

УДК 662.2-391.4:544.454.3

МЕТАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

А. С. Юношев^{1,2}, А. В. Пластинин¹, С. И. Рафейчик¹, М. С. Воронин^{1,3}¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, yunoshev@hydro.nsc.ru²Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск³Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск

Измерена метательная способность эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного полимерными микробаллонами Exrapcel, в диапазоне начальной плотности $0.193 \div 1.2 \text{ г/см}^3$. Использовались метод торцевого метания и метод метания цилиндрической оболочки. Проведено сравнение этих результатов с полученными для аммонита 6ЖВ. Выполнено также сравнение экспериментальных результатов с расчетом по программе ANSYS AUTODYN.

Ключевые слова: эмульсионное взрывчатое вещество, метательная способность.

DOI 10.15372/FGV20180413

ВВЕДЕНИЕ

Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭмВВ) — широко используемые промышленные ВВ, основная область применения которых — горные работы [1]. В последнее время появляются сообщения о возможном использовании ЭмВВ в металлообработке: сварка взрывом, соединение арматур [2, 3]. Возможны и другие применения ЭмВВ, поскольку данные композиции обладают большим диапазоном детонационных характеристик в зависимости от начальной плотности ЭмВВ [4]. В данной работе изучалась метательная способность ЭмВВ, сенсibilизированного полимерными микробаллонами, с начальной плотностью $0.193 \div 1.2 \text{ г/см}^3$. Эти данные могут быть полезными как при поиске возможного практического использования ЭмВВ, так и для построения уравнений состояния продуктов детонации ЭмВВ и тестирования численных расчетов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ КОМПОЗИЦИИ

В качестве основы взрывной композиции выбрано ЭмВВ, состоящее из водного раствора аммиачной и натриевой селитры, индустриального масла и эмульгатора. Плотность чистой

эмульсии 1.41 г/см^3 . В качестве сенсibilизатора использовались полимерные микросферы Exrapcel плотностью 0.024 г/см^3 . Плотность ЭмВВ варьировалась путем изменения содержания микробаллонов. Более подробно технология изготовления взрывчатых композиций описана в [4].

В качестве эталонного ВВ взят аммонит 6ЖВ, утрамбованный до плотности 1.06 г/см^3 .

МЕТАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

В стандартной методике цилиндр-теста, или Т-20 [5], используются медные трубки с наружным и внутренним диаметром 24 и 20 мм соответственно. По известной форме метаемой оболочки и измеренной скорости детонации определяется радиальная скорость оболочки и ось симметрии. После этого радиальная компонента скорости оболочки в этой точке рассчитывается по формуле $V_r = D \operatorname{tg}(\theta)$, где D — скорость детонации заряда ВВ. Обычно радиальная компонента скорости определяется при отношении диаметра оболочки к начальному диаметру (K), равном 1.33 и 2.24, что соответствует расширению продуктов детонации в 2 и 7 раз соответственно. При $K = 2.24$ медная оболочка обычно еще не разрушается. Отмечается, что уже при $K = 2$ кинетическая энергия оболочки получает около 90 % от конечной величины.

ЭмВВ характеризуются гораздо меньшей

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-03-00883).

© Юношев А. С., Пластинин А. В., Рафейчик С. И., Воронин М. С., 2018.

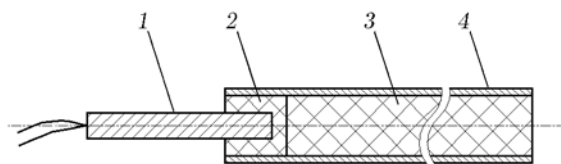


Рис. 1. Схема эксперимента для определения боковой метательной способности:

1 — детонатор, 2 — боевик, 3 — ВВ, 4 — медная трубка

метательной способностью, чем мощные конденсированные ВВ, обычно исследуемые с помощью цилиндр-теста. Угол поворота оболочки при этом гораздо меньше, особенно при использовании низкоплотных ЭМВВ. Для увеличения разрешающей способности метода применялась медная трубка с толщиной стенки 1 мм. Метание медной оболочки проводилось по схеме, показанной на рис. 1. Взрывчатое вещество помещалось в отожженную при температуре 700 °С медную трубку с внешним и внутренним диаметром 23.9 и 21.9 мм соответственно и длиной 229 мм. Иницирование осуществляли детонатором ЭДВ-1 через промежуточный боевик из ЭМВВ плотностью 1.0 г/см³, высотой 20 мм.

В ходе эксперимента проводилось рентгенографирование процесса расширения медной оболочки в три разных момента времени. Источник импульсного рентгеновского излучения — аппарат «Арион-600». Расстояние от аппарата до заряда 1 м, от заряда до кассеты с пленкой — 0.33 м. Коэффициент увеличения на снимке равен 1.33. Коррекция перспективы при обработке снимков не проводилась. По рентгенограммам определялись форма оболочки и скорость детонации. Точность определения скорости детонации составляла примерно 5%. Это вызвано тем, что на рентгенограммах не всегда виден фронт детонационной волны, а оболочка разворачивается достаточно плавно и не совсем симметрично. Тем не менее измеренные значения, с учетом погрешности, соответствуют предельной скорости детонации заряда ЭМВВ, приведенной в [4]. Только при плотности заряда 1.2 г/см³ измеренная скорость оказалась заметно ниже предельной (6.0 мм/мкс), что вызвано малостью диаметра используемых медных трубок. Этот же вывод можно сделать и по отношению к аммониту 6ЖВ, измеренная скорость детонации которого составила 3.35 мм/мкс при предельной для данной плот-

ности скорости около 4.2 мм/мкс [6].

Рентгенограмма разлета оболочки показана на рис. 2. Несимметричность формы оболочки, вероятно, вызвана неоднородной структурой заряда. Поэтому при определении формы оболочки брали среднее положение поверхности левой и правой половин оболочки на снимке. По рентгенограммам видно, что разгон оболочки продолжается и при $K > 2.24$. Однако в большинстве проведенных экспериментов оболочка разрушалась при $K < 2.2$. Поэтому было решено сравнить скорости оболочек при $K = 1.33$ и 2. Это примерно соответствует расширению продуктов детонации в 1.93 и 4.57 раза соответственно.

Результаты экспериментов приведены в табл. 1. Погрешность определения радиальной компоненты скорости оболочки оценена нами в 8%. На рис. 3 показана зависимость радиальной скорости оболочки от начальной плотности заряда ρ_0 . Видно, что в диапазоне $\rho_0 = 0.27 \div 1.2$ г/см³ связь носит почти линейный характер (соответствующее уравнение см. в подписи к рис. 3). При меньшей плотности измеренная скорость значительно меньше рассчитанной по предложенной линейной за-

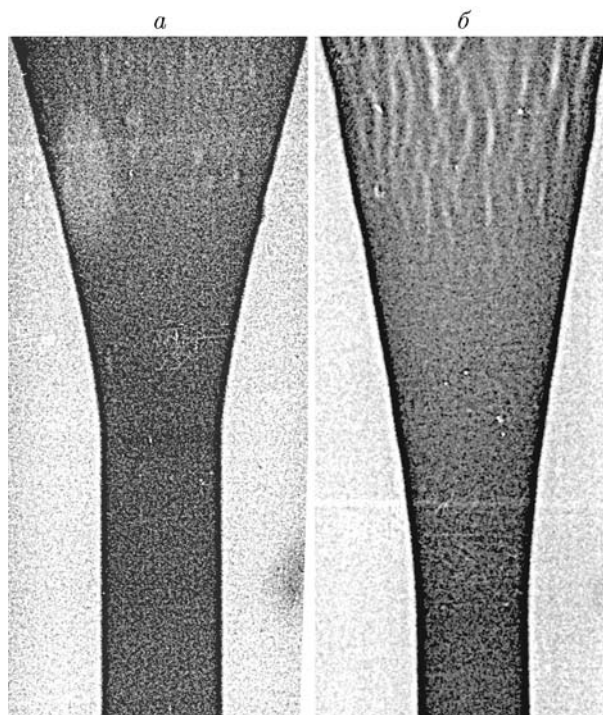


Рис. 2. Рентгенограммы метания медной оболочки зарядом ЭМВВ плотностью 0.99 (а) и 0.193 г/см³ (б)

Таблица 1

Результаты метания цилиндрической оболочки

ВВ	ρ_0 , г/см ³	D, мм/мкс	V _r , мм/мкс (эксперимент)		R*/R ₀	V _r , мм/мкс (расчет)	
			1.33R ₀	2R ₀		1.33R ₀	2R ₀
ЭмВВ	0.193	2.09	0.323	0.340	1.9	—	—
ЭмВВ	0.27	2.41	0.475	0.609	2.2	0.368	0.455
ЭмВВ	0.5	3.06	0.643	0.782	2.2	0.6	0.74
ЭмВВ	0.7	3.97	0.835	1.024	2.77	—	—
ЭмВВ	0.85	4.59	0.983	1.064	2.27	—	—
ЭмВВ	0.99	4.91	1.021	1.135	2.2	0.942	1.12
ЭмВВ	1.2	5.60	1.278	1.454	2.66	1.165	1.376
6ЖВ	1.06	3.35	0.898	1.111	2.28	—	—

Примечания. ρ_0 — начальная плотность ЭмВВ; R* — радиус оболочки, при котором на рентгенограмме наблюдается ее разрушение; R₀ — начальный внешний радиус медной трубки.

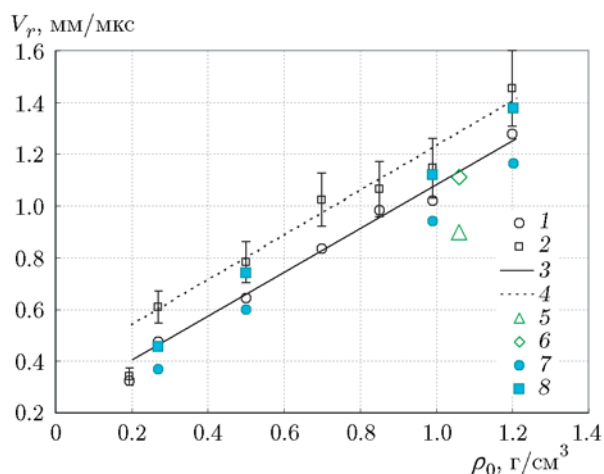


Рис. 3. Скорость метания медной трубки:

1, 2 — экспериментальные значения V_r для ЭмВВ при K = 1.33 и 2 соответственно; 3, 4 — их линейная аппроксимация (V_r = 0.236 + 0.847ρ₀ (при K = 1.33) и V_r = 0.368 + 0.856ρ₀ (при K = 2.0)); 5, 6 — экспериментальные значения для аммонита 6ЖВ при K = 1.33 и 2 соответственно; 7, 8 — расчетные данные V_r при K = 1.33 и 2 для ЭмВВ

висимости. Из рисунка видно, что в условиях данного сравнения метательная способность ЭмВВ выше, чем у аммонита 6ЖВ.

МЕТАНИЕ С ТОРЦА ЗАРЯДА

Первые попытки измерить торцевую метательную способность были выполнены в постановке, подобной методике М-40 [5]. Заряд

диаметром 30 мм и высотой 30 мм помещался в толстостенную стальную трубу. Заряд инициировался с торца генератором плоской детонационной волны, состоящим из эластичного ВВ и слоя ЭмВВ плотностью 1.0 г/см³. Суммарная масса ВВ в инициирующей системе — 8 г. С другой стороны от заряда с интервалом 5 мм располагался дюралевый диск толщиной 5 мм. После инициирования детонации диск разгонялся и вылетал из трубы. Скорость диска измерялась. Оказалось, что на процесс метания диска сильное влияние оказывает инициирующее устройство. Это влияние особенно значительно при низкой плотности исследуемого ЭмВВ. Так, при плотности заряда 0.2 г/см³ скорость диска составила 1.1 мм/мкс. В случае отсутствия заряда (расстояние от боевика до дюралевого диска 35 мм) скорость диска 0.95 мм/мкс. Таким образом, скорость метания диска в описываемой постановке является не только характеристикой процесса детонации ЭмВВ, но и в значительной степени следствием влияния инициирующего устройства.

Было решено изменить постановку эксперимента по метанию заряда с торца в целях уменьшения влияния инициирующего устройства на скорость метаемого предмета. При этом постановка должна быть проста для численного анализа процесса метания.

Выбранная нами схема метания показана на рис. 4. Детонатор ЭДВ-1 инициирует боевик из ЭмВВ плотностью 1 г/см³, высотой 20 мм. Далее располагается заряд изучаемого ВВ дли-

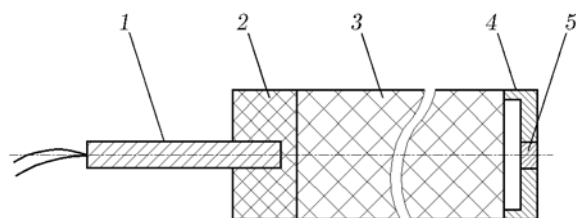


Рис. 4. Схема эксперимента по определению торцевой метательной способности:

1 — детонатор, 2 — боевик, 3 — заряд ВВ, 4 — обтюратор, 5 — цилиндр

ной 180 мм. Боевик и заряд помещены в трубку из бумаги с внутренним диаметром 40 мм и толщиной стенки 0.4 мм. К торцу заряда присоединяется обтюратор из дюралюминия Д16 с центральным отверстием диаметром 8 мм, в которое вставлен цилиндр из Д16 диаметром 8 мм и толщиной 5 мм. Обтюратор выполняет роль центрирующего элемента для цилиндра и имеет толщину 5 мм в центральной части диаметром 35 мм. Из-за равной толщины цилиндра и центральной части обтюлятора они движутся вместе в процессе ускорения, затем из-за краевых эффектов обтюратор начинает отставать, а цилиндр продолжает движение с постоянной скоростью. Кроме того, обтюратор фиксирует цилиндр на расстоянии 5 мм от заряда, что позволяет предотвратить разрушение цилиндра в процессе разгона. Был проведен дополнительный эксперимент с цилиндром диаметром 16 мм, который показал, что при этом диаметре скорость метания остается постоянной.

В данной постановке влияние инициатора на процесс метания сведено к минимуму. Цилиндр не теряет энергию на трение о ствол при ускорении, как в методике М-40, что важно при испытании малоплотных ВВ. Измерение скорости цилиндра выполнялось с помощью импульсной рентгенографии. В процессе метания делали три кадра. Задержка по времени между рентгеновскими импульсами устанавливалась такой, чтобы между кадрами цилиндр успевал пролетать 20 ÷ 40 мм. Скорость детонации заряда при этом не измерялась. Но ее зависимость от плотности легко рассчитать [4]: $D(\rho_0) = 1.53 + 2.71\rho_0 + 0.84\rho_0^2$. Результаты испытаний приведены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что в используемой постановке скорость метания практически линейно зависит от плотности ЭмВВ и может быть опи-

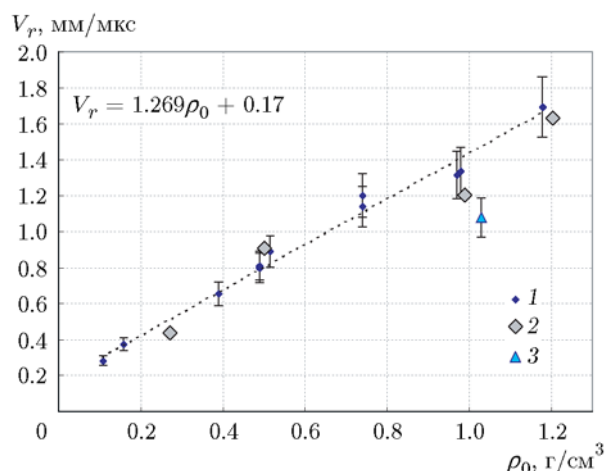


Рис. 5. Скорость цилиндра, метаемого с торца заряда:

1 — ЭмВВ, эксперимент, 2 — ЭмВВ, расчет, 3 — аммонит бЖВ, эксперимент

сана соотношением $V_r = 1.269\rho_0 + 0.17$. Для сравнения на рисунке приведены результаты измерения скорости метания зарядом аммонита бЖВ. Они оказались значительно меньше, чем для ЭмВВ такой же плотности.

РАСЧЕТ МЕТАНИЯ

Известно много работ, в которых подбираются параметры уравнения состояния (УРС) вида JWL для продуктов детонации ЭмВВ, например [7–10]. Для этого обычно используются результаты цилиндр-теста, где по измеренной форме медной оболочки и скорости детонации определяется изоэнтропа продуктов детонации. Для определения всех параметров УРС необходимо дополнительно знать энергию и давление в точке Чепмена — Жуге. В [7–10] эти величины находили из термохимических расчетов. Несмотря на близость составов и начальных плотностей исследуемых ЭмВВ, подобранные параметры УРС JWL отличаются в несколько раз. Однако если по этим параметрам построить изоэнтропы продуктов детонации, они оказываются достаточно близки друг другу. В данной работе был выполнен расчет процесса метания медной оболочки и метания с торца заряда в постановке, аналогичной экспериментальной. При этом для расчета продуктов детонации используемого ЭмВВ были выбраны параметры УРС JWL для ЭмВВ E682-b из работы [8] из-за близости их составов.

Давление P в рамках УРС JWL связано с

Таблица 2

Параметры УРС JWL для продуктов детонации ЭмВВ различной начальной плотности, записанного в форме (2)

ρ_0 , г/см ³	A , ГПа	B , ГПа	R_1	R_2	ω	E_0 , ГПа	D , мм/мкс	p_{CJ} , ГПа
1.203*	620.97	4.581	5.644	1.231	0.438	3.730	6.246	10.26
0.99	620.97	4.581	6.859	1.496	0.438	2.333	4.91	5.24
0.5	620.97	4.581	13.58	2.962	0.438	1.248	3.06	1.556
0.27	620.97	4.581	25.148	5.485	0.438	0.552	2.414	0.535

*Данные при $\rho_0 = 1.203$ г/см³ взяты из [8].

удельным объемом v и внутренней энергией e следующим образом:

$$P(v, e) = A[1 - \omega/vr_1] \exp(-r_1v) + B[1 - \omega/vr_2] \exp(-r_2v) + \omega e/v, \quad (1)$$

где ω — коэффициент Грюнайзена, A , B , r_1 и r_2 — параметры упругой составляющей сжатия. Для этого УРС использовались следующие значения параметров ЭмВВ E682-b: $\rho_0 = 1.203$ г/см³, $A = 620.97$ ГПа, $B = 4.581$ ГПа, $r_1 = 6.79$ г/см³, $r_2 = 1.481$ г/см³, $\omega = 0.438$, $Q = 3.101$ кДж/г [8], $D = 6.246$ мм/мкс, $p_{CJ} = 10.26$ ГПа [8].

Обычно, в том числе в расчетных программах, используется другая запись УРС JWL:

$$P(V, E) = A[1 - \omega/VR_1] \exp(-R_1V) + B[1 - \omega/VR_2] \exp(-R_2V) + \omega E/V, \quad (2)$$

где

$$V = v\rho_0, \quad R_1 = r_1/\rho_0, \quad R_2 = r_2/\rho_0, \quad (3)$$

$$E = e\rho_0, \quad E_0 = Q\rho_0.$$

Поскольку уравнение (1) не содержит внутреннего параметра ρ_0 , оно выглядит более универсальным, чем уравнение (2). Если упругие параметры уравнения (1) подобраны для продуктов детонации ВВ определенной начальной плотности, можно ожидать, что они будут удовлетворительно подходить для продуктов детонации этого же ВВ при другой начальной плотности. Это же относится и к параметру Грюнайзена. Очевидно, что невозможно

для такого простого вида УРС требовать, чтобы оно при постоянном коэффициенте Грюнайзена описывало состояние продуктов детонации зарядов любой начальной плотности. Однако можно определить границы допустимого использования такого подхода.

С помощью соотношений (3) были рассчитаны параметры УРС JWL для ЭмВВ начальной плотности 0.27, 0.5, 0.99 и 1.203 г/см³. Поскольку в научной литературе имеются параметры УРС JWL для записи (2), приведем в табл. 2 значения использованных параметров уравнения для этой записи. Теплота взрыва Q подбиралась для ЭмВВ каждой начальной плотности таким образом, чтобы при заданных A , B , r_1 , r_2 и ω результаты расчета скорости детонации совпадали с экспериментом.

Процесс метания рассчитывался по программе ANSYS AUTODYN R17. Параметры динамического поведения меди и дюралья выбирались из стандартного набора материалов ANSYS AUTODYN (табл. 3).

Рассчитанные скорости медной оболочки приведены в табл. 1 и на рис. 3. Они удовлетворительно (в пределах экспериментальной погрешности) совпадают с экспериментальными значениями при начальной плотности заряда ЭмВВ $\rho_0 = 0.5$ и 0.99 г/см³ (разница значений углов поворота оболочки при $R = 2R_0$ в

Таблица 3

УРС инертных материалов, используемые в расчете

Материал	Название	ρ_0 , г/см ³	УРС	Модель прочности
Медь	COPPER	8.9	Shock	PiecewiseJC
Дюраль	AL 6061-T6	2.703	Shock	Steinberg — Guinan

расчете и эксперименте менее 1°). При $\rho_0 = 0.27 \text{ г/см}^3$ расчетные значения скорости примерно на 30 % меньше экспериментальных (углы поворота оболочек при $R = 2R_0$ составили 13.9 и 10° в эксперименте и расчете соответственно). Для ЭМВВ плотностью $\rho_0 = 1.203 \text{ г/см}^3$ был выполнен расчет метания медной оболочки, несмотря на то что в эксперименте скорость детонации была заметно меньше предельной, для которой определены параметры УРС JWL. В этом случае радиальная скорость оболочки в эксперименте и полученная в расчете совпали с учетом экспериментальной погрешности. Однако угол поворота оболочки в эксперименте при $R = 2R_0$ оказался 14.1° , что примерно на 1.7° больше, чем в расчете.

Результаты расчета скорости дюралевого цилиндра, метаемого с торца заряда ЭМВВ, приведены на рис. 5. В пределах погрешности они совпали с экспериментальными значениями.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характеристики метания как цилиндрической оболочки, так и тела с торца заряда продуктами детонации ЭМВВ почти линейно зависят от начальной плотности ЭМВВ. В диапазоне $\rho_0 = 0.5 \div 1.2 \text{ г/см}^3$ расчет метательной способности удовлетворительно согласуется с экспериментом. Для получения точного согласия эксперимента с расчетом необходимо, кроме уточнения предложенных параметров УРС продуктов детонации, учитывать кинетику разложения ЭМВВ. Известно, что ширина зоны реакции ЭМВВ достигает нескольких миллиметров [10]. Кроме того, она сильно зависит от плотности ЭМВВ. Давление в зоне реакции ЭМВВ выше давления Чепмена — Жуге. Это значит, что в цилиндр-тесте, при определенных соотношениях между диаметром металлической оболочки, ее толщиной и шириной зоны реакции оболочка может приобрести значительную радиальную скорость уже при прохождении вдоль нее зоны реакции детонационной волны. В расчетах, сделанных в рамках данной работы, кинетика разложения не учитывалась, скорость задавалась постоянной и никакой области повышенных давлений, соответствующих химпику, в расчете не получено. Возможно, частично поэтому практически во всем диапазоне начальных плотностей ЭМВВ расчетная скорость метания медной оболочки

оказалась ниже экспериментальной. Кроме того, при скорости детонации, значительно меньшей предельной, фронт детонационной волны искривляется, что также отражается на общей газодинамической картине процесса метания. Правильный учет кривизны фронта в расчете, а также учет зависимости скорости детонации от диаметра заряда невозможны без учета кинетики разложения ВВ.

Интересно, что численный расчет процесса метания с торца заряда удовлетворительно совпал с экспериментом даже при плотности ЭМВВ 0.27 г/см^3 , в то время как при расчете метания медной оболочки уже наблюдается сильное отклонение от эксперимента. Возможно, выбранная в данной работе схема метания с зазором 5 мм между ЭМВВ и метаемым цилиндром оказалась нечувствительной к наличию протяженной зоны реакции за фронтом детонационной волны.

На данный момент известна одна попытка построить кинетику разложения ЭМВВ [11], однако она выглядит крайне неубедительно, поскольку опирается на описание одного экспериментального профиля давления, записанного в преграде из ПММА при нормальном падении на нее стационарной детонационной волны из ЭМВВ.

ВЫВОДЫ

Исследована метательная способность ЭМВВ в диапазоне начальной плотности $0.193 \div 1.2 \text{ г/см}^3$. Показано, что метательная способность ЭМВВ превосходит метательную способность аммонита 6ЖВ (хотя в цилиндр-тесте скорость детонации аммонита была заметно меньше предельной).

С помощью уравнения состояния JWL для продуктов детонации проведен расчет процесса метания. Результаты свидетельствуют об удовлетворительном согласии расчета и эксперимента в диапазоне начальной плотности ЭМВВ $0.5 \div 1.2 \text{ г/см}^3$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колганов Е. В., Соснин В. А. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. Кн. 1: Составы и свойства. — Джерджинск: ГосНИИ «Кристалл», 2009.
2. Юношев А. С., Рафейчик С. И., Пластинин А. В., Сильвестров В. В. Новые

- приложения эмульсионных взрывчатых композиций // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 2. — С. 113–118.
3. **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 // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 2. — С. 114–121.
 4. **Юношев А. С., Пластинин А. В., Рафейчик С. И.** Скорость детонации эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного полимерными микробаллонами // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 6. — С. 132–137.
 5. **Физика взрыва:** в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. — Изд. 3-е, испр. — М.: Физматлит, 2004. — Т. 1.
 6. **Дерибас А. А.** Физика упрочнения и сварки взрывом. — 2-е изд., доп. и перераб. — Новосибирск: Наука, 1980.
 7. **Sanchidrián J. A., Castedo R., López L. M., Segarra P., Santos A. P.** Determination of the JWL constants for ANFO and emulsion explosives from cylinder test data // CEJEM. — 2015. — V. 12, N 2. — P. 177–194.
 8. **Hanson H.** Determination of properties for emulsion explosives using cylinder expansion tests and numerical simulation // Swebrec Report. — 2009.
 9. **Hamashima H., Kato Y., Itoh S.** Determination of JWL parameters for nonideal explosive // Shock Compression of Condensed Matter — 2003. — AIP, 2004. — P. 331–334.
 10. **Юношев А. С., Пластинин А. В., Сильвестров В. В.** Исследование влияния плотности эмульсионного взрывчатого вещества на ширину зоны реакции // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 79–88.
 11. **Ribeiro J. B., Silva C., Mendes R.** Estimation of the reactive flow model parameters for an ammonium nitrate-based emulsion explosive using genetic algorithms // J. Energ. Mater. — 2010. — V. 28. — P. 180–204.

Поступила в редакцию 15/XI 2017 г.
