
**ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ
И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ**

УДК 534.222.2

**ОСОБЕННОСТИ ИНИЦИИРОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ
НИЗКОСКОРОСТНОЙ ДЕТОНАЦИИ В ВЫСОКОПЛОТНЫХ
ЗАРЯДАХ НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ
С ГОРЮЧИМИ ДОБАВКАМИ**

© 2020 г. П. В. Комиссаров^{1,2}, А. А. Сулимов¹, Б. С. Ермолаев¹, С. С. Басакина¹,
В. В. Лавров³, С. Н. Точилин¹, В. Е. Храповский¹

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия

²Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

³Институт проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка, Россия

*E-mail: komissarov@center.chph.ras.ru

Поступила в редакцию 03.02.2020;

после доработки 03.02.2020;

принята в печать 20.03.2020

Исследованы закономерности распространения и критические условия низкоскоростной детонации в высокоплотных зарядах из мелкодисперсных смесей перхлората аммония с горючими и взрывчатыми добавками. Рассмотрено влияние на распространение детонации относительной плотности заряда, типа горючего и соотношения компонентов смеси, включая смеси, сильно обогащенные горючим компонентом. Показано, что в случае смесей перхлората аммония с горючими добавками зависимость скорости детонации от относительной плотности заряда имеет платообразный участок, на котором скорость детонации, имеющая значение на уровне 2000 м/с, практически не зависит от плотности и природы горючего компонента. Кроме того, обнаружена критическая плотность заряда, выше которой наблюдается срыв низкоскоростной детонации. В случае тройных смесей с добавкой жидкого ВВ (нитрометана) подобная зависимость отсутствует, а скорость детонации монотонно растет по мере увеличения относительной плотности. Также определены критические давления инициирования составов в диапазоне плотностей, в котором не наблюдается влияния плотности на скорость детонации. Проведенные исследования позволяют уточнить состав и характеристики высокоплотных смесей, при которых применение режимов низкоскоростной детонации может обеспечить создание эффективных взрывобезопасных импульсных устройств.

Ключевые слова: высокоплотные составы, скорость детонации, критическая относительная плотность, критическое давление инициирования, сверхбогатые взрывчатые составы.

DOI: 10.31857/S0207401X20080063

ВВЕДЕНИЕ

Для создания импульсных реактивных пульсивных систем с малыми временами работы (менее 1–5 мс) вместо нормальной детонации возможно использование нетрадиционного режима взрывчатого превращения – низкоскоростной детонации (НСД) в высокоплотных прессованных зарядах из мелкодисперсных смесей перхлората аммония (ПХА) с горючими добавками [1–5]. Существенно более низкие значения скорости распространения и давления, присущие НСД, позволяют эффективнее использовать энергию тепловыделения для совершения механической работы – создания тяги. Важное преимущество таких составов состоит в том, что они обладают высокой энергетикой, детонируют с низкой ско-

ростью и при определенных условиях не способны к нормальной детонации, что делает их привлекательными для практического применения при создании взрывобезопасных ракетных, металлических и газогенерирующих устройств.

При НСД химическая реакция возбуждается в горячих точках в результате локального диссипативного нагрева энергетического материала при вязкопластических деформациях пор. Для НСД характерны медленное тепловыделение и диспергирование высокоплотного заряда на отдельные частицы, сгорающие в протяженной зоне. Энергия из зоны горения переносится к исходному веществу в основном за счет пластической (ударной) волны сжатия, бегущей по твердой фазе. Важное преимущество режима НСД состоит в возможно-

сти воспроизводимо создавать горящие взвеси с размером частиц, близким к исходному (десятки микрон), что достигается за счет использования газопроницаемой пористости заряда. Полное сгорание взвеси происходит обычно при ее движении по каналу импульсного устройства. Обеспечение высокой полноты горения при НСД является основной задачей, стоящей перед исследователями в этой области.

Объектами исследования в данной работе являются высокоплотные смеси на основе ПХА с горючими и взрывчатыми добавками. Проведенные ранее исследования НСД в смесях ПХА с полиметилметакрилатом (ПММА) и алюминием [1, 6–10] с относительными плотностями составов $\delta \leq 0.85$ в слабых оболочках показали наличие максимума скорости детонации с ростом относительной плотности и последующее ее падение. В данной работе были проведены опыты в области относительных плотностей зарядов $\delta \geq 0.85$, заключенных в прочные оболочки. При этом обнаружили весьма необычное поведение в зарядах с высокой относительной плотностью, когда независимо от соотношения компонентов и диаметра заряда, заключенного в стальную неразрушающуюся оболочку, скорость НСД оказалась приблизительно одинаковой – на уровне 2 км/с при давлении в волне 1–2 ГПа.

В настоящей статье для этих смесей также приводятся новые результаты по оценке критических условий НСД: критической относительной плотности заряда, δ_{cr} , выше которой наблюдается срыв НСД и критической скорости D_{cr} НСД при плотности ρ_{cr} и пороговом давлении инициирования НСД. Кроме того, приводятся данные по скорости неидеальной детонации тройных смесей ПХА и алюминия с добавкой нитрометана и гексогена. Сравнение зависимостей скорости НСД от плотности заряда для тройных смесей и смесей ПХА с ПММА и алюминием, полученных в данной работе и в исследованиях американских авторов [6–10], и анализ наблюдаемых различий позволили сделать определенные выводы о механизмах взаимодействия компонентов и стационарности процесса.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовались высокоплотные прессованные заряды с пористостью 2–20%, состоящие из мелкодисперсных смесей ПХА со взрывчатыми и невзрывчатыми горючими добавками, включая ПММА, мелкодисперсный алюминий, гексоген и нитрометан (НМ). Средний размер частиц ПХА составлял 20, 50 и 90 мкм, гексогена – 40 мкм. Порошок ПММА состоял из частиц со средним размером 4 мкм. Мелкодисперсный алюминий использовался в виде пудры марки ПАП-2 с

удельной поверхностью 4.132 м²/г и размером частиц от 0.03 до 10 мкм и порошка АСД-4 с удельной поверхностью 0.6 м²/г и эффективным диаметром сферических частиц 3.7 мкм. После тщательного смешения составы прессовались при комнатной температуре до заданной и равномерно распределенной по объему плотности в таблетки с отношением высоты к диаметру 0.5–0.8, из которых затем составлялся заряд необходимой длины.

Пастообразные составы типа ПХА/ПАП-2/НМ готовились путем сухого предварительного смешения твердых компонентов и последующего постепенного введения НМ при непрерывном перемешивании. Смеси дисперсных компонентов алюминия и ПХА готовились в соотношениях 1/1 и 1/2 по массе. Из-за большого количества чешуйчатого алюминия создавался каркас с упругими свойствами. При добавлении нитрометана в количестве 10 вес.% и более образовывалась пастообразная масса, в которой нитрометан, хорошо смачивая частицы алюминия, располагался в порах смеси. При увеличении содержания нитрометана пористость снижается, а относительная плотность увеличивается. Плотность составов с содержанием нитрометана 40 вес.% была близка к максимальной величине, и эти составы практически не имели пор. В опытах варьировали пористость, начальный размер частиц, состав смеси, тип горючей добавки.

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Измерялись скорость детонации и критические параметры НСД, такие как критическая относительная плотность заряда δ_{cr} (равная отношению начальной плотности заряда к теоретической максимальной плотности смеси), выше которой НСД затухала; критическая скорость детонации D_{cr} , измеряемая при критической плотности заряда; критическое давление инициирования детонации P_{LVD} . В качестве величины P_{LVD} принималось минимальное давление входящей ударной волны, обеспечивающей устойчивое распространение НСД по всей длине заряда.

Условия проведения опытов для смесей ПХА с ПММА, алюминием и гексогеном и для тройных смесей ПХА/алюминий/нитрометан различались. Опыты со смесями ПХА с ПММА и алюминием проводились в цилиндрических оболочках из прочной термообработанной стали марки 30ХГСА, имеющих внутренний канал диаметром 15.5 мм и длину 200 мм. Отношение толщины стенки к диаметру канала было ~1. Схема экспериментального устройства приведена справа на рис. 1. Прессованные таблетки смеси диаметром 15 мм склеивались по торцам. Собранный таким образом заряд бронировался в оболочке эпоксидной смолой. Оболочка имела радиальные отверстия диаметром 0.8 мм,

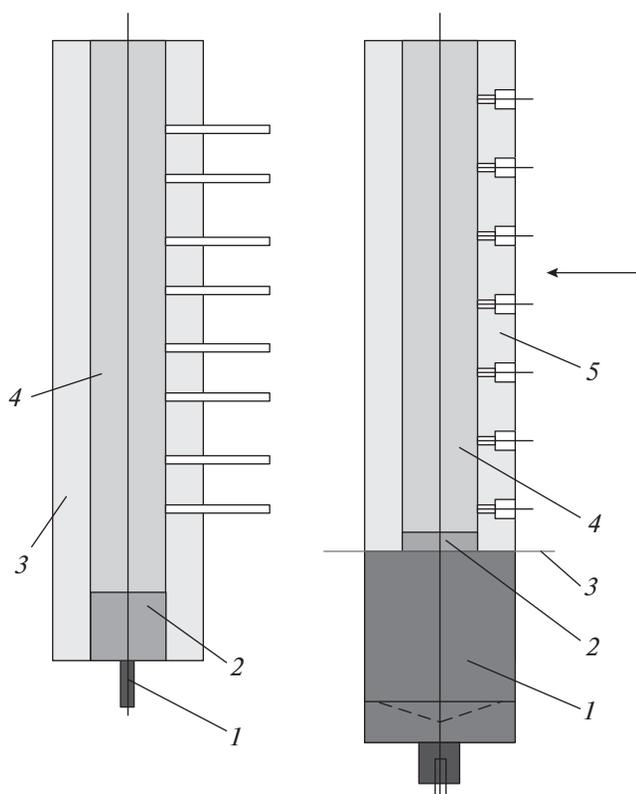


Рис. 1. Схемы постановки опытов с различным типом инициирования детонации. Слева: 1 – электродетонатор, 2 – бустер, 3 – стальная оболочка, 4 – высокоплотный заряд из исследуемой смеси. Справа: 1 – активный заряд из прессованной до плотности 1.36 г/см³ смеси ТНТ + хлорид натрия с плосковогнутой линзой, 2 – преграда, 3 – экран, 4 – высокоплотный заряд из исследуемой смеси, 5 – стальная оболочка.

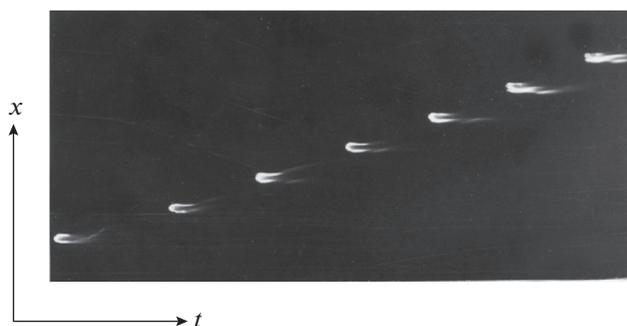


Рис. 2. Щелевая фоторегистрограмма распространения низкоскоростной детонации в высокоплотном заряде из смеси ПХА с 28 вес.% алюминия марки АСД-4 при $\delta = 0.92$ и скорости детонации 1800 м/с.

расположенные на расстоянии 25 мм друг от друга, которые использовались для фоторегистрации процесса с помощью ждущего фоторегистратора ЖФР-3. Для усиления свечения отверстия заполнялись порошкообразным ТЭНОм, чувствительным к ударной волне. Пример фоторегистрации

показан на рис. 2. Для зарядов, демонстрирующих НСД, которая распространяется со скоростью 2.5 км/с и менее, оболочка после опыта оставалась целой и использовалась многократно. Иницирование детонации осуществлялось плоской ударной волной треугольного профиля длительностью 10–12 мкс, генерируемой при взрыве активного заряда из прессованной до плотности 1.36 г/см³ смеси ТНТ с хлоридом натрия и вводимой через инертную сплошную преграду из меди или плексигласа. В случае медных преград амплитуду волны определяли по методу отражения с использованием известных изэнтроп разгрузки преграды и ударных адиабат исследуемых смесей, рассчитанных с использованием обобщенной ударной адиабаты [11–13]. В случае преград из плексигласа амплитуду и профиль инициирующей ударной волны определяли по результатам электромагнитных измерений [14].

Опыты на тройных смесях ПХА/ПАП-2/нитрометан проводились в стальных трубах внутренним диаметром 21 мм и длиной 360 мм с толщиной стенок 6 мм. Детонация возбуждалась капсюлем-детонатором через боевик, в качестве которого использовался заряд А-IX-1 массой 4 г, спрессованный до плотности 1.8 г/см³ (см. рис. 1, схема слева). Ряд опытов провели при инициировании путем перехода горения в детонацию. Длина оболочки была увеличена до 540 мм, смесь поджигали с помощью электровоспламенителя. Для измерения скорости детонации по длине оболочки использовали оптоволоконную методику. Измерения проводились на 10 базах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Влияние свойств горючей добавки на закономерности распространения детонации в смесях ПХА с ПММА

Составы исследуемых смесей ПХА/ПММА приведены в табл. 1. Здесь же приведены соотношения компонентов, значения стехиометрического коэффициента α и максимальной расчетной плотности смеси $\rho_{ТМД}$ из работы [15]. Стехиометрический коэффициент определяли по формуле

$$\alpha = \frac{m_{\text{ПХА}}/m_{\text{ПММА}}}{(m_{\text{ПХА}}/m_{\text{ПММА}})_{st}},$$

где в числителе даны массовые доли компонентов в исследуемой смеси, а в знаменателе – те же величины для стехиометрической смеси. Составы с $\alpha < 1$ отвечают богатым горючим смесям.

Для каждой смеси определялось наибольшее значение относительной плотности δ_{cr} , при котором детонация еще распространяется в данных условиях. Если плотность заряда превышала критическую, то на подложке после опыта оставались следы вещества, а на фоторегистрограмме высве-

Таблица 1. Характеристики составов ПХА с ПММА и критические параметры детонации в стальной оболочке с внутренним диаметром 15.5 мм

№ состава	Состав ПХА/ПММА	α	$\rho_{ТМД}$, г/см	δ_{cr}	D_{cr} , м/с
1	85/15	1	1.78	0.97	2100
2	74/26	0.5	1.67	0.94	2240
3	53/47	0.2	1.49	0.85	2180
4	100/0	—	1.95	0.91	2270

чивались лишь отверстия, расположенные ближе к месту инициирования. Значения критических параметров НСД D_{cr} и δ_{cr} также приведены в табл. 1. Наибольшая величина δ_{cr} получена для стехиометрической смеси; при обогащении горючим компонентом значение δ_{cr} снижается. При этом значения D_{cr} для всех исследованных составов остаются приблизительно одинаковыми.

Зависимость скорости детонации от относительной плотности для исследованных смесей и чистого ПХА показана на рис. 3. Отметим наличие характерных участков на зависимостях $D(\delta)$, среди которых можно выделить несколько. Как для смесей ПХА/ПММА, так и для чистого ПХА скорость детонации с ростом плотности увеличивается, достигает максимума и затем снижается, что является характерным для взрывчатых веществ

(ВВ), относящихся к группе II. Этот же эффект наблюдается и для других составов. Отличительной особенностью исследуемых смесей является обнаруженный платообразный участок, на котором увеличение плотности практически не оказывает влияния на величину скорости детонации. Для смесей составов № 2 и № 3, переобогащенных горючим, участок “плато” наблюдается в достаточно широком диапазоне плотностей при их высоких относительных значениях. Именно эти результаты определяют привлекательность высокоплотных зарядов на основе системы ПХА – горючее для практического использования их с целью получения низких скоростей детонации – на уровне 2000 м/с.

Сравнение полученных данных с экспериментальными результатами других авторов показало, что заряды смесей из мелкодисперсного ПХА с 5

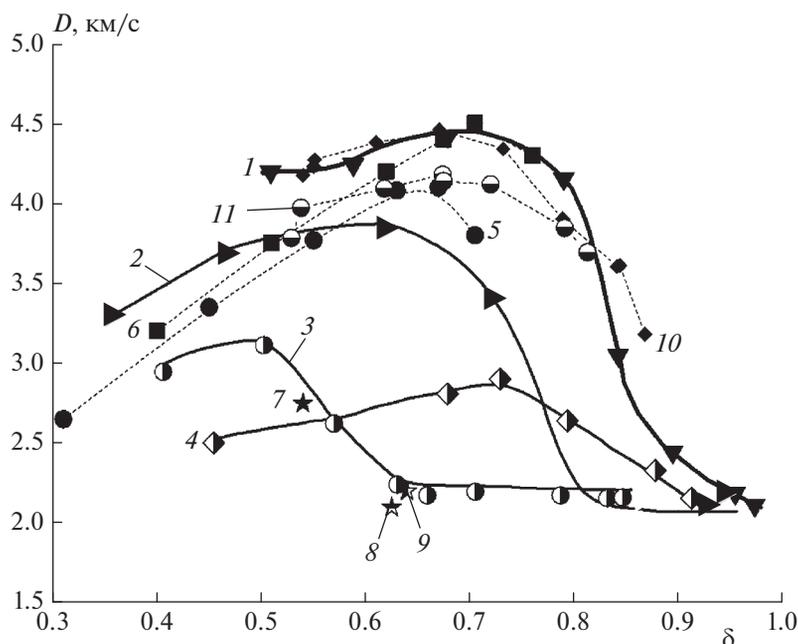


Рис. 3. Зависимость скорости детонации от относительной плотности заряда δ для составов ПХА с ПММА при различном соотношении компонентов. Цифры 1–4 указывают номера смесей, характеристики которых даны в табл. 1; 5 – смесь ПХА/Al 95/5 (вес.%) в заряде диаметром 50.8 мм [16]; 6 – смесь ПХА/Al 90/10 (вес.%) в заряде диаметром 50.8 мм [16]; 7 и 8 – экспериментальные точки для чистого ПХА [17]; 9 – заряды из чистого ПХА [8]; 10 – зависимость для состава ПХА/воск 90/10 (вес.%) [8]; 11 – зависимость для состава ПХА/воск 80/20 (вес.%) [9]. Самая левая точка на кривой 2 соответствует смеси ПХА/ПММА 84/26 (вес.%) [18].

и 10 вес.% алюминия в оболочках из целлофана диаметром 50,8 мм и смесей ПХА с 10 и 20 вес.% воска диаметром 50 мм без оболочки (кривые 5 и 6 на рис. 3), исследованные в работе [7], демонстрируют схожее поведение с исследуемыми составами на основе смесей ПХА с ПММА: рост скорости детонации при увеличении относительной плотности с максимумом в районе 0.7. Это соответствует полученным нами данным для составов с близкой долей ПХА и близким размером частиц. Составы смесей ПХА–воск из работы [10] также демонстрируют схожие результаты с данными, полученными в этой работе. Однако критические условия детонации в случае отсутствия прочной оболочки отвечают гораздо более высоким скоростям детонации и меньшим относительным плотностям заряда. Данные для относительных плотностей $\delta = 0.85$ и выше получены лишь в проведенных нами опытах в прочных стальных оболочках. Что касается данных по скоростям детонации для чистого ПХА, которые были получены для разных относительных плотностей в работах [8, 9], то они близки к данным, полученным нами. В целом, согласие с работами других авторов показывает, что закономерности, полученные в нашем исследовании, можно считать достоверными.

Были также проведены исследования влияния диаметра заряда на скорость НСД в прочных неразрушающихся оболочках длиной 300 мм. При относительной плотности $\delta = 0.94$ заряды ПХА/ПММА 85/15 с диаметром 15, 40 и 60 мм детонировали со скоростями 2250, 2100 и 2000 м/с соответственно. Различия в скоростях фронта оказались небольшими – в пределах 10%. При этом наблюдалась еще одна особенность низкоскоростного режима детонации. При значении отношении толщины стенки к диаметру ~ 1 скорость не росла при увеличении диаметра заряда, а снижалась.

Влияние природы горючей добавки на скорость детонации высокоплотных смесей

Ранее для области значений насыпной и умеренной плотностей заряда было установлено [6, 11], что природа горючей добавки оказывает существенное влияние на скорость и критические условия детонации, в том числе при введении ее в такие окислители, как ПХА и аммиачная селитра. В области высоких плотностей заряда измерены скорости детонации не только для смесей ПХА с ПММА, но и для составов с алюминием марки АСД-4, полистиролом и смешанным горючим на основе алюминия и ПММА. Опыты проводились в прочных стальных оболочках с диаметром канала 15 мм и длиной 200 мм. Относительная плотность заряда равнялась 0.9–0.94, что отвечает интервалу плотностей, в котором скорость НСД практически не зависит от плотности. Полученные данные представлены в табл. 2. Видно, что скорость детонации

Таблица 2. Скорости НСД для составов на основе ПХА с различными горючими добавками

Состав	Скорость детонации, м/с
ПХА/Al 72/28	1800
ПХА/ПММА/Al 75/15/10	2080
ПХА/ПММА/Al 74/13/13	1980
ПХА/ПММА 85/25	2250
ПХА/ПС 90/10	1910

высокоплотных зарядов в исследованном диапазоне соотношения компонентов по существу не зависит от природы горючего.

Полученные результаты по критическим параметрам и закономерностям распространения НСД в высокоплотных зарядах из смесей ПХА с горючими добавками находят свое объяснение, если принять, что параметры низкоскоростной детонации зависят в основном от теплоты сгорания ПХА – окислителя, способного к самостоятельной детонации. Этот вывод подтверждается результатами исследований структуры волны НСД с использованием электромагнитного метода и метода следовых отпечатков, проведенных в работах [14, 15], которые указывают на стадийное тепловыделение исследуемых смесей при высокой плотности. В частности было показано, что профиль массовой скорости в смесях ПХА/ПММА при высоких плотностях имеет особенность в виде плато, а следовые отпечатки – неоднородности различного вида и размера при переходе от одной плотности к другой.

Влияние добавок ВВ на скорость детонации высокоплотных смесей на основе ПХА

Гипотеза о ведущей роли горения зерен перхлората в механизме распространения детонации в высокоплотных составах ставит интересный вопрос о том, как будет изменяться скорость детонации, если в состав двойной смеси ПХА с инертным горючим ввести добавку взрывчатого материала. Были проведены две серии опытов. В первой серии в качестве ВВ использовался жидкий нитрометан, во второй – дисперсное ВВ гексоген.

Опыты с добавкой нитрометана были проведены для сверхбогатых смесей ПХА с алюминием марки ПАП-2. Результаты измерений в виде зависимости скорости детонации от относительной плотности заряда приведены на рис. 4. Видно, что при наличии нитрометана кривые не имеют выраженного максимума: скорость детонации монотонно растет при увеличении плотности вплоть до максимальной величины, что является характерным для ВВ из группы I. Опыты, проведенные при инициировании путем перехода горения в детонацию, дали практически те же результаты, что и

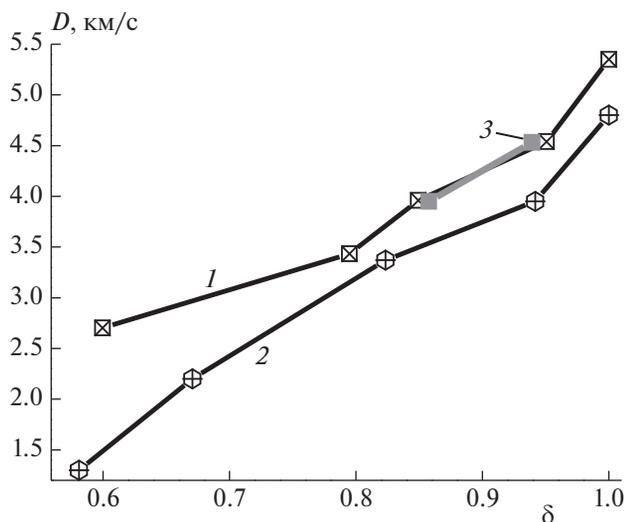


Рис. 4. Зависимость скорости детонации от относительной плотности для богатых составов алюминий/ПХА/нитрометан с различным соотношением компонентов и различным типом инициатора: 1 и 2 – смеси алюминий/ПХА в массовом соотношении 1/1 и 1/2 с добавкой нитрометана. Добавка нитрометана увеличивается по мере роста относительной плотности (10, 17, 23, 30 и 40 вес.%), инициирование капсюлем-детонатором через промежуточный заряд ВВ; 3 – смесь алюминий/ПХА в массовом соотношении 1/1 с добавкой нитрометана (23 и 30 вес.% для нижней и верхней точек соответственно), инициирование путем перехода горения в детонацию.

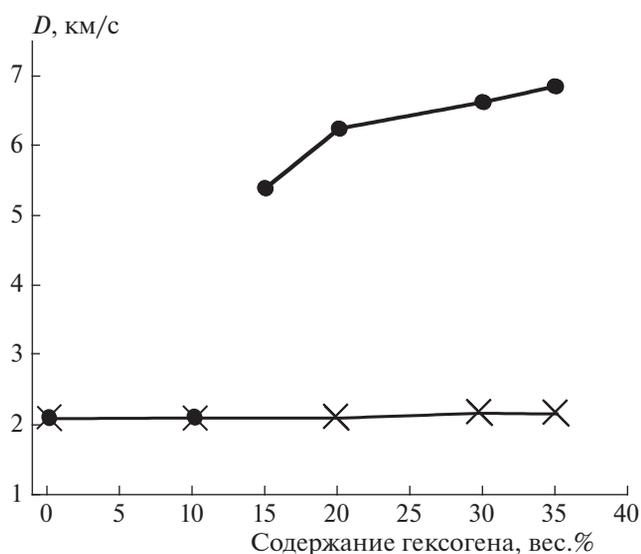


Рис. 5. Зависимость скорости детонации от содержания гексогена, введенного в смесь ПХА с 15 вес.% ПММА. Относительная плотность заряда $\delta = 0.97$. Крестиком обозначены результаты опытов со слабым инициированием, кружком – с сильным инициированием.

опыты с инициированием капсюлем-детонатором через боевик из ВВ. Отсутствие влияния условий инициирования свидетельствует о стационарности наблюдаемого режима детонации. Различие между закономерностями, наблюдаемыми при детонации двойных смесей ПХА с горючей добавкой и тройных смесей алюминий/ПХА/НМ, указывает на то, что в присутствии нитрометана горение зерен ПХА перестает играть ведущую роль при распространении детонации.

Проведены эксперименты, в которых дисперсная добавка гексогена в количестве от 5 до 35 вес.% вводилась взамен ПХА в смесях с содержанием ПММА 15 вес.%. Опыты проводились с зарядами относительной плотности $\delta = 0.97$ в прочных стальных оболочках с каналом диаметром 15 мм и длиной 200 мм. Размер частиц гексогена составлял 40 мкм. Использовались два режима инициирования: при слабом инициировании в исследуемую смесь входила ударная волна с амплитудой 1.3 ГПа, при сильном инициировании амплитуда входящей волны равнялась 3 ГПа. Под сильным и слабым инициированием ниже подразумевается использование вышеописанного способа инициирования, при котором варьировалось расстояние между преградой из меди и высокоплотным зарядом.

Результаты опытов приведены на рис. 5. Видно, что введение гексогена при слабом инициировании практически не влияет на скорость НСД, которая составила 2050–2200 м/с. Однако в зарядах с содержанием гексогена свыше 10% мощность инициатора начинает влиять не только на скорость фронта, но и на режим распространения детонации. В зависимости от амплитуды иницирующей ударной волны наблюдается либо низкая скорость детонации (около 2000 м/с), характерная для НСД, либо высокая (около 6000 м/с), характерная для нормальной детонации. Для смеси ПХА/ПММА/гексоген состава 65/15/20 критические давления инициирования НСД и нормальной детонации равны соответственно 1 и 3.5 ГПа. Более подробно результаты измерения критического давления инициирования представлены в следующем разделе.

Критические давления инициирования НСД

Были исследованы стехиометрические смеси ПХА с 28 вес.% алюминия марки АСД-4 и 15 вес.% ПММА и смесь ПХА с 47 вес.% ПММА, сильно обогащенная горючим. Опыты проводились при относительной плотности заряда в интервале 0.8–0.92, который приходится на платообразный участок зависимости скорости НСД от плотности. Результаты опытов приведены в табл. 3. Можно видеть, что в случае стехиометрических смесей значение P_{LVD} оказалось выше для составов с алюминием, чем для составов с ПММА. Величина P_{LVD} возрастает

Таблица 3. Критические давления инициирования низкоскоростной детонации высокоплотных смесей

Состав	δ	P_{LVD} , ГПа
ПХА/АI 72/28	0.85	1.8
ПХА/ПММА 85/15	0.92	1.3
ПХА/ПММА 85/15	0.8	1.1
ПХА/ПММА 53/47	0.8	1.4

тает при увеличении плотности и содержания горючего компонента.

Отдельные эксперименты были проведены с ударными волнами треугольного профиля с увеличенной до 18 мкс их длительностью (за счет измерения воздушного зазора между инициирующей сборкой и зарядом). Отмечен эффект, согласно которому увеличение длительности ударной волны приводит к снижению P_{LVD} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы особенности и критические условия распространения низкоскоростной детонации в высокоплотных зарядах из мелкодисперсных составов на основе смесей ПХА с горючими и взрывчатыми добавками, заключенных в стальные и полиэтиленовые оболочки при различных начальных относительных плотностях заряда и типах горючего. Показано, что в случае смесей ПХА с горючими добавками зависимость скорости детонации от относительной плотности заряда имеет платообразный участок на уровне 2000 м/с и не зависит от плотности и природы горючего компонента. Определена критическая плотность заряда, выше которой наблюдается срыв низкоскоростной детонации. В случае тройных смесей с добавкой жидкого ВВ (нитрометана) подобная зависимость отсутствует, и скорость детонации монотонно растет по мере увеличения относительной плотности. Определены критические давления инициирования составов 1.1–1.8 ГПа в диапазоне относительных плотностей 0.8–0.92, где не наблюдается влияния плотности на скорость детонации. Отмечено, что увеличение длительности инициирующей ударной волны треугольного профиля приводит к снижению давления детонации. Показано, что в присутствии жидкого ВВ нитрометана горение зерен ПХА перестает играть ведущую роль при распространении детонации, а в случае использования добавок гексогена влияние на скорость детонации проявляется при их содержании в смеси более 10 вес. %.

Часть экспериментальных данных была получена с использованием оборудования УНУ “Сфера” Московского регионального взрывного ЦКП РАН в рамках программы фундаментальных исследований РАН.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 20-08-00654 А (в части исследований детонационных характеристик сверхбогатых составов на основе ПХА), а также частично за счет субсидий на выполнение государственного задания по теме 0082-2018-0002, номер государственной регистрации АААА-А18-118031490034-6 (исследования критических условий инициирования неидеально детонирующих составов), теме № 0089-2019-0001 (измерения критических скоростей детонации составов на основе ПХА) и теме № 0082-2019-0018 (измерения критических давлений инициирования).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев А.Ф., Боболев В.К., Коротков А.И., Сулимов А.А., Чуйко С.В. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
2. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А. Конвективное горение и низкоскоростная детонация пористых энергетических материалов. М.: Торус Пресс, 2017.
3. Храповский В.Е., Сулимов А.А., Ермолаев Б.С. // Хим. физика. 1997. Т. 16. № 11. С. 99.
4. Худавердиев В.Г., Сулимов А.А., Ермолаев Б.С., Храповский В.Е. // Хим. физика. 2015. Т. 34. № 11. С. 33.
5. Ермолаев Б.С., Комиссаров П.В., Соколов Г.Н., Борисов А.А. // Хим. физика. 2012. Т. 31. № 9. С. 55.
6. Price D., Clairmont A.R., Erkman Jr. // Combust. and Flame. 1977. V. 29. № 1. P. 87.
7. Price D., Clairmont A.R., Erkman Jr., Erkman J.O. // Ibid. 1973. № 20. P. 389.
8. Tulis A.J. // J. Hazardous Mater. 1977. № 2. P. 171.
9. Tulis A.J. // J. Hazardous Mater. 1980. № 4. P. 113.
10. Price D., Clairmont A.R., Erkman Jr., Erkman J.O. // Combust. and Flame. 1971. № 17. P. 321.
11. Беляев А.Ф. Вопросы теории взрывчатых веществ. М.: АН СССР, 1947. С. 29.
12. Афанасенков А.Н., Богомолов В.М., Воскобойников И.М. // Взрывное дело. 1970. № 68/25. М.: Недра, С. 68.
13. Афанасенков А.Н. // Взрывное дело. 1970. № 68/25. М.: Недра, С. 93.
14. Мартынюк В.Ф., Сулимов А.А., Дубовицкий В.Ф. // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17. № 4. С. 136.
15. Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1973.
16. Мартынюк В.Ф., Сулимов А.А., Чамров В.А., Дубовицкий В.Ф., Сукоян. М.К. // Хим. физика. 1983. Т. 2. № 10. С. 1435.
17. Andersen W.H., Pesante R.E. // Proc. 8th Sympos. (Intern.) on Combust. Baltimore: Williams and Wilkins, Md., 1962. P. 705.
18. Беляев А.Ф., Коротков А.И., Обменин А.В., Сулимов А.А. // Физика горения и взрыва. 1968. № 2. С. 238.