., 52

Х

Харламов В. О., 135
Хейфец А. Э., 52
Хищенко К. В., 33, 44
Хомская И. В., 52, 56
Храмцов П. П., 36

Ч

Чашников Е. А., 45
Черемазов В. Е., 41
Чернов А. И., 51

Четвернин М. Ю., 40
Чикалова-Лузина О. П., 83
Чугайнова А. П., 107, 109
Чумаков Ю. А., 136

Ш

Шабалин И. И., 35
Шаргатов В. А., 107, 109
Швецов Г. А., 18
Швидлер В. П., 19
Швидченко А. В., 124
Шейков Ю. В., 16
Шикунов Н. В., 22
Ширинкина И. Г., 53
Шистириков М. А., 58
Ших И. А., 36
Шишкин В. П., 31
Шнеерсон Г. А., 18
Шорохов Е. В., 52, 53, 56
Шрагер Э. Р., 114, 115
Штерцер А. А., 117, 125, 129, 133
Шубин О. Н., 46

Ю

Юдина Е. Б., 124
Юношев А. С., 87
Юсупов Д. Т., 47, 58

Я

Яблонских Т. И., 53
Якушев В. В., 88
Янилкин А. В., 76
Яскин А. С., 97
Ястребцев А. А., 26, 34

I

Pcyakova N. N., 77, 94

L

Liskov I. Y., 77, 94

N

Nikitin A. P., 77, 94

Z

Zverev A. S., 77, 94

Подписано в печать 15.08.2018.

Формат 60×84 1/8.

Офсетная печать.

Усл. печ. л. 14.6

Уч.-изд. л. 13.1.

Тираж 150 экз.

Заказ № 241.

Лицензия ПД N 12-0143 от 22.10.2001
Отпечатано на полиграфическом участке
Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Новосибирск, проспект акад. Лаврентьева, 15.