

УДК 534.222.2:662.2-391.4:544.454.3

СКОРОСТЬ ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА, СЕНСИБИЛИЗИРОВАННОГО ПОЛИМЕРНЫМИ МИКРОБАЛЛОНАМИ

А. С. Юношев^{1,2}, А. В. Пластинин¹, С. И. Рафейчик¹¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, yunoshev@hydro.nsc.ru²Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Приведены результаты исследования скорости детонации эмульсионного взрывчатого вещества (ВВ), сенсibilизированного полимерными микросферами Expancel, в широком диапазоне начальной плотности $0.14 \div 1.33$ г/см³. Показано, что при плотности эмульсионного ВВ менее 0.4 г/см³ возможен режим детонации с неустойчивым фронтом, характерным для жидких ВВ.

Ключевые слова: эмульсионное взрывчатое вещество, полимерные микробаллоны, механизм детонации, скорость детонации.

DOI 10.15372/FGV20170616

ВВЕДЕНИЕ

Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭмВВ), широко используемые в горной промышленности, стали применяться для сварки и обработки металлов взрывом, взрывного компактирования и т. п. [1]. В последнее время появляются работы, посвященные изучению детонационных свойств ЭмВВ, сенсibilизированного легкими полимерными микробаллонами [2]. Использование сенсibilизаторов с очень легкой стенкой интересно по ряду причин. Во-первых, позволяет развивать модельные представления о механизме детонации конденсированных взрывчатых веществ (ВВ). Во-вторых, добавление полимерных микробаллонов в состав ЭмВВ позволяет создавать композиции с более широким диапазоном детонационных характеристик, чем ЭмВВ с другими сенсibilизаторами. Ранее при сравнении различных сенсibilизаторов: стеклянные и полимерные микробаллоны, перлит, ценосферы, газогенерирующая добавка — нами было показано [3], что максимальные значения скорости и давления детонации получены при использовании полимерных микробаллонов.

В настоящей работе подробно изучается скорость детонации ЭмВВ, сенсibilизирован-

ных полимерными микробаллонами, в широком диапазоне начальной плотности.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Энергетическим компонентом в составе исследованных ЭмВВ является эмульсия (эмульсионная матрица). Окислитель в ее составе — водный раствор аммиачной селитры или водный раствор смеси аммиачной и натриевой селитры. Горючее — индустриальное масло и эмульгатор. Массовое соотношение окислитель/горючее — 94:6. Компоненты смешивали высокооборотным блендером. Размер капель окислителя в полученной таким образом мелкодисперсной эмульсии не превышал $1 \div 2$ мкм. Плотность эмульсии на основе смеси аммиачной и натриевой селитры (АС/НС-эмульсия) составляет 1.41 ± 0.01 г/см³, на основе аммиачной селитры (АС-эмульсия) — 1.34 ± 0.01 г/см³.

В качестве сенсibilизатора использовались полимерные микробаллоны Expancel 462 DET 40 d25 со средним размером $d_{mb} = 40$ мкм и толщиной стенки 0.1 мкм. Внутри микробаллонов — газ изобутан. Состав термопластичной полимерной стенки производитель не сообщает. Истинная плотность микробаллонов $\rho_{mb} = 0.025 \pm 0.003$ г/см³.

Приготовление ЭмВВ выполнялось введением в эмульсию микробаллонов в количестве (по массе) $\mu = m_{mb}/m_e$ сверх массы эмульсии, где m_{mb} — масса микробаллонов, m_e — масса

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

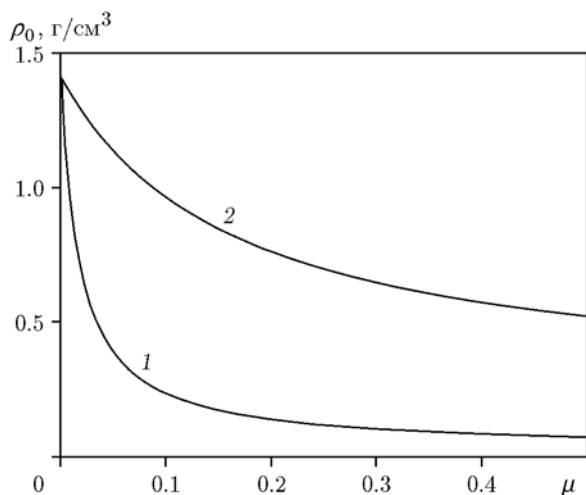


Рис. 1. Зависимость плотности ЭмВВ на основе АС/НС-эмульсии от количества микробаллонов:

1 — полимерные микробаллоны Ехрапсел, 2 — стеклянные МС-В

эмульсии. Зависимость плотности композиции ρ_0 от параметра μ определяется соотношением $\rho_0 = \rho_e(1 + \mu)/(1 + \mu\rho_e/\rho_{mb})$, где ρ_e — плотность эмульсии. На рис. 1 показана рассчитанная по этой формуле зависимость плотности ЭмВВ на основе АС/НС-эмульсии от типа микробаллонов: полимерных Ехрапсел и стеклянных МС-В. Истинная плотность микробаллонов МС-В 0.23 г/см^3 . Видно, что использование полимерных микробаллонов позволяет существенно расширить диапазон начальных плотностей ЭмВВ. При этом для того, чтобы получить ЭмВВ заданной плотности, полимерных микробаллонов требуется значительно меньше. Например, при плотности ЭмВВ 0.14 г/см^3 в его составе находится 12.3 % ($\mu = 0.14$) полимерного сенсibilизатора, в то время как введение в состав даже 33.3 % ($\mu = 0.5$) стеклянных микробаллонов дает плотность ЭмВВ 0.5 г/см^3 .

Экспериментально измеренные плотности ЭмВВ обычно меньше рассчитанных из-за того, что в процессе приготовления эмульсии и замешивания в нее полимерных микробаллонов в ЭмВВ попадает неконтролируемое количество воздуха. Далее приводимые значения ρ_0 соответствуют экспериментально измеренным.

В данной работе изучались взрывные композиции плотностью $\rho_0 = 0.14 \div 1.33 \text{ г/см}^3$, что соответствует доле микробаллонов $\mu = 0.14 \div 0.00115$.

Следует отметить, что с ростом содержания полимерных микробаллонов консистенция ЭмВВ сильно меняется. Если при малой их доле ЭмВВ представляет собой вязкую липкую жидкость, то при плотности менее 0.3 г/см^3 это уже скорее ВВ, состоящее из мягких гранул.

Для измерения скорости детонации ЭмВВ помещалось в полихлорвиниловые трубки разного диаметра, длиной не менее 10 калибров. Толщина стенки трубки составляла $1.5 \div 2 \text{ мм}$. Детонацию инициировали детонатором ЭДВ-1 через промежуточный боевик из ЭмВВ плотностью 1 г/см^3 . Скорость детонации измерялась с помощью контактных или ионизационных датчиков на 3–4 интервалах. Инструментальная точность измерений около 2 %, однако экспериментальный разброс данных составляет примерно 5 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 2 представлены результаты измерения скорости детонации (D) ЭмВВ на основе АС- и АС/НС-эмульсии в полимерных трубках диаметром 21 мм. Как и ожидалось исходя из работы [4], скорость детонации ЭмВВ на основе АС-эмульсии больше, чем в случае АС/НС-эмульсии, примерно на 0.2 мм/мкс почти во всем диапазоне плотностей. Для низкоплотных составов различие в скоростях детонации исчезает. В диапазоне $\rho_0 = 0.7 \div 1.2 \text{ г/см}^3$ наши

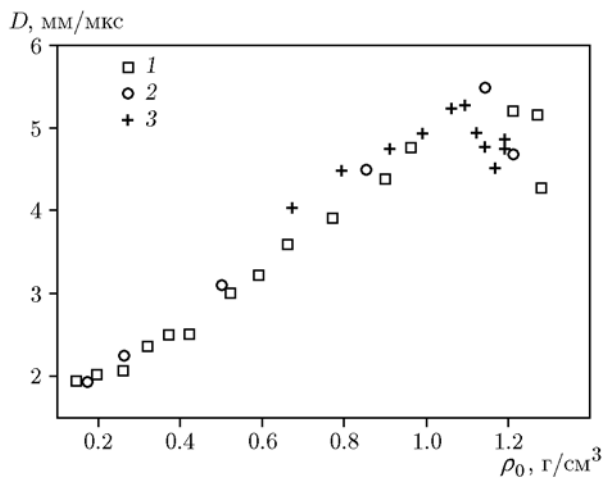


Рис. 2. Скорость детонации ЭмВВ, сенсibilизированного полимерными микробаллонами:

1 — ЭмВВ на основе АС/НС-эмульсии, $\varnothing 21 \text{ мм}$, 2 — на основе АС-эмульсии, $\varnothing 21 \text{ мм}$, 3 — на основе АС-эмульсии [2], $\varnothing 25 \text{ мм}$

данные почти совпадают с измерениями скорости детонации ЭМВВ с полимерными микробаллонами в зарядах диаметром 25 мм, представленными в [2]. В то же время нам удалось значительно расширить диапазон исследованных плотностей ЭМВВ. Показанные на рис. 2 немонотонные зависимости характерны для ВВ второго типа [5], а наличие максимума связано с ростом ширины зоны реакции ЭМВВ при увеличении его плотности [4].

Остальные экспериментальные данные получены для ЭМВВ на основе АС/НС-эмульсии, поскольку этот состав, в силу большей стабильности при хранении, обладает большим потенциалом для практического использования, чем ЭМВВ на основе АС-эмульсии [6]. Полученные экспериментальные зависимости скорости детонации ЭМВВ на основе АС/НС-эмульсии от диаметра зарядов d разной плотности показаны на рис. 3. Видно, что при $\rho_0 > 0.4$ г/см³ вид зависимости аналогичен тому, что зарегистрирован для пресованных ВВ: с уменьшением диаметра заряда скорость детонации плавно уменьшается вплоть до достижения зарядом критического диаметра, когда заряд не детонирует. При плотности ЭМВВ менее указанной скорость детонации остается практически постоянной при всех диаметрах заряда, превышающих крити-

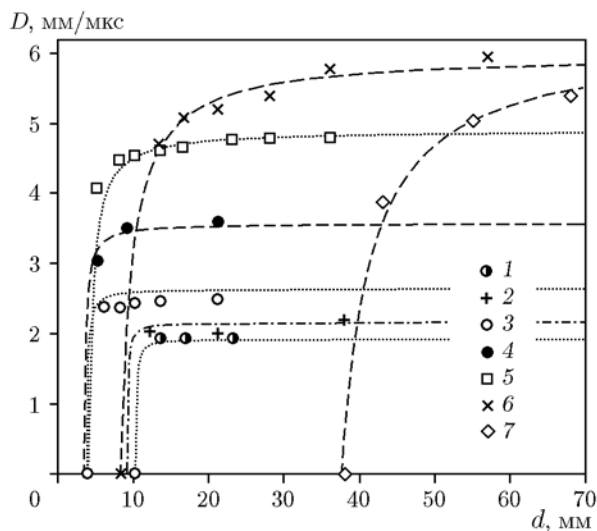


Рис. 3. Зависимость скорости детонации ЭМВВ от диаметра зарядов различной начальной плотности:

ρ_0 , г/см³: 1 — 0.14, 2 — 0.22, 3 — 0.37, 4 — 0.63, 5 — 0.96, 6 — 1.2, 7 — 1.33; линии — расчет по формуле (1) при соответствующих плотностях

ческий, что характерно для детонации жидких ВВ [7]. Так, при $\rho_0 = 0.14$ г/см³ скорость детонации составляет 1.94 км/с в диапазоне $d = 12 \div 23$ мм. Детонационное давление такого высокопористого ЭМВВ, оцениваемое по формуле $p = \rho_0 D^2/4$, составляет 0.13 ГПа (это значение, вероятно, занижено, из-за уменьшения показателя политропы продуктов детонации при уменьшении начальной плотности ЭМВВ). Среди конденсированных ВВ эта композиция, вероятно, имеет рекордно низкое давление детонации. Составы ЭМВВ с еще большим содержанием полимерного сенсibilизатора не исследовались.

ОПИСАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ЭМВВ

В работах [4, 8, 9] влияние плотности ЭМВВ и диаметра заряда на скорость детонации учитывалось с помощью известного уравнения Эйринга [10] или его модификации, предложенной в [11]:

$$D(\rho_0, d) = D_{id}(\rho_0) \frac{1 - A(\rho_0)}{d - d_c(\rho_0)}, \quad (1)$$

где D_{id} — идеальная скорость детонации, соответствующая детонации заряда бесконечно большого диаметра, зависящая только от плотности ЭМВВ. Функции A и d_c также зависят только от плотности. Вид функций D_{id} , A и d_c подбирается так, чтобы наилучшим образом описать экспериментальные данные. Интересно, что в работах [2, 4, 8] удовлетворительного описания удалось добиться, положив $d_c = 0$. В работе [9] авторам не удалось описать свои экспериментальные данные без использования функции d_c .

В данной работе для каждого значения плотности ЭМВВ подбирались константы D_{id} , A и d_c , позволяющие наилучшим образом описать зависимость скорости детонации от диаметра заряда заданной плотности. Поскольку измерялись скорости детонации семи составов разной плотности, были построены зависимости параметров D_{id} , A и d_c от ρ_0 . Зависимость $D_{id}(\rho_0)$ показана на рис. 4. В данной работе использовалась зависимость следующего аналитического вида:

$$D_{id} = 1.53 + 2.71\rho_0 + 0.84\rho_0^2 \quad \text{при } \rho_0 < 1.24 \text{ г/см}^3, \quad (2)$$

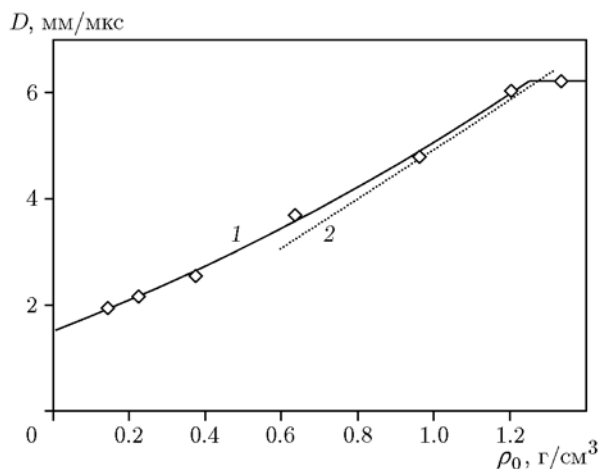


Рис. 4. Зависимость идеальной скорости детонации на основе АС/НС-эмульсии от начальной плотности заряда:

точки — значения, подобранные в данной работе, 1 — расчет по формуле (2), 2 — зависимость из [4] (с микробаллонами МС-В)

$$D_{id} = 6.2 \text{ при } \rho_0 \geq 1.24 \text{ г/см}^3.$$

Для сравнения на рис. 4 приведена зависимость $D_{id}(\rho_0)$, предложенная в работе [4] для ЭМВВ на основе этой же эмульсии, но со стеклянными микробаллонами МС-В в качестве сенсibilизатора.

Представленная на рис. 5,а зависимость $A(\rho_0)$, монотонно растущая с увеличением ρ_0 , имеет физический смысл, согласно [10], ширины зоны реакции и хорошо описывается соотношением

$$A(\rho_0) = 0.18(1.56 - \rho_0)^{-2.11}, \quad (3)$$

похожим на те, что использовались в работах [4, 8, 9] для описания зависимости $A(\rho_0)$ для других составов ЭМВВ.

В [9] параметр d_c монотонно убывает с ростом плотности. В нашем случае зависимость $d_c(\rho_0)$ имеет немонотонный вид (рис. 5,б). Оказалось, что поведение d_c хорошо совпадает с поведением критического диаметра, что неудивительно, исходя из вида функциональной зависимости (1). Аналитическое описание данной зависимости выполнено следующим образом. Предполагается, что при низких плотностях ЭМВВ $d_c = 10.3$. При высоких плотностях для описания параметра d_c использовалось соотношение $d_c(\rho_0) = 0.025(1.56 - \rho_0)^{-4.8} + 3.11$. Для

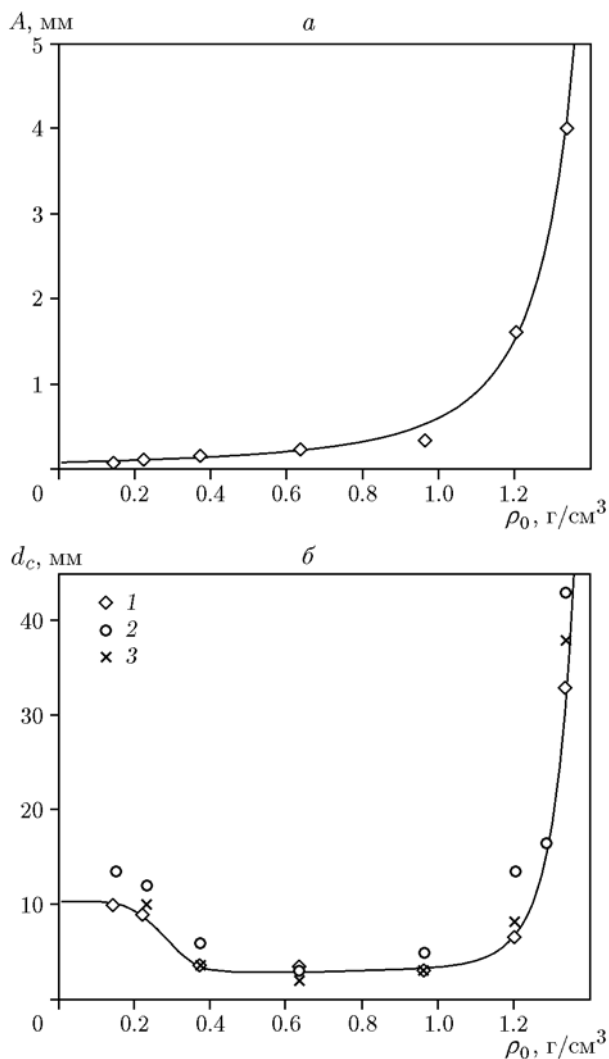


Рис. 5. Зависимости параметров A (а) и d_c (б) от плотности:

линии — зависимости (3) и (4); значки: 1 — значения подобранных констант d_c , 2 — происходит детонация, 3 — отказ детонации

того чтобы перейти от одного вида зависимости к другому при изменении плотности, применялась функция $g(\rho_0) = \exp(-400\rho_0^5)$. Она практически равна единице при малых значениях ρ_0 и приближается к нулю при $\rho_0 > 0.5$. Плавный переход от крайних значений происходит в интервале $\rho_0 = 0.1 \div 0.4 \text{ г/см}^3$. Таким образом, для описания зависимости использовалось соотношение

$$d_c(\rho_0) = 10.3g(\rho_0) + [0.025(1.56 - \rho_0)^{-4.8} + 3.11](1 - g(\rho_0)). \quad (4)$$

Полученные на основе проведенного анализа зависимости скорости детонации ЭМВВ с полимерными микробаллонами от диаметра заряда изображены на рис. 3. Видно, что они хорошо соответствуют экспериментальным данным во всем исследованном диапазоне плотностей ЭМВВ и при всех диаметрах заряда.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первое, что обращает на себя внимание при анализе экспериментальных данных, — изменение характера зависимости $D(d)$ в окрестности плотности 0.4 г/см^3 , которая обсуждалась выше (см. рис. 3). На особенность в поведении ЭМВВ при этой плотности дополнительно указывает резкое изменение параметра $d_c(\rho_0)$ или критического диаметра ЭМВВ. Перечисленные факты позволяют предположить, что при плотности заряда ЭМВВ, сенсibilизированного полимерными микробаллонами, около 0.4 г/см^3 меняется механизм детонации рассматриваемой композиции.

Очевидно, что в диапазоне $\rho_0 = 0.6 \div 1.2 \text{ г/см}^3$ детонация ЭМВВ идет по механизму горячих точек, в качестве которых выступают области эмульсии, изначально прилегающие к микробаллонам и разогретые за фронтом ударной волны, ведущей детонацию. При $\rho_0 < 0.4 \text{ г/см}^3$ количество микробаллонов настолько велико, что эмульсия занимает лишь небольшой объем в пространстве между ними. За фронтом ударной волны, ведущей детонацию, происходит очень быстрый разогрев высокопористой среды. Причем можно предположить, что за счет интенсивного турбулентного перемешивания температура эмульсии выравнивается за время, меньшее периода индукции разложения ЭМВВ. Таким образом, может реализоваться ситуация, когда за фронтом детонационной волны находится среда, разогретая ударной волной, с почти однородным распределением температуры. При большом периоде индукции фронт такой детонационной волны может стать неустойчивым, подобно тому, как это происходит в жидких ВВ.

Известно, что на регистрируемых профилях массовой скорости жидких ВВ с неустойчивым фронтом за детонационным скачком идет колебательный процесс [12]. Подобное же наблюдалось и на профиле массовой скорости

низкоплотного ЭМВВ со стеклянными микросферами МС-В [13]. Это служит дополнительным подтверждением неустойчивости детонационного фронта в высокопористых ЭМВВ. Хотя такие эксперименты для ЭМВВ с полимерными микробаллонами не проводились, вероятно, их поведение будет похожим.

Вторая особенность, которая обращает на себя внимание, — это форма зависимости $D_{id}(\rho_0)$ с плоским участком при $\rho_0 > 1.24 \text{ г/см}^3$. Для описания экспериментальных точек, показанных на рис. 4, использование формул (2) выглядит неоправданным. Однако попытки использовать линейный и степенной, без изломов вид зависимости $D_{id}(\rho_0)$ не позволили удовлетворительно описать поведение скорости детонации во всем диапазоне плотности. Особенно сильно расчетная зависимость отклонялась от экспериментальных точек при $\rho_0 = 1.33 \text{ г/см}^3$. Выход из этой ситуации найден при использовании зависимости (2). Повидимому, такой подход не имеет физического смысла и зависимость скорости детонации от плотности в заряде бесконечного диаметра не будет иметь излома. Однако в рамках предположения о справедливости формулы (1) зависимость (2) позволяет описать существующие экспериментальные данные. Наличие же излома в (2), возможно, свидетельствует о неприменимости модели (1) в рассматриваемых диапазонах плотности ($\rho_0 > 1.24 \text{ г/см}^3$) и диаметров заряда.

Не исключено, что описать экспериментальные данные можно и с использованием гладкой зависимости $D_{id}(\rho_0)$, оставаясь в рамках модели (1). Однако это требует более сложных зависимостей для A и d_c , причем как от начальной плотности, так и от диаметра заряда.

Отдельно отметим, что при плотности ЭМВВ больше какого-то неопределенного пока значения механизм детонации ЭМВВ может стать таким же, как у однородных жидких ВВ. При больших плотностях, близких к плотности эмульсии, горячих точек мало и разогрев эмульсии за фронтом детонационной волны близок к однородному, что при большом периоде индукции приведет к неустойчивому фронту детонационной волны. Однако изучение детонационных характеристик зарядов ЭМВВ плотностью $\rho_0 > 1.2 \text{ г/см}^3$ в лабораторных условиях затруднено из-за их большого критического диаметра ($>40 \text{ мм}$).

ВЫВОДЫ

Измерены скорости детонации эмульсионного ВВ, сенсibilизированного полимерными микросферами Expancel, в диапазоне начальной плотности $0.14 \div 1.33 \text{ г/см}^3$ при различных диаметрах зарядов. В рамках модифицированной формулы Эйринга проведено описание значений скорости детонации в зависимости от плотности и диаметра заряда ЭМВВ. Выявленные особенности детонационного поведения ЭМВВ указывают, что при плотности ЭМВВ менее 0.4 г/см^3 возможен режим детонации с неустойчивым фронтом, характерный для жидких ВВ, что представляет интерес с точки зрения физики детонационных волн. В то же время описанные составы ЭМВВ обладают широким диапазоном детонационных характеристик и могут успешно применяться в различных приложениях по обработке материалов взрывом.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Mendes R., Ribeiro J., Plaksin I., Campos J., Tavares B. Differences between the detonation behavior of emulsion explosives sensitized with glass or with polymeric microballoons // J. Phys.: Conf. Ser. — 2014. — V. 500, N 5. — P. 520–530.
3. Юношев А. С., Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Рафейчик С. И. Влияние искусственных пор на параметры детонации эмульсионного взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 2. — С. 91–97.
4. Сильвестров В. В. О зависимости скорости детонации от плотности для ряда взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 4. — С. 116–124.
5. Price D. Contrasting patterns in the behavior of high explosives // Proc. 11 Symp. Intern. on Combustion. — 1966. — P. 693–702.
6. Колганов Е. В., Соснин В. А. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. Кн. 1: Составы и свойства. — Дзержинск: ГосНИИ «Кристалл», 2009.
7. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.
8. Yoshida M., Iida M., Tanaka K., Fujiwara S., Kusakabe M., Shiino K. Detonation behavior of emulsion explosives containing glass microballoons // Proc. 8th Intern. on Detonation Symp. — 1985. — P. 171–177.
9. Lee J., Person P. A. Detonation behavior of emulsion explosives // Propell., Explos., Pyrotech. — 1990. — V. 15. — P. 208–216.
10. Eyring H., Powell R. E., Duffey G. H., Parlin R. B. The stability of detonation // Chem. Rev. — 1949. — V. 45. — P. 69–181.
11. Campbell A. W., Engelke R. The diameter effect in high-density heterogeneous explosives // Proc. Six Symp. (Intern.) on Detonation. — 1976. — P. 642–651.
12. Уткин А. В., Мочалова В. М., Торунов С. И., Колдунов С. А. Неустойчивость детонационных волн в нитрометане и ФИФО // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 4. — С. 87–93.
13. 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.

*Поступила в редакцию 20/XII 2016 г.,
в окончательном варианте — 4/VII 2017 г.*