
**ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ
И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ**

УДК 534.222.2

Светлой памяти А.А. Борисова посвящается

**ЗАВИСИМОСТЬ ДЕТОНАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ
ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА
НА ОСНОВЕ НИТРАТА АММОНИЯ ОТ ПОРИСТОСТИ**

© 2019 г. В. В. Лавров^{1, 2*}, А. Н. Зубарева¹, П. В. Комиссаров³

¹*Институт проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка, Россия*

²*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия*

³*Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия*

*E-mail: lavr@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 02.03.2019;

после доработки 12.04.2019;

принята в печать 22.04.2019

Исследована детонационная способность эмульсионного взрывчатого вещества (ЭВВ) на основе нитрата аммония, сенсibilизированного стеклянными микросферами. Подтверждено, что зависимость критического диаметра детонации от пористости (плотности) может приобретать U-образный вид при малом содержании инертной добавки. Анализ полученных и имеющихся в литературе данных показал, что зависимости критического диаметра как от пористости, так и от расстояния между центрами микросфер с хорошей точностью могут быть описаны простыми алгебраическими уравнениями с одним численным коэффициентом, индивидуальным для каждого ЭВВ.

Ключевые слова: детонационная способность, критический диаметр детонации, эмульсионное взрывчатое вещество, полые микросферы, эмпирическое уравнение.

DOI: 10.1134/S0207401X19080089

ВВЕДЕНИЕ

Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ) широко используются в горнодобывающей промышленности. Это композитные ВВ с эмульсионной физической структурой, за счет которой удается достичь наилучшей степени перемешивания такого окислителя, как нитрат аммония (НА), с жидким горючим механическим способом. Эмульсионные ВВ на основе нитрата аммония, как и другие простейшие взрывчатые смеси на его основе, относятся к ВВ группы II. Разделение на группы было введено в работе [1] на основании экспериментальных данных, показавших, что у одних ВВ критический диаметр детонации растет с увеличением плотности ЭВВ, а у других — уменьшается. Позднее были получены экспериментальные данные, показавшие, что данное утверждение справедливо только в определенной, “рабочей” области плотностей. Тем не менее такое разделение на группы остается применимым до сих пор, так как для ВВ этих групп имеются и другие отличительные признаки [2].

Что касается данных о детонационной способности ЭВВ, то наиболее интересными являются экспериментальные результаты, полученные авторами работ [3, 4]. В этих работах, разделенных между собой значительным промежутком времени, было показано, что для ЭВВ зависимость критического диаметра детонации от плотности имеет U-образный вид. Детонационная способность ЭВВ, содержащего в составе окислителя смесь нитратов аммония и натрия, при снижении его плотности улучшалась только до определенного предела, после достижения которого дальнейшее снижение плотности приводило к ухудшению детонационной способности, что характерно для ВВ из группы I.

В настоящей работе проведено исследование детонационной способности эмульсионного ВВ на основе нитрата аммония, сенсibilизированного полыми стеклянными микросферами. С этой целью определена зависимость критического диаметра детонации от плотности ЭВВ в диапазоне изменения последней от 0.955 до 1.245 г/см³. Проведен анализ экспериментальных зависимостей критического

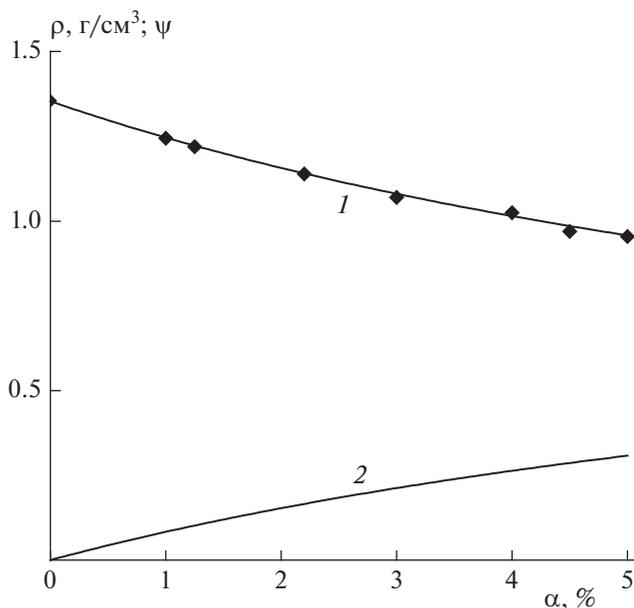


Рис. 1. Зависимость плотности ρ (1) и пористости ψ (2) исследуемого ЭВВ от массовой доли микросфер.

диаметра детонации от плотности и размера микросфер, полученных другими авторами.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объект исследования

Эмульсионные взрывчатые вещества представляют собой смесь эмульсионной матрицы (эмульсии) и порообразующей добавки. Следует отметить, что согласно современной классификации эмульсионная матрица к взрывчатым веществам не относится, несмотря на то, что представляет собой тонкодисперсную смесь окислителя и горючего.

Исследования проводились с эмульсионной матрицей следующего состава: нитрат аммония, вода, смесь минерального масла с эмульгатором в соотношении 76.9 : 15.3 : 7.8 по массе. Плотность эмульсионной матрицы составляла $\rho_{em} = 1.354$ г/см³. При изготовлении эмульсионной матрицы использовалось то же лабораторное оборудование, что и в работах [5, 6]. В отличие от работ [3, 4] в составе матрицы не было натриевой селитры. Мы не стремились к получению тонкодисперсной эмульсии — до 1/3 числа капель имели размер около 10 мкм, остальные были меньшего размера. Распределение капель по размерам периодически контролировалось с помощью оптического микроскопа.

Плотность ЭВВ регулировалась путем введения в матрицу полых стеклянных микросфер

марки С15 производства компании 3М со средним диаметром $d_{mb} = 70$ мкм и средней плотностью $\rho_{mb} = 0.14$ г/см³. График зависимости плотности (ρ) и пористости (ψ) исследуемого ЭВВ от массовой доли микросфер (α), которая бралась относительно массы эмульсионной матрицы, приведен на рис. 1. Точки на графике соответствуют экспериментальным значениям плотности. Разброс экспериментальных значений составил ± 0.005 г/см³, на графике он соответствует размеру точек. Как можно видеть, значения плотности смеси эмульсионной матрицы с микросферами с достаточной точностью могут быть рассчитаны по формуле, которая выводится из соотношения масс и объемов компонентов:

$$1/\rho = \alpha/(1 + \alpha)/\rho_{mb} + 1/(1 + \alpha)/\rho_{em}. \quad (1)$$

Пористость ЭВВ, которая определялась как отношение объема воздушных пор к объему ЭВВ, рассчитывалась таким же образом:

$$\psi = 1 - \rho(1/\rho_{em} + \alpha/\rho_{gl})/(1 + \alpha). \quad (2)$$

Плотность стекла, согласно данным производителя микросфер, была равна $\rho_{gl} = 2.54$ г/см³.

Методика определения критического диаметра детонации

Общепринятым критерием детонационной способности веществ является критический диа-

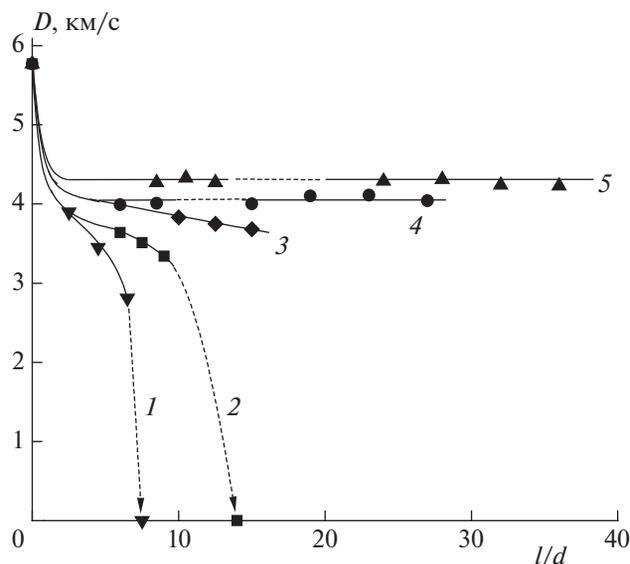


Рис. 2. Скорость распространения взрывного процесса в зарядах различного диаметра при постоянной плотности ЭВВ $\rho = (1.07 \pm 0.005) \text{ г/см}^3$. Диаметр заряда: 1 – 7 мм, 2 – 8.3 мм, 3 – 9.8 мм, 4 – 12.1 мм, 5 – 13.7 мм; $\alpha = 3\%$. Штриховыми линиями показан предположительный ход зависимостей; l – длина заряда, d – его диаметр.

метр детонации, d_{cr} . Последний определялся как минимальный диаметр заряда, при котором взрывной процесс распространялся по заряду ВВ с постоянной скоростью, для чего использовались результаты измерения скорости фронта в зарядах различного диаметра с длиной, составляющей от 15 до 50 их диаметров. В результате проведения серии экспериментов находили значения минимального диаметра (d_s), при котором скорость распространения взрывного процесса оставалось постоянной, и максимального диаметра, при котором взрывной процесс затухал на расстоянии более десяти диаметров заряда (d_{us}) хотя бы в одном из опытов. Среднее из этих двух значений диаметров принималось за величину d_{cr} . Каждое значение скорости фронта определялось как средняя величина по данным измерения расстояния между двумя соседними датчиками и времени прохождения детонационной волны этого расстояния. В одном эксперименте использовалось от четырех до шести датчиков электроконтактного типа, работающих на замыкание электрической цепи. Поступающие от датчиков сигналы регистрировались с помощью цифрового осциллографа с точностью не хуже 0.01 мкс. Разброс значений скорости относительно среднего значения в одном опыте не превышал 1%; этот же разброс от опыта к опыту, как правило, не превышал 2%.

Заряды имели тонкостенную пластиковую оболочку. Все эксперименты, в отличие от проведенных в работах [3, 4], проводились с зарядами,

имевшими цилиндрическую геометрию. Иницирование осуществлялось промежуточными детонаторами (боевиками) из состава А-IX-1 или смеси ТГ50/50, диаметр и длина которых были не менее величины диаметра основного заряда.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Результаты эксперимента

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты измерений скорости распространения взрывного процесса на различном удалении от плоскости иницирования. Группы точек, соединенные сплошными линиями, соответствуют результатам измерений в отдельных опытах. Можно видеть, что в ЭВВ могут распространяться взрывные процессы с различной способностью к самораспространению: и стационарные (детонационные), и затухающие – как медленно, так и быстро. Подобное поведение наблюдалось нами ранее и для ЭВВ других плотностей, а также для эмульсии при введении в нее 1.25% микросфер и использовании пластиковых оболочек с различными свойствами [5]. Необходимо отметить, что при одинаковой технологии изготовления эмульсии мы не заметили различий в детонационных свойствах ЭВВ исследуемого состава и состава, исследовавшегося в работах [5, 6].

Суммарные результаты экспериментов приведены в табл. 1, где в дополнение к величинам диа-

Таблица 1. Результаты эксперимента по определению критического диаметра и критической скорости детонации

α , %	ρ , г/см ³	ψ	d_s , мм	D_s , км/с	d_{us} , мм	D_{us} , км/с	d_{cr} , мм	D_{cr} , км/с
5	0.955	0.31	23.5	3.43	20.2	3.19	21.8	3.31
4.5	0.97	0.298	20.2	3.5	17.9	3.22	19	3.36
4	1.025	0.257	13.7	3.8	12.1	3.34	12.9	3.57
3	1.07	0.221	12.1	4.06	9.8	3.68	10.9	3.87
2.2	1.14	0.166	17.9	4.46	13.7	3.9	15.8	4.18
1.25*	1.22	0.104	35.3	4.72	30.1	4.4	32.7	4.56
1	1.245	0.085	47.4	4.87	40.5	4.49	44	4.68

* Результаты из работы [5] для зарядов в бумажной оболочке.

метров заряда d_s , d_{us} и $d_{cr} = (d_s + d_{us})/2$ приведены соответствующие им значения скоростей D_s , D_{us} и критической скорости детонации, определяемой как $D_{cr} = (D_s + D_{us})/2$. Подобный подход к определению критических значений параметров обусловлен стремлением приблизить условия проведенных экспериментов к условиям опытов из других работ, в подавляющем большинстве которых вместо d_s определяется критический диаметр детонации (d_p) по критерию “взрыв–отказ”, имеющий меньшие значения не только по отношению к d_s , но и, как правило, по отношению к d_{us} . Однако такой подход к определению критического диаметра детонации не может быть рекомендован для практики использования ВВ, так как не исключает “отказов” при использовании зарядов большой длины и возникновения других нежелательных последствий. Необходимо также отметить, что получаемые в результате перебора диаметров заряда значения d_{cr} и, соответственно, D_{cr} будут зависеть от величины используемого при этом шага, независимо от выбора того или иного критерия.

Полученные с использованием цилиндрических зарядов данные наглядно показывают, что для ЭВВ на основе нитрата аммония зависимость критического диаметра детонации от его плотности (пористости) имеет немонотонный, U-образный вид, в то время как зависимость критической скорости детонации от плотности ρ оказалась монотонно спадающей. Провал в значениях скорости, о котором сообщалось в работе [4], зафиксирован не был.

Зависимость критического диаметра детонации от пористости ЭВВ

В настоящей работе, как и в работах [3, 4], для ЭВВ получена зависимость критического диаметра детонации от плотности U-образного вида и это третий случай получения зависимости подобного вида. На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости критического диаметра детонации от пористости ρ , полученные в настоящей работе и в работах [3, 4, 7–9]. Видно, что введение в эмульсионную матрицу микросфер во всех случаях приводит к резкому улучшению детонационной способности, но только до определенных значений плотности. В работах, где зафиксированы зависимости U-образного вида, характерные значения плотности ρ , при которых критический диаметр (толщина) заряда начинал приближаться к минимальным значениям, оказались близкими к единице. Быстрота, с которой ухудшалась детонационная способность разных ЭВВ после достижения наименьших значений критического диаметра, оказалась различной, что может быть обусловлено различиями как в свойствах исследованных ЭВВ, так и в методиках, используемых при определении критических условий для распространения нормальной детонации. Недостаток экспериментальных данных не позволяет сделать более определенных выводов.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что U-образная зависимость критического диаметра детонации от пористости ψ с хорошей точностью может быть описана простыми алгебраическими выражениями для ее ниспадающей и восходящей ветвей по отдельности.

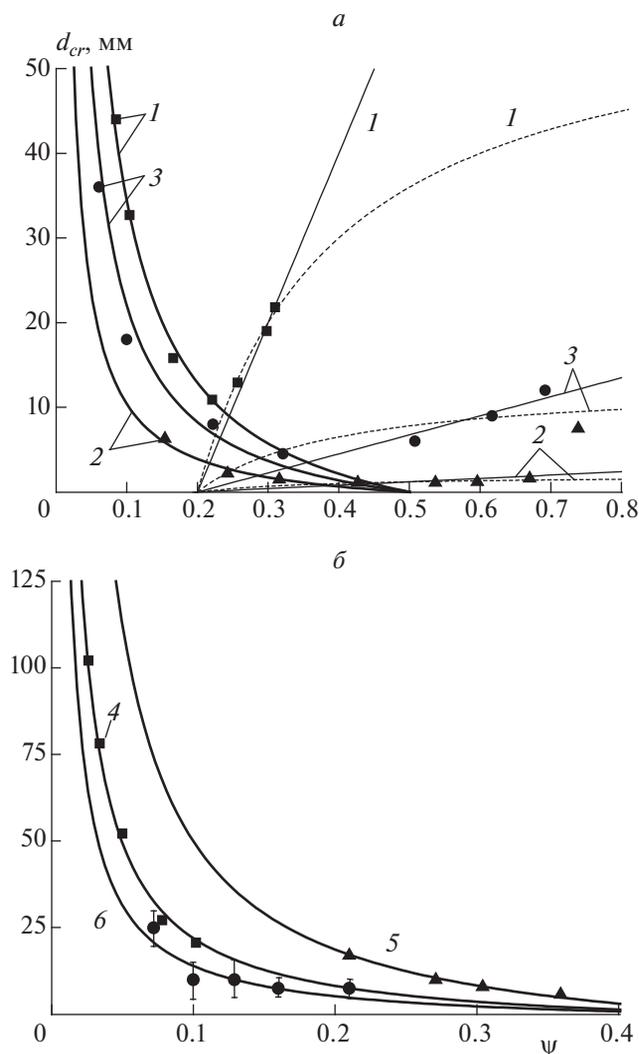


Рис. 3. Зависимость критического диаметра детонации от пористости для ЭВВ: *a* – данные исследований, проведенных в настоящей работе (1) и в работах [3] (2), [4] (3); *б* – данные из работ [7] (4), [8] (5) и [9] (6) при использовании полимерных микросфер с диаметром 53 мкм. Толстые линии соответствуют $d_{cr} = k_1(0.5/\psi - 1)$, тонкие – $d_{cr} = k_2(5/\psi - 1)$, штриховые – $d_{cr} = k_3(0.5/\psi - 1)/5\psi$.

Снижение критического диаметра при увеличении пористости описывается формулой

$$d_{cr} = k_1(0.5/\psi - 1), \tag{3}$$

а его рост – формулами

$$d_{cr} = k_2(5\psi - 1) \tag{4}$$

или

$$d_{cr} = k_3(5\psi - 1)/5\psi, \tag{5}$$

где k_i – индивидуальный для каждого ВВ коэффициент с размерностью длины. Особого внимания заслуживает тот факт, что, несмотря на имеющиеся существенные различия в свойствах ВВ и используемых методиках, все представленные экспери-

ментальные данные с хорошей точностью описываются простыми эмпирическими уравнениями с одним численным коэффициентом в уравнении (3) для спадающей ветви U-образной зависимости $d_{cr}(\psi)$, либо в уравнениях (4) или (5) для ее восходящей ветви. При этом очевидно, что возможны и другие, более сложные варианты математического описания полученных экспериментальных данных.

ОБСУЖДЕНИЕ

Причины возникновения немонотонной зависимости детонационной способности от плотности ЭВВ для ВВ группы II следует искать в особенностях механизма взрывчатого превращения

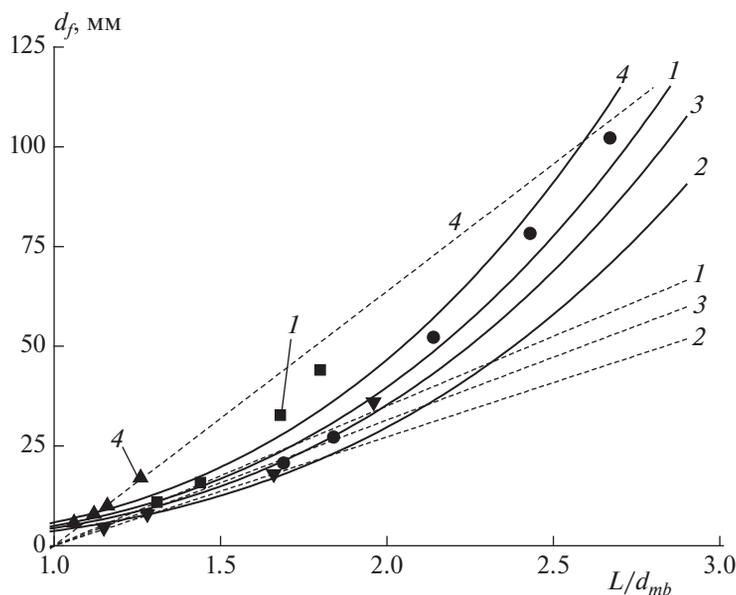


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные зависимости критического диаметра детонации от относительного расстояния между центрами микросфер по данным настоящей работы (1), работ [4] (2), [7] (3) и [8] (4). Штриховые линии относятся к $d_{cr} = kd_{mb}(L/d_{mb} - 1)$ [9], а сплошные – к $d_{cr} = kd_{mb}(L/d_{mb})^3$ [19].

подобных систем. Для эмульсионного ВВ этот механизм является очаговым во всем диапазоне плотностей, где наблюдалась нормальная детонация. На детонационную способность ЭВВ влияют не только свойства эмульсионной матрицы, но и свойства порообразующей добавки, количеством которой задается и плотность ВВ, и количество очагов химической реакции или горячих точек. Имеющиеся экспериментальные данные показывают, что на детонационную способность ЭВВ влияют также диаметр микросфер [9–13], толщина их стенок или плотность [14]. Вопрос о влиянии на детонационные свойства ЭВВ материала микросфер и заполняющего поры газа остается дискуссионным [15–18].

В подавляющем большинстве исследований рассуждения о причинах существования наблюдаемых зависимостей критического диаметра детонации от различных факторов строятся на предположении о справедливости соотношения Харитона, несмотря на его обоснованную критику. Ухудшение детонационной способности в соответствии с этим соотношением принято связывать с замедлением скорости энерговыделения в зоне реакции детонационной волны, принимая во внимание прямо пропорциональную связь скорости энерговыделения с детонационной способностью. В отношении ЭВВ такие рассуждения можно найти в работах различных авторов. В работе [11] снижение детонационной способности ЭВВ, обусловленное уменьшением концентрации

микросфер или увеличением их размера, традиционно объясняется увеличением зоны химической реакции и, как следствие, усиленным влиянием на процесс распространения детонационной волны боковых волн разрежения. В работе [9] авторы пришли к заключению о том, что решающим фактором в достижении критических условий для распространения детонации является скорость реакции эмульсии, и что химическая реакция ЭВВ контролируется механизмом “by hot spot and grain burn process”. Этот вывод был сделан, исходя из возможности описания полученных зависимостей критического диаметра от расстояния между микросферами, L , линейной функцией. В работе [19] при использовании соотношения Харитона было выведено уравнение, связывающее критический диаметр детонации с удельной поверхностью частиц или с отношением L^3/d_{mb}^2 , которое с хорошей точностью описывало экспериментальные зависимости критического диаметра от расстояния между центрами микросфер, полученные для ЭВВ в работах [3, 11]. Предполагалось, что все микросферы имеют шаровидную форму с одинаковым средним диаметром, их распределение является равномерным, а укладка – кубической с плотностью упаковки, равной $\pi/6$. Необходимо отметить, что при таких предположениях расстояние между центрами микросфер не может быть меньше диаметра микросферы.

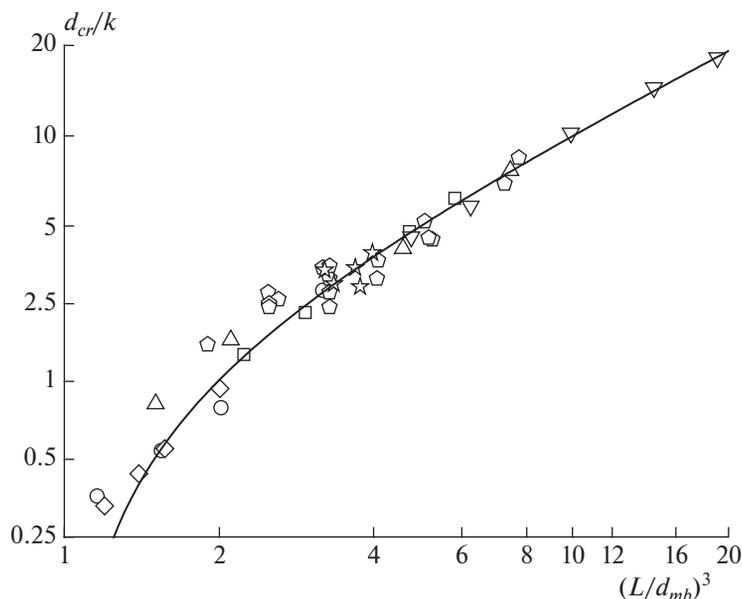


Рис. 5. Экспериментальные данные по зависимости критического диаметра от относительного расстояния между центрами микросфер из разных работ: \square — эксперимент из данной работы, \circ — [3], \triangle — [4], ∇ — [7], \diamond — [8], \square — [9], \star — [11]. Линия на рисунке соответствует линейной зависимости $d_{cr}/k = (L/d_{mb})^3 - 1$.

Для проверки обоснованности выдвинутых гипотез нами проведено сравнение результатов расчета d_{cr} по эмпирическим уравнениям, предложенным в работах [9, 19], с результатами эксперимента, которое в этих работах не проводилось. На рис. 4 эти данные представлены в виде зависимости критического диаметра детонации от относительного расстояния между центрами микросфер. Это расстояние, как и в работе [20], рассчитывалось по формуле

$$L = d_{mb}[(\pi/6)/(1 - f(\alpha)\rho/\rho_{em})]^{1/3}, \quad (6)$$

где $f(\alpha) = 1 - \alpha$ в случае, если массовая доля микросфер берется относительно массы ЭВВ, и $f(\alpha) = 1/(1 + \alpha)$, если массовая доля микросфер берется относительно массы эмульсионной матрицы. Как видно из рис. 4, хорошая корреляция между экспериментальными и расчетными данными наблюдается только при относительно небольших расстояниях между микросферами. С увеличением этого расстояния имеется устойчивая тенденция к расхождению результатов расчета и эксперимента. Этот факт может быть интерпретирован как постепенный переход от одного механизма образования горячих точек в ЭВВ к другому, например от вязкопластического механизма к гидродинамическому. К такому выводу, в частности, пришли авторы работы [21] на основании температурных измерений. Однако, как показывает практика, на основе анализа ограниченного мас-

сива данных подобные заключения должны делаться с осторожностью.

Анализ всего массива хорошо известных экспериментальных данных по зависимости критического диаметра детонации от плотности ρ , показал, что они с хорошей точностью описываются простым алгебраическим уравнением:

$$d_{cr} = k[(L/d_{mb})^3 - 1], \quad (7)$$

в котором имеется всего лишь один, индивидуальный для каждого ВВ коэффициент с размерностью длины. Легко заметить, что в этом случае в безразмерных координатах d_{cr}/k от $(L/d_{mb})^3$ экспериментальные данные для всех ЭВВ должны описываться единой линейной зависимостью. Такая зависимость приведена на рис. 5. Видно, что уравнение (7) с достаточной хорошей точностью описывает весь массив экспериментальных данных, в том числе и полученных при низких концентрациях микросфер, достигнутых на сегодняшний день.

Полученный результат является неожиданным, в особенности если иметь в виду, что имеющиеся на настоящий момент экспериментальные данные получены для ЭВВ с существенными различиями в свойствах. Содержание нитрата аммония в составах варьировалось в диапазоне 62–77.7%, нитрата натрия — в диапазоне 0–16%, нитрата кальция — в диапазоне 0–14.6%, воды — в диапазоне 11.2–16%, горючих компонентов — в диапазоне 5.4–7.8%. Раз-

меры капель эмульсионной матрицы изменялись в пределах от менее 0.42 до 10 мкм. Перечисленные различия оказывают заметное влияние на физико-химические свойства эмульсионного ВВ, в частности на энергетические свойства [22] и вязкость. Различными были и свойства микросфер, использовавшихся для сенсibilизации эмульсии. Их размер изменялся в диапазоне от 53 до 2420 мкм, они различались материалом оболочки и толщиной ее стенки, а также наполняющим поры газом. Были различными и методики, использовавшиеся при определении критических условий для распространения детонации, и точность, с которой определялись значения критического диаметра

Полученные в настоящей работе результаты являются важными с практической точки зрения. Уравнениями (3) и (7) можно легко воспользоваться для предсказания полной зависимости критического диаметра детонации от плотности для любого ЭВВ. Для этого достаточно определить значение d_{cr} при каком-то одном значении плотности ρ в ее рабочем диапазоне значений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование детонационной способности эмульсионного ВВ на основе нитрата аммония. Экспериментально определены зависимости критического диаметра детонации и критической скорости от плотности ЭВВ. Установлено, что зависимость критического диаметра детонации от плотности (пористости) ЭВВ имеет U-образный вид, и это третий случай обнаружения зависимости подобного вида для ЭВВ. В отличие от первых двух случаев [3, 4] такая зависимость получена для эмульсионной матрицы, изготовленной на основе однокомпонентного окислителя и при относительно малом (до 5%) содержании инертной добавки. Необходимо отметить, что данная особенность в поведении ЭВВ до сих пор не имеет общепринятого объяснения.

В результате проведенного анализа как полученных, так и имеющихся в литературе экспериментальных данных показано, что зависимости критического диаметра детонации от пористости ЭВВ и соответствующего ей расстояния между центрами микросфер могут быть описаны с достаточной точностью простыми эмпирическими уравнениями с одним численным коэффициентом. Этот коэффициент является индивидуальным для каждого ЭВВ и описывает все различия в физико-химических свойствах смесей эмульсионных матриц, изготовленных на основе нитрата аммония, с полыми микросферами. Предложен-

ные уравнения могут быть использованы для надежного предсказания полной зависимости критического диаметра детонации от плотности ЭВВ (в ее рабочем диапазоне значений) без проведения большого количества испытаний, а также для оценки влияния на детонационную способность ЭВВ его состава, размера капель эмульсионной матрицы и размера микросфер.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в установлении критических условий для распространения детонации в эмульсионных ВВ определяющую роль играют скорость энерговыделения и газодинамические процессы, а доминирующий механизм образования горячих точек в условиях нормальной детонации ЭВВ остается единым.

Авторы признательны А.В. Савченко за большой вклад в подготовку и проведение экспериментов.

Работа выполнена при частичной поддержке Программой фундаментальных исследований Президиума РАН "Горение и взрыв". Авторы также выражают благодарность Федеральному агентству научных организаций России за частичную финансовую поддержку исследований критического диаметра составов на основе аммиачной селитры в рамках проекта № 0082-2018-0002 (регистрационный код АААА-А18-118031490034-6), а также за поддержку разработки методики измерений в рамках проекта № 0089-2019-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Price D. // Proc. 11th Intern. Sympos. on Combust. Pittsburgh: The Combust. Inst., 1966. P. 693.
2. Cooper J., Leiper G.A. // Proc. 11th Intern. Sympos. on Detonation. Snowmass: ONR, 1998. P. 293.
3. Yoshida M., Iida M., Tanaka K. et al. // Proc. 8th Intern. Sympos. on Detonation. Albuquerque: ONR, 1985. P. 993.
4. Юношев А.С., Пластинин А.В., Сильвестров В.В. // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48. № 3. С. 79.
5. Lavrov V.V., Savchenko A.V. // Theory and Practice Energetic Mater. 2011. IX. P. 530.
6. Lavrov V.V., Koldunov S.A., Savchenko A.V. // Ibid. P. 536.
7. Lee J., Sandstrom F.W., Craig B.G., Persson P.-A. // Proc. 9th Intern. Sympos. on Detonation. Portland: ONR, 1989. P. 263.
8. Алымова Я.В., Анников В.Э., Власов Н.Ю., Кондриков Б.Н. // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30. № 3. С. 86.
9. Hirotsaki Y., Murata K., Kato Y., Itoh S. // Proc. 12th Intern. Sympos. on Detonation. San Diego: ONR, 2002. P. 263.
10. Cooper J., Leiper G.A. // J. Energ. Mat. 1989. V. 7. № 4–5. P. 405.

11. *Lee J., Persson P.A.* // Prop., Expl., Pyrot. 1990. V. 15. P. 208.
12. *Chaudhri M.M., Almgren L.-A., Persson P.-A.* // Proc. 10th Intern. Symp. on Detonation. Boston: ONR, 1993. P. 741.
13. *Соснин В.А., Межеричкий С.Э. и др.* // Вестн. технологич. ун-та. 2016. Т. 19. № 19. С. 28.
14. *Silvestrov V.V., Plastinin A.V.* // Combust., Expl., and Shock Waves. 2009. V. 45. № 5. P. 618.
15. *Mendes R., Ribeiro J. Plaksin I., Campos J., Tavares B.* // J. Phys. Conf. Ser. 2014. V. 500. 052030. P. 1.
16. *Жданов Ю.В., Андержанов С.Р., Соснин В.А., Соснин А.В.* // Вестн. технологич. ун-та. 2016. Т.19. № 19. С. 7.
17. *Cheng Y., Wang Y. et al.* // Cent. Eur. J. Energ. Mater. 2016. V. 13. № 3. P. 705.
18. *Yunoshev A.S., Sil'vestrov V.V., Plastinin A.V., Rafeichik S.I.* // Combust., Expl., and Shock Waves. 2017. V. 53. № 2. P. 205.
19. *Хасаинов Б.А., Амтеков А.В., Борисов А.А.* // Хим. физика. 1996. Т. 15. № 7. С. 53.
20. *Khasainov B.A., Ermolaev B.S., Presles H.N.* // Proc. 10th Symp. on Detonation. Boston: ONR, 1993. P. 749.
21. *Karakhanov S.M., Plastinin A.V., Bordzilovskii D.S., Bordzilovskii S.A.* // Comb., Expl., and Shock Waves. 2016. V. 52. № 3. P. 350.
22. *Cudzilo S., Kohlicek P., Trzcinski V.A., Zeman S.* // Ibid. 2002. № 4. P. 463.