

УДК 534.222

СКОРОСТЬ ДЕТОНАЦИИ МОДЕЛЬНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СМЕСЕВЫХ СОСТАВОВ И ЕЕ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ СОДЕРЖАНИЯ КОМПОНЕНТОВ И ДИАМЕТРА ЗАРЯДА

А. А. Матвеев, В. Н. Куликов, А. Н. Осавчук, А. Р. Рябокон,
Н. И. Шишов

Федеральный центр двойных технологий «Союз», 140090 Дзержинский, soyuz@fcdt.ru

Приведены результаты экспериментально-расчетных исследований влияния ряда факторов на скорость детонации модельных взрывчатых смесевых составов: типа взрывчатого вещества и полимерного связующего, содержания и размера частиц компонентов (взрывчатого вещества, алюминиевого порошка, окислителя), диаметра заряда. Установлено, что скорости детонации взрывчатого вещества (ВВ) — окфола и смесевых составов на активном связующем при содержании ВВ 60÷80 % (CL-20, октоген) близки между собой. Наиболее заметное снижение скорости детонации наблюдается для смесевых составов с массовым содержанием алюминия более 20 % при повышении концентрации окислителя от 6 до 30 %. Увеличение размера частиц взрывчатого вещества и окислителя приводит к некоторому росту экспериментальной скорости детонации взрывчатого состава. Предельный диаметр детонации смесевых составов на основе активного связующего составляет 40÷80 мм в зависимости от содержания компонентов.

Ключевые слова: скорость детонации, взрывчатый смесевой состав, содержание компонентов, взрывчатое вещество, алюминиевый порошок, предельный диаметр детонации.

DOI 10.15372/FGV2024.9481
EDN TMEGXH

ВВЕДЕНИЕ

Скорость детонации взрывчатого состава (ВС) — одна из основных физических характеристик, которая определяет эффективность его использования, а также уровень технологической взрывоопасности производства. В настоящее время в достаточно полном объеме изучен механизм детонации газовых систем, в меньшей степени — жидких и индивидуальных взрывчатых веществ (ВВ) [1, 2]. Детонационные процессы в смесевых взрывчатых композициях, разрабатываемых в последние несколько десятков лет за рубежом и в России [2–13] и имеющих перспективное применение в народном хозяйстве, широко изучаются. Основными их компонентами (как в случае твердых ракетных топлив [14]) являются: бризантное ВВ (гексоген, октоген, CL-20), окислитель — в основном перхлорат аммония (ПХА), полимерное (активное или инертное) связующее и металлическое горючее — алюминий. Детонационноспособными из них являются первые три, а алюминиевый порошок способен к взрывному превращению только в распыленном виде

Таблица 1

Детонационные характеристики компонентов ВС

Компонент	D_{exp} , м/с	D_{C-J} , м/с	d_{cr} , мм
Гексоген	8 600 ¹⁾	8 560	1.5 ³⁾
Октоген	9 100	8 780	2.5
CL-20	9 400	9 682	1÷2
ПХА	3 500 ²⁾	—	40
Активное связующее: образец 1	7 650	6 960	20
образец 2	6 600	5 750	—

Примечание. D_{exp} , D_{C-J} — соответственно экспериментальная и расчетная скорость детонации, d_{cr} — критический диаметр детонации.

¹⁾При плотности $\rho \approx 1.7$ г/см³, ²⁾при $\rho \approx 1.5$ г/см³, ³⁾при $\rho \approx 1.0$ г/см³.

при определенной концентрации со скоростью ≈ 1800 м/с [15] (табл. 1).

Из-за содержания в ВС различных по физико-химическим свойствам компонентов (от двух до четырех) детонационный процесс

в них является неидеальным и многостадийным — для него характерно наличие увеличенной в сравнении с индивидуальным ВВ зоны реакции и дожигание продуктов за ней. Его параметры существенно зависят от характеристик рецептуры ВС, таких как содержание (соотношение) компонентов в смеси, их физико-химические свойства (основные — дисперсность, тип) и ряд других [1–3, 8, 9, 11–13, 16–18].

Проведенный анализ результатов исследований алюминизированных ВС [2–4, 6, 9, 16, 19–25] позволяет сделать следующие общие выводы:

- с увеличением содержания металлического порошка в смеси с ВВ скорость ее детонации D уменьшается, причем градиент зависимости скорости от содержания Al с уменьшением размера частиц порошка возрастает;
- применение в рецептуре ВС ультра- и нанодисперсного порошка Al не увеличивает скорость его детонации, а, наоборот, в основном снижает ее из-за свойств оксидной пленки металла;
- оптимальные параметры металлического горючего в смесевом ВС с точки зрения выделения энергии составляют: содержание — 15–20 %, размер частиц — 10–20 мкм;
- в зоне химической реакции детонации основного ВВ имеет место очень малая степень окисления алюминия, которая в зависимости от размера частиц может находиться в пределах 5–10 %, а основная часть энергии выделяется в более дальней зоне — в интервале от 0.001 до ≈ 2 мс.

Полученные на данном этапе результаты исследований не позволяют достоверно и в количественной форме объяснить механизм детонации смесевых ВС и прогнозировать их взрывные и энергетические свойства, а его разработка требует проведения комплексных экспериментально-теоретических работ с использованием новых современных методов. Вполне вероятно, что детонационный процесс в них развивается по некоторым схемам (вариантам) в зависимости от физико-химических свойств компонентов как в отдельности, так и в рецептуре ВС. Поэтому на данном этапе его изучения необходим обширный экспериментальный материал, касающийся как влияния физико-химических свойств компонентов, так и разработки модели детонационного процесса в подобных неидеальных системах.

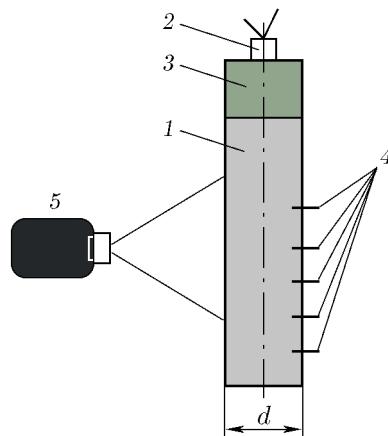


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — заряд ВС, 2 — электродetonатор, 3 — дополнительный детонатор, 4 — ионизационные датчики, 5 — СФР-3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе приведены результаты экспериментально-расчетных исследований [6, 13] влияния на скорость детонации модельных ВС таких физико-химических параметров, как тип ВВ, массовое содержание и размер частиц компонентов, диаметр заряда. Поскольку исследуемые системы состояли из смеси до четырех основных компонентов (ВВ — октоген и алюминиевый порошок марки АСД, окислитель — ПХА и полимерное связующее), то изучать влияние одного из них можно только условно, так как его содержание в рецептуре определяет количество других. При проведении данных исследований массовое содержание связующего составляло $\approx 15 \div 17$ %.

Схема проведения эксперимента по определению скорости детонации D ВС была стандартной (рис. 1): исследуемые заряды в виде отверженных цилиндров (1) (шашек) или пластичных масс в прозрачной слабопрочной оболочке инициировали от электродetonатора (2) с дополнительным детонатором (3). Скорость детонации в эксперименте (D_{exp}) регистрировали двумя способами: 1 — с помощью ионизационных датчиков (4), 2 — с помощью непрерывной фотографии процесса (5) на участке, равном $2.5 \div 7$ диаметрам заряда d .

Расчетные значения скорости детонации (D_{C-J}) вычислены по термодинамической методике [19], разработанной в МГТУ им. Н. Э. Баумана, для идеального режима де-

тонационного процесса с полным химическим и тепловым равновесием в продуктах детонации (ПД) при использовании уравнений состояния ПД в форме BKW.

Влияние массового содержания алюминиевого порошка

Влияние массового содержания (0–40 %) алюминиевого порошка с размером частиц 3–5 мкм на скорость детонации ВС изучено при двух массовых концентрациях окислителя (6 и 30 %). Все изменения содержания этих компонентов в рецептуре ВС были выполнены за счет ВВ. Результаты исследований приведены на рис. 2, из которого следует, что при 6 % окислителя с увеличением массового содержания металлического горючего от 0 до 40 % зарегистрированная в экспериментах скорость D_{exp} снижается незначительно, в отличие от смесей Al—ВВ [9, 16]. Повышение концентрации окислителя в ВС с 6 до 30 % приводит к заметному снижению ($\approx 10\%$) значений D_{exp} , причем это различие возрастает при содержании $Al > 20\%$, что подтверждается данными ряда работ [2–4, 9].

Значения D_{exp} и D_{C-J} при одновременном увеличении массового содержания Al и окислителя в ВС неоднозначно различны, что обусловлено режимом неидеальной детонации в подобных многокомпонентных системах. Данный факт обусловлен, по-видимому, и другими при-

чинами: 1) в ряде экспериментов не был достигнут предельный режим детонации; 2) в термодинамическом расчете не учитывались ни размер частиц компонентов, ни кинетика их разложения.

Следует также отметить, что в отличие от экспериментальных зависимостей $D_{exp}(Al)$ расчетные зависимости при обеих концентрациях окислителя близки как по значению, так и по форме. Совпадение значений D_{exp} и D_{C-J} при 6 % окислителя в ВС наблюдается для составов с 20 % Al, а при содержании окислителя 30 % — с 40 % Al.

Влияние массового содержания окислителя

Влияние содержания (6–30 %) окислителя на скорость детонации модельных образцов ВС исследовано при двух постоянных количествах (20 и 30 %) алюминиевого порошка (рис. 3). Все изменения содержания этих компонентов в ВС выполнены также за счет ВВ, в связи с чем его концентрация в рецептуре существенно снижалась — с 60 до 25 %.

На рис. 3 видно, что экспериментальные скорости детонации ВС с увеличением массового содержания окислителя для каждого из двух количеств Al снижаются и различие значений увеличивается (кривые 2 и 4 соответственно), а расчетные скорости (кривые 1 и 3) практически не изменяются. При этом зависимости D_{exp} и D_{C-J} от содержания окислителя пересекаются при 6 % окислителя в составе с 20 % металла и при 20 % — в составе с 30 % Al.

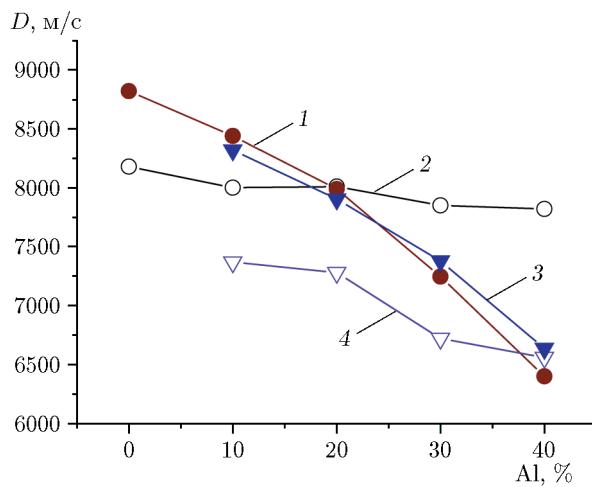


Рис. 2. Зависимость скоростей D_{exp} и D_{C-J} детонации ВС от содержания Al:

1, 2 — соответственно расчет и эксперимент при 6 % окислителя, 3, 4 — то же самое при 30 % окислителя

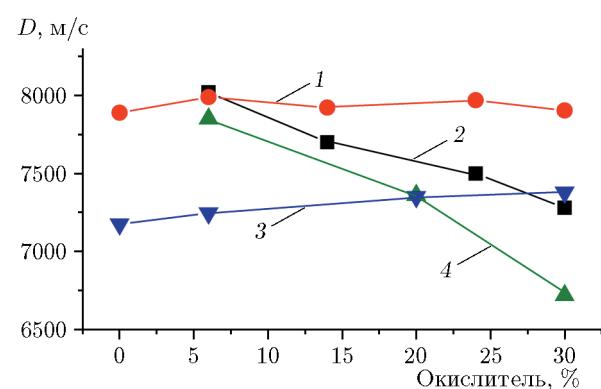


Рис. 3. Зависимость скоростей D_{exp} и D_{C-J} детонации ВС от содержания окислителя:

1, 2 — соответственно расчет и эксперимент при 20 % Al, 3, 4 — то же самое при 30 % Al

Таблица 2

Скорость детонации образцов ВС в зависимости от размера частиц компонентов

Компонент	Содержание, %		Размер частиц, мкм (соотношение)		D_{exp} , м/с		D_{C-J} , м/с	
	1	2	1	2	1	2	1	2
ВВ	79	79	35, 160 (0.33)	35, 160 (0.8)	8 280	8 060	8 159	8 159
Алюминиевый порошок	14	20*	4 ÷ 6	15*	6 560	6 810*	6 635	6 983*
Окислитель	52	50	20 ÷ 27	220 ÷ 270	7 120	7 700	8 439	8 439

*Образец 2 — 45 % крупнодисперсного и 55 % высокодисперсного порошка.

Влияние размера частиц ВВ, Al, окислителя

Влияние размера частиц ВВ (октогена) на скорость детонации изучено для образцов ВС, содержащих смесь мелкой (35 мкм) и средней (160 мкм) фракций ВВ при различных их соотношениях (табл. 2).

Рассмотрена возможность применения в рецептуре ВС более крупнодисперсного порошка Al (типа АСД-4) (см. табл. 2).

Влияние размера частиц окислителя исследовано для двух его фракций: со средним размером частиц 20 ÷ 27 и 220 ÷ 270 мкм. Его массовое содержание в рецептуре ВС составляло 6 и/или 14 %, а алюминиевого порошка со средним размером частиц 4 ÷ 6 мкм содержалось 20 %. Результаты исследований приведены в табл. 2 и на рис. 4. Из них следует:

— увеличение содержания более мелкой фракции октогена в рецептуре ВС приводит к

некоторому снижению скорости детонации образца,

— замена 45 % порошка Al на более крупнодисперсный привела даже к некоторому возрастанию значения D_{exp} , что, возможно, обусловлено меньшим количеством в ВС связующего (13.5 %) и более высокой концентрацией ВВ (на 43 %);

— использование в ВС крупнодисперсного окислителя в количестве 14 % приводит к увеличению значения D_{exp} на $\approx 7\%$, а при содержании 6 % — к снижению D_{exp} на $\approx 2\%$.

Влияние типа компонентов (ВВ, связующего) и содержания ВВ

Изучены образцы ВС, содержащие два типа ВВ — октоген или CL-20 и два типа связующего — инертное или активное (детонационноспособное), а также различное количество октогена. Результаты исследований приведены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что скорости детонации всех образцов ВС достаточно высоки и соизмеримы с рядом штатных ВВ [2]. Наибольшее значение зарегистрировано для образца 2, содержащего в качестве компонента CL-20. Его аналог по другим компонентам, но с октогеном (образец 1) имеет существенно более низкие экспериментальные и расчетные значения скорости детонации. При увеличении содержания в ВС октогена с 60 до 80 % значения D_{exp} возрастают незначительно (образцы 1 и 4). Состав, содержащий инертное связующее (образец 3), имеет более низкую экспериментальную скорость детонации и особенно — расчетную, что вполне ожидаемо.

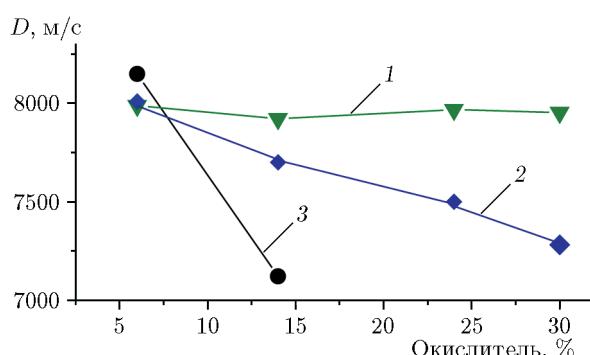


Рис. 4. Зависимость скоростей D_{C-J} и D_{exp} детонации ВС от содержания и размера частиц окислителя при 20 % Al:

1 — расчет, 2, 3 — эксперимент, размер частиц соответственно 220 ÷ 270 и 20 ÷ 27 мкм

Таблица 3

Скорость детонации ряда образцов ВС с различным типом ВВ и связующего

Номер образца	ρ , г/см ³	D_{exp} , м/с	D_{C-J} , м/с
1	1.85	7 860 ²⁾	8 010
2	1.93	8 600 ³⁾	8 523
3 ¹⁾	1.71	8 040	7 750
4	1.75	8 280	8 113

Примечание. ¹⁾ Взрывчатый состав на инертном связующем, ²⁾ при $\rho = 1.77$ г/см³, ³⁾ при $\rho = 1.92$ г/см³.

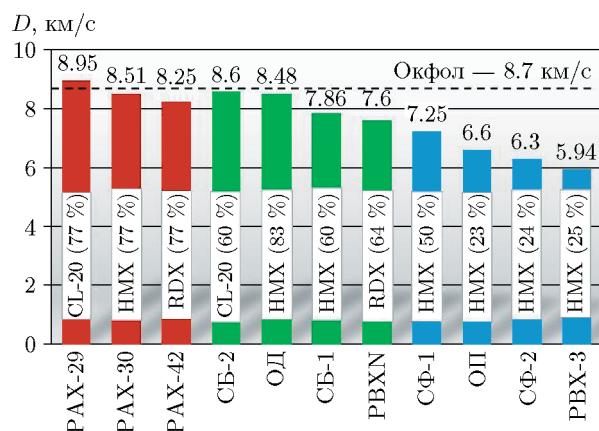


Рис. 5. Диаграмма значений экспериментальной скорости детонации ряда зарубежных и отечественных рецептур взрывчатых составов

На рис. 5 приведена диаграмма экспериментальных значений скорости детонации ряда зарубежных (типа РАХ и РВХ) и отечественных (СБ, СФ, ОД, ОП) рецептур алюминизированных ВС, отличающихся типом и содержанием базового ВВ (указано в процентах над столбцом), типом связующего, наличием окислителя и других компонентов, в сравнении с D_{exp} для окфорда. Видно, что составы, содержащие CL-20, обладают самой высокой скоростью детонации (находящейся на уровне окфорда), а минимальные значения $D_{exp} \approx 5.9 \div 6.6$ км/с соответствуют составам с содержанием 23 \div 25 % базового ВВ — HMX, что необходимо для поддержания их детонационной способности в безоболочечных зарядах диаметром $d = 30 \div 40$ мм.

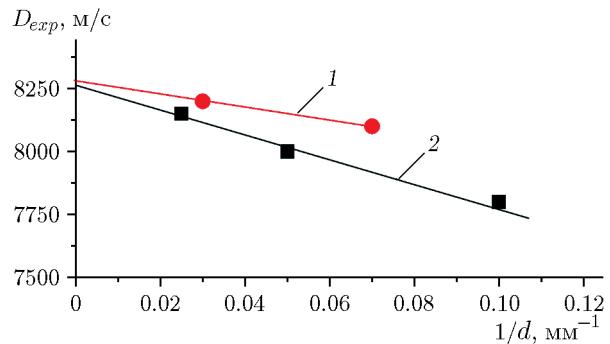


Рис. 6. Зависимость $D_{exp}(1/d)$ для ВС без Al (1) и с 20.3 % Al (2)

Влияние диаметра заряда ВС

Как известно [1–3, 9, 13, 20, 21, 25], скорость детонации ВВ (и ВС также) зависит от параметров его заряда, таких как пористость или плотность, длина и диаметр. В связи с этим определение критического и предельного диаметров ВВ является одной из основных задач при изучении его детонационной способности и оценке эффективности применения.

Характер зависимостей $D(d)$, полученных при исследовании ВС без металла и с 20.3 % Al, одинаков: с увеличением диаметра заряда d скорость возрастает, а затем остается постоянной. Это позволило по зависимостям $D = f(1/d)$ путем экстраполяции оценить предельные диаметры детонации зарядов — соответственно около 40 мм и более 50 мм (рис. 6). Максимальная скорость детонации ВС без металла составляет 8 280 м/с, что выше расчетной и близко к экспериментальному значению при $d = 40$ мм, а при содержании 20.3 % Al — 8 265 м/с, что ниже расчетной и экспериментальной при $d = 40$ мм.

Для четырехкомпонентных ВС с высоким содержанием окислителя (30 %) выполнены подробные экспериментальные исследования влияния диаметра заряда (20, 40 и 80 мм) на скорость детонации ВС при варьировании в них содержания Al (30, 35, 40 %), а также типа связующего в случае содержания Al 30 и/или 40 % при $d = 80$ мм. Пористость зарядов во всех экспериментах составляла $\approx 5\%$. Влияние параметров рецептуры и заряда ВС иллюстрируют рис. 7 и 8. На рис. 7 приведена зависимость $D_{exp}(d)$ заряда ВС при различном содержании Al и типе связующего, а на рис. 8 — зависимость расчетной и экспериментальной скорости детонации ВС от содержания Al и ти-

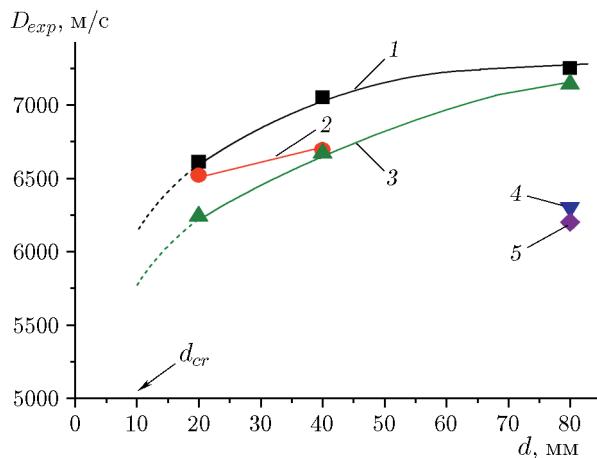


Рис. 7. Зависимость D_{exp} (d) для ВС с различным содержанием Al при разном типе связующего:

1 — 30 % Al, 2 — 35 % Al, 3 — 40 % Al, 4, 5 — ВС на основе инертного связующего при 30 и 40 % Al соответственно

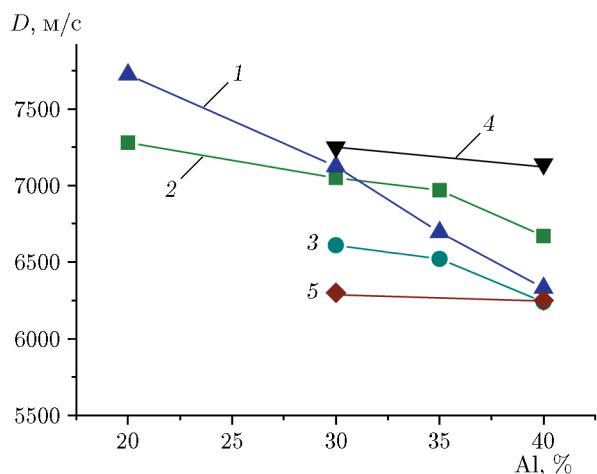


Рис. 8. Зависимость расчетных и экспериментальных скоростей детонации ВС от содержания Al и типа связующего при различных диаметрах заряда:

1 — расчет, ВС на активном связующем; 2—4 — эксперимент, ВС на активном связующем при $d = 80, 40, 20$ мм соответственно; 5 — эксперимент, ВС на инертном связующем при $d = 80$ мм

па связующего при различных диаметрах заряда. Из рис. 7 и 8 видно, что для данных рецептур ВС:

— при увеличении диаметра заряда в два раза (от 20 до 40 мм) значение D_{exp} возрастает на $\approx 7\%$, а далее темп роста скорости снижается;

— тип связующего (или его детонационная

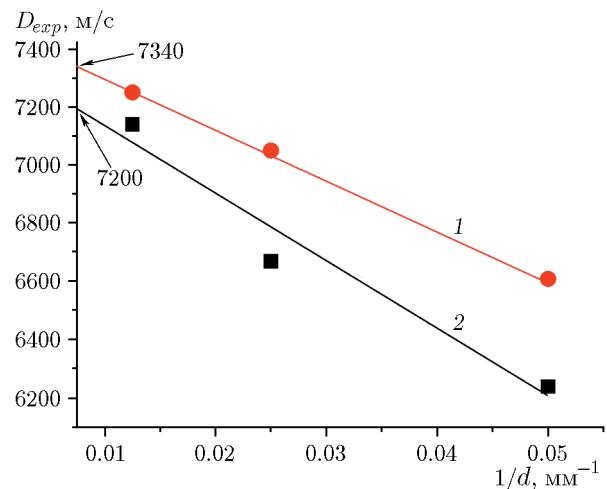


Рис. 9. Зависимость D_{exp} ($1/d$) для ВС с 30 % Al (1) и с 40 % Al (2)

способность) в ВС существенно влияет на скорость детонации и предельный диаметр заряда;

— при исследованных диаметрах заряда с увеличением содержания металлического горючего в ВС экспериментальная скорость детонации снижается;

— зависимость расчетной скорости детонации (рис. 8) от содержания металла имеет более резкий градиент спада в сравнении с экспериментальной.

На рис. 9 приведены зависимости D_{exp} ($1/d$) для двух рецептур ВС с высокими содержаниями окислителя (30 %) и Al, которые позволяют оценить значения предельных диаметров зарядов при их детонации. Максимальные скорости детонации при массовой концентрации алюминиевого порошка 30 и 40 % составляют примерно 7340 и 7200 м/с соответственно, что близко к экспериментальным значениям при диаметре заряда 80 мм и выше расчетных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнены экспериментально-расчетные исследования влияния на скорость детонации модельных рецептур взрывчатых смесевых составов ряда физико-химических параметров — типа, содержания и размера частиц компонентов и диаметра заряда.

2. Установлено, что скорости детонации взрывчатого вещества окфола и многокомпонентных взрывчатых составов на активном связующем, содержащих 60 \div 80 % мощно-

го ВВ (CL-20 или октоген), сопоставимы. Наиболее заметное снижение в экспериментах скорости детонации ВС наблюдается при содержании металлического горючего (Al) более 20 %. С увеличением содержания окислителя от 6 до 30 % значения D_{exp} снижаются ($\approx 10 \div 15 \%$). Увеличение размера частиц октогена и окислителя приводит к некоторому возрастанию ($\approx 5 \div 10 \%$) экспериментальной скорости детонации взрывчатого состава.

3. Предельный диаметр детонации взрывчатой смеси на основе активного связующего с содержанием окислителя 6 % без металлического горючего составляет ≈ 40 мм, а с 20.3 % алюминиевого порошка — ≥ 50 мм. Он увеличивается до 80 мм и более для взрывчатых составов с высоким содержанием окислителя (30 %) и Al (30 \div 40 %).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ФЦДТ «Союз».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.
- Физика взрыва: в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. — Изд. 3-е, испр. — М.: Физматлит, 2002.
- Талавар М. Б., Сивабалан Р., Аннияппан М., Горе Г. М., Астана С. Н., Гандхе Б. Р. Новые тенденции в области создания перспективных высокоэнергетических материалов // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 1. — С. 72–85. — EDN: OIHXG.
- Вадхе П. П., Павар Р. Б., Синха Р. К., Астана С. Н., Субхананда Рао А. Алюминизированные литьевые взрывчатые вещества (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 4. — С. 98–115. — EDN: JZGCCF.
- Милёхин Ю. М., Меркулов В. М., Осавчук А. Н., Зайчиков Ю. Е., Куликов В. Н., Шишов Н. И., Имховик Н. А., Одинцов В. А. Экспериментально-теоретические исследования взрывчатых свойств, бризантного и метательного действия многокомпонентных ВС // XI Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны»: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. — С. 5–10.
- Матвеев А. А., Куликов В. Н., Осавчук А. Н., Шишов Н. И. Исследование влияния содержания алюминия и окислителя в многокомпонентных литьевых системах на их взрывчатые характеристики и дробящее действие // Горение и взрыв. — 2013. — № 6. — С. 297–301. — EDN: SICZPL.
- Комаров В. Ф., Попок Н. И., Сакович Г. В., Казутин М. В., Вакутин А. Г., Аверин А. А. Реализация уровня детонации работы взрыва через структурные построения полидисперсного гетерогенного КВВ // Успехи в специальной химии и химической технологии: тр. всерос. науч.-техн. конф. РХТУ им. Д. И. Менделеева. — 2010. — С. 377–380.
- Куликов В. Н., Осавчук А. Н., Имховик Н. А., Одинцов В. А. Детонационные характеристики и метательно-дробящее действие многокомпонентных взрывчатых составов // Инж. журн.: наука и инновации. — 2013. — № 1 (13). — С. 58–70. — EDN: RACJUV.
- Давыдов В. Ю., Губин А. С. Зависимость скорости детонации и метательной способности металлизированных взрывчатых веществ от плотности заряда и содержания добавки // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 5. — С. 123–133. — EDN: SOCJEP.
- Liu J., Jiang W., Yang Q., Song J., Hao G., Li F. Study of nano-nitramine explosives: preparation, sensitivity and application // Defence Technol. — 2014. — V. 10, N 2. — P. 184–189. — DOI: 10.1016/j.dt.2014.04.002.
- Колганов Е. В., Смирнов С. П., Смирнов А. С. Простые методы расчета характеристик детонации и общая методология разработки методов оценки параметров взрыва // IX Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальное состояние веществ, детонация, ударные волны»: сб. тез. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007.
- Клименко В. Ю. Алюминизированные ВВ: физика детонации и численная модель детонации // Междунар. конф. «Ударные волны в конденсированных средах», Киев, Украина, 16–21 сент., 2012. — С. 135–143.
- Милехин Ю. М., Матвеев А. А., Куликов В. Н., Осавчук А. Н., Шишов Н. И. Зависимость скорости детонации смесевых алюминизированных взрывчатых составов от содержания и типа компонентов и диаметра заряда // XIV Междунар. конф. «HEMs-2018»: сб. тез. — 2018. — С. 24–26.
- Жуков Б. П. Энергетические конденсированные системы. — М.: Янус-К, 1999.
- Борисов А. А., Хасаинов Б. А., Вейссер Б., Санеев Э. Л., Фомин И. Б., Хомик С. В. О детонации взвесей алюминия в воздухе и кислороде // Хим. физика. — 1991. — Т. 10, № 2. — С. 250–272.

16. Gogulya M. F., Dolgorobodov A. Yu., Brazhnikov M. A., Baudin G. Detonation waves in HMX/Al mixtures (pressure and temperature measurements) // XI Int. Symp. on Detonation. — 1998. — Р. 979–988.
17. Селезнев А. А., Лашков В. Н., Алейников А. Ю., Ганчук Н. С. Обзор экспериментальных и расчетных результатов в поддержку нетеплового механизма разложения молекул ВВ при детонации // Междунар. конф. «Ударные волны в конденсированных средах», Киев, Украина, 16–21 сент., 2012. — С. 3–7.
18. Кузьмицкий И. В. О физической природе возникновения ячеистой структуры на фронте и в зоне химических реакций стационарной волны детонации Чепмена — Жуге // Междунар. конф. «Ударные волны в конденсированных средах», Киев, Украина, 16–21 сент., 2012. — С. 131–135.
19. Имховик Н. А. Параметры и особенности режимов детонации металлизированных взрывчатых веществ // Оборон. техника. — 2004. — № 1-2. — С. 8–20.
20. Gogulya M. F., Brazhnikov M. A. Detonation of metalized composite explosives // Shock Wave Science and Technology Reference Library / F. Zhang (Ed.). — 2009. — V. 4, Pt 4. — P. 217–286. — DOI: 10.1007/978-3-540-88447-7_4.
21. Manner V. W., Pemberton S. J., Gunderson J. A., Herrera T. J., Lloyd J. M., Salazar P. J., Rae P., Tappan B. C. The role of aluminum in the detonation and post-detonation expansion of selected cast HMX-based explosives // Propell., Explos., Pyrotech. — 2012. — V. 37, N 2. — P. 198–206. — DOI: 10.1002/prep.201100138.
22. Baker E. L., Capellos C., Stiel L. I. Stable detonation velocities for aluminized explosives // Sci. Technol. Energ. Mater. — 2006. — V. 67, N 4. — P. 134–138.
23. Liu D.-Y., Zhao P., Chan S. H.-Y., Hng H. H., Chen L. Effects of nano-sized aluminum on detonation characteristics and metal acceleration for RDX-based aluminized explosive // Defence Technol. — 2021. — V. 17, N 2. — P. 327–337. — DOI: 10.1016/j.dt.2020.12.001.
24. Xiang D.-L., Rong J.-L., He X. Detonation performance of four groups of aluminized explosives // Centr. Eur. J. Energ. Mater. — 2016. — V. 13, N 4. — P. 903–915. — DOI: 10.22211/cejm/67238.
25. Лавров В. В., Шведов К. К. Зависимость скорости детонации смеси нитрата аммония с гексогеном от диаметра заряда // Хим. физика. — 2003. — Т. 22, № 9. — С. 67–71. — EDN: OORJVT.

Поступила в редакцию 02.05.2024.
Принята к публикации 15.05.2024.