

## СКОРОСТЬ ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С ЦЕНОСФЕРАМИ

А. Г. Аншиц<sup>1</sup>, Н. Н. Аншиц<sup>1</sup>, А. А. Дерibas<sup>2</sup>, С. М. Караханов<sup>2</sup>,  
Н. С. Касаткина<sup>3</sup>, А. В. Пластинин<sup>2</sup>, А. Ю. Решетняк<sup>4</sup>,  
В. В. Сильвестров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт химии и химической технологии СО РАН, 660049 Красноярск

<sup>2</sup>Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, silver@hydro.nsc.ru

<sup>3</sup>Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, 630090 Новосибирск

<sup>4</sup>Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Измерена скорость детонации эмульсионного взрывчатого вещества, содержащего в качестве сенсibilизатора полые алюмосиликатные микросферы — пеносферы. Размер микросфер  $50 \div 250$  мкм. Выполнено сравнение зависимостей скорости детонации от плотности и диаметра заряда для эмульсионного взрывчатого вещества, содержащего пеносферы или стеклянные микробаллоны как сенсibilизатор. Показано, что максимальная скорость детонации состава с пеносферами размером  $70 \div 100$  мкм составляет  $5.5 \div 5.6$  км/с при диаметре заряда 55 мм, как и для микробаллонов из стекла производства компании 3М. Критический диаметр эмульсионного взрывчатого вещества с пеносферами в  $1.5 \div 2$  раза больше критического диаметра эмульсионного взрывчатого вещества с микробаллонами из стекла и составляет  $35 \div 40$  мм.

Ключевые слова: эмульсионные взрывчатые вещества, пеносферы, скорость детонации, критический диаметр.

### ВВЕДЕНИЕ

Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ) изобретены более 40 лет назад [1], и изучению их характеристик посвящено множество работ [2–11]. В настоящее время за рубежом ЭВВ занимают ведущее место среди промышленных взрывчатых веществ (ВВ) ввиду ряда неоспоримых преимуществ. При достаточно высокой скорости детонации (до  $5 \div 6$  км/с) ЭВВ характеризуются низкой токсичностью продуктов взрыва, высокой водостойкостью, небольшими значениями критического диаметра, высокой степенью безопасности и возможностью механизированного снаряжения зарядов.

Основными компонентами ЭВВ являются аммиачная селитра (АС) либо ее смесь с нитриевой или кальциевой селитрой, вода, горючий компонент, в качестве которого используются легкие нефтепродукты, и эмульгатор, обеспечивающий стабильное состояние эмульсии в течение необходимого времени. Собствен-

но эмульсия неспособна детонировать без специальных сенсibilизаторов [4]. Обычно в качестве сенсibilизаторов используются микропузырьки газа, которые вносятся в объем эмульсии химическим путем [8, 10], включения из пористого перлита [8] либо полые микросферы из стекла [2–8] или полимера [9].

Цель данной работы — измерение двух основных характеристик, скорости детонации  $D$  и критического диаметра  $d_{cr}$  эмульсионного ВВ, в котором используются пеносферы — полые микробаллоны, выделенные из золы от сжигания углей [12]. Их применение в качестве сенсibilизатора ЭВВ представляет интерес в практике взрывных работ ввиду потенциальной дешевизны исходного сырья для выделения пеносфер.

### ЭМУЛЬСИЯ

Массовый состав эмульсии следующий: АС — 76.9 %, индустриальное масло И-20 (ИМ) — 6.9 %, вода — 15.2 %, эмульгатор РЭМ — 1 %. Эмульсию готовили в лабораторных условиях на кипящей водяной бане в фарфоровой емкости. АС растворяли при температуре  $\approx 86$  °С, затем полученный раствор на-

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 118, Фонда Президента РФ (номер НШ-2073.2003.1), Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 04-03-33187) и ККФН (12F0059С).

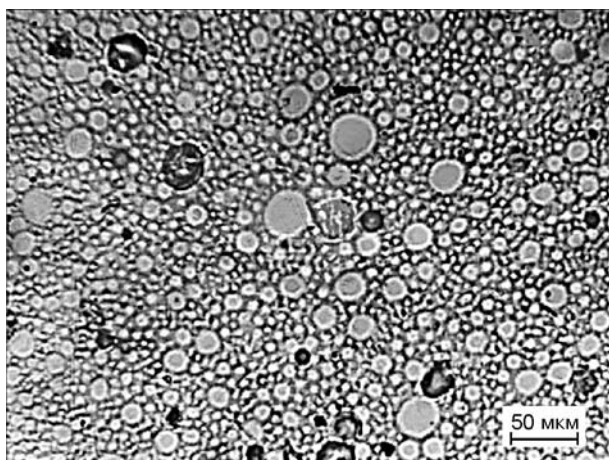


Рис. 1. Структура эмульсионной основы

гревали до  $94 \div 96$  °С. ИМ смешивали с эмульгатором в другой фарфоровой емкости, также помещенной на кипящую водяную баню. После нагрева этой смеси горячий раствор АС тонкой струйкой приливали к смеси ИМ с эмульгатором при одновременном интенсивном перемешивании с помощью электрического миксера в течение  $3 \div 5$  мин. Смесь постепенно приобретала свойства эмульсии.

Оперативный контроль степени перемешивания проводили при помощи специального пробника, погружаемого в эмульсию: измеряли электрическую емкость сосуда с эмульсией, которая сразу после смешения компонентов составляла  $1800 \div 2000$  пФ. Перемешивание проводилось до тех пор, пока емкость не уменьшалась до  $750 \div 800$  пФ, при этом температура эмульсии составляла  $90 \div 92$  °С. В результате получалась эмульсия типа «вода в масле», представляющая густую малотекучую среду, от светло-желтого до темно-желтого цвета, плотностью  $\rho_e = (1.35 \pm 0.002)$  г/см<sup>3</sup>. Микроскопический анализ показал, что эмульсия содержит дискретную фазу — капли раствора АС размером  $5 \div 50$  мкм, окруженные непрерывной фазой — маслом с эмульгатором (рис. 1).

Сенсибилизирующие включения добавляли в горячую ( $85 \div 90$  °С) эмульсию сверх 100 % и замешивали при наименьшей скорости вращения миксера, чтобы не разрушить микробаллоны. Объемная концентрация микросфер составляла  $v_{mb} = 7 \div 32$  % сверх объема эмульсии, массовая концентрация  $\mu_{mb} = 1 \div 18$  %.

В каждом опыте измеряли плотность ЭВВ

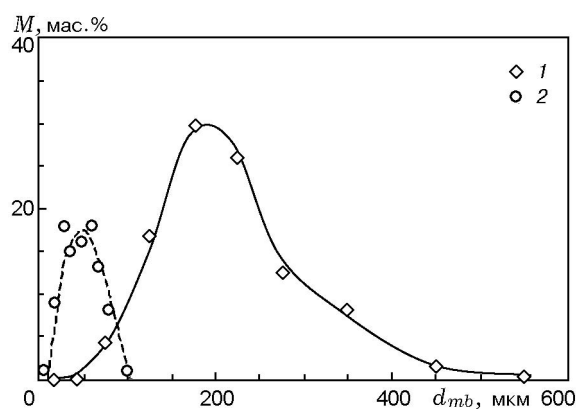


Рис. 2. Распределение частиц золы по размеру для зольного концентрата (1) и микробаллонов 3М (2)

$\rho_0$  с погрешностью  $0.003$  г/см<sup>3</sup>. Диапазон ее изменения составлял  $1.14 \div 1.3$  г/см<sup>3</sup> в зависимости от количества и насыпной плотности микросфер. Отметим, что при изготовлении эмульсии и замешивании микросфер в ЭВВ неизбежно подмешивается атмосферный воздух и в ЭВВ всегда существуют воздушные пузырьки. Количество подмешиваемого воздуха контролировать практически невозможно. Поэтому плотность ЭВВ даже при одинаковых по составу и режиму замесах изменялась, и различие достигало  $0.006$  г/см<sup>3</sup>.

Отметим, что для инициирования ЭВВ на основе данной эмульсии необходимо применение боевика из более мощного ВВ. При использовании только капсуля-детонатора типа ЭДВ-1 рассматриваемое ЭВВ не взрывается при применении в качестве сенсибилизатора как микросфер 3М, так и ценосфер.

## ЦЕНОСФЕРЫ

Фракционный состав зольного концентрата с насыпной плотностью  $\approx 0.38 \div 0.4$  г/см<sup>3</sup> (зольные отходы Новосибирской ТЭЦ-5 в состоянии поставки) приведен на рис. 2. Максимум распределения зольных частиц по размеру приходится на фракцию  $150 \div 250$  мкм. Около 85 мас. % частиц в зольном концентрате имеют размер  $100 \div 300$  мкм, не более 5 % — размер  $< 100$  мкм, менее 10 % — размер  $> 300$  мкм. Флотирование концентрата в воде показало, что  $\leq 0.5$  % зольных частиц имеет плотность более  $1$  г/см<sup>3</sup>. Основная часть зольных частиц представляла собой округлые

Характеристики ценосфер

Фракция, мкм	$d_{mb}$ , мкм	$\rho_{mb}$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\delta$ , мкм	$\delta/d_{mb}$
50 ÷ 63	57	0.46	2.44	3.8	0.067
50 ÷ 63	57	0.34	2.44	2.6	0.046
63 ÷ 71	67	0.33	2.44	2.8	0.042
70 ÷ 100	86	0.36	2.42	3.2	0.038
70 ÷ 100	86	0.38	2.45	3.6	0.042
70 ÷ 100	86	0.4	2.45	3.7	0.044
100 ÷ 125	113	0.35 ÷ 0.36	2.44	5 ÷ 6.1	0.044 ÷ 0.054
80 ÷ 180	130	0.36 ÷ 0.38	2.45	5.6 ÷ 5.9	0.043 ÷ 0.045
125 ÷ 160	143	0.36	2.44	6.1	0.043
160 ÷ 180	170	0.38	2.45	7.6	0.045

полые образования, называемые ценосферами. Форма непросеянных ценосфер близка к сферической, но их размер изменяется в широких пределах — от 50 до 450 мкм.

Для сравнения рассмотрены полые стеклянные микросферы производства компании 3М фракции К1. Их насыпная плотность  $\rho_{mb} = 0.12$  г/см<sup>3</sup>, толщина стенки  $\approx 0.3 \div 0.6$  мкм. Размер микросфер 3М в состоянии поставки  $10 \div 100$  мкм с максимумом распределения в диапазоне  $35 \div 70$  мкм (см. рис. 2). Эти микросферы производятся из легкоплавкого стекла по сложной технологии и являются лучшим сенсibilизатором с точки зрения величин и стабильности детонационных характеристик ЭВВ, но их стоимость ( $\approx 7$  евро/кг) слишком высока для большинства потребителей ЭВВ в России.

В данной работе основное внимание уделено использованию ценосфер узких фракций в качестве сенсibilизатора для ЭВВ. Выделение ценосфер из зольного концентрата проводилось по трехстадийной схеме, включающей в себя магнитную сепарацию, гидродинамическое разделение по плотности и гранулометрическую классификацию [12]. Форма ценосфер узких фракций близка к правильной сфере (рис. 3, а, б).

Характеристики узких фракций ценосфер приведены в таблице. Насыпную плотность ценосфер измеряли объемно-весовым методом по ГОСТ 9758-86. Истинную плотность  $\rho$  стеклокристаллической фазы оболочки измельченных ценосфер определяли пикнометрическим методом по ГОСТ 2211-65 (ИСО 5018-83). Среднюю

толщину оболочки ценосфер рассчитывали по формуле  $\delta = 0.25d_{mb} \frac{\rho - \sqrt{\rho^2 - 2.148\rho\rho_{mb}}}{\rho}$ , где

$d_{mb}$  — средний диаметр глобул узких фракций.

Приведенные в таблице данные показывают, что толщина оболочки увеличивается с ростом размера ценосфер и их насыпной плотности. Например, для фракции  $50 \div 63$  мкм и  $\rho_{mb} = 0.34$  и  $0.46$  г/см<sup>3</sup> толщина оболочки составляет 2.6 и 3.8 мкм соответственно. С увеличением размера ценосфер до  $d_{mb} = 160 \div 180$  мкм при  $\rho_{mb} = 0.37$  г/см<sup>3</sup> средняя толщина оболочки достигает 7.6 мкм. Широкая ( $80 \div 180$  мкм) фракция ценосфер, наряду с большой толщиной оболочки ( $5.6 \div 5.9$  мкм), имеет широкий максимум распределения частиц —  $110 \div 170$  мкм.

Анализ снимков предварительно разрушенных ценосфер, полученных при помощи сканирующего электронного микроскопа, подтверждает результаты анализа толщины оболочки ценосфер, выполненного объемно-весовым методом. Для ценосфер фракции  $50 \div 63$  мкм с  $\rho_{mb} = 0.34$  г/см<sup>3</sup> характерна тонкая,  $1 \div 3$  мкм, сплошная оболочка с незначительным количеством газовых включений (рис. 3, в). Ценосферы этой же фракции с  $\rho_{mb} = 0.46$  г/см<sup>3</sup> характеризуются более толстой ( $3 \div 8$  мкм) стенкой с большим числом газовых включений (рис. 3, г). При этом в данной фракции присутствует до  $5 \div 10$  % «плеросфер», в которых основная полая оболочка заполнена более мелкими глобулами (размером  $1 \div 20$  мкм). Для наиболее крупных фракций  $125 \div 160$  и  $160 \div 180$  мкм ( $\rho_{mb} = 0.36 \div 0.38$  г/см<sup>3</sup>) ха-

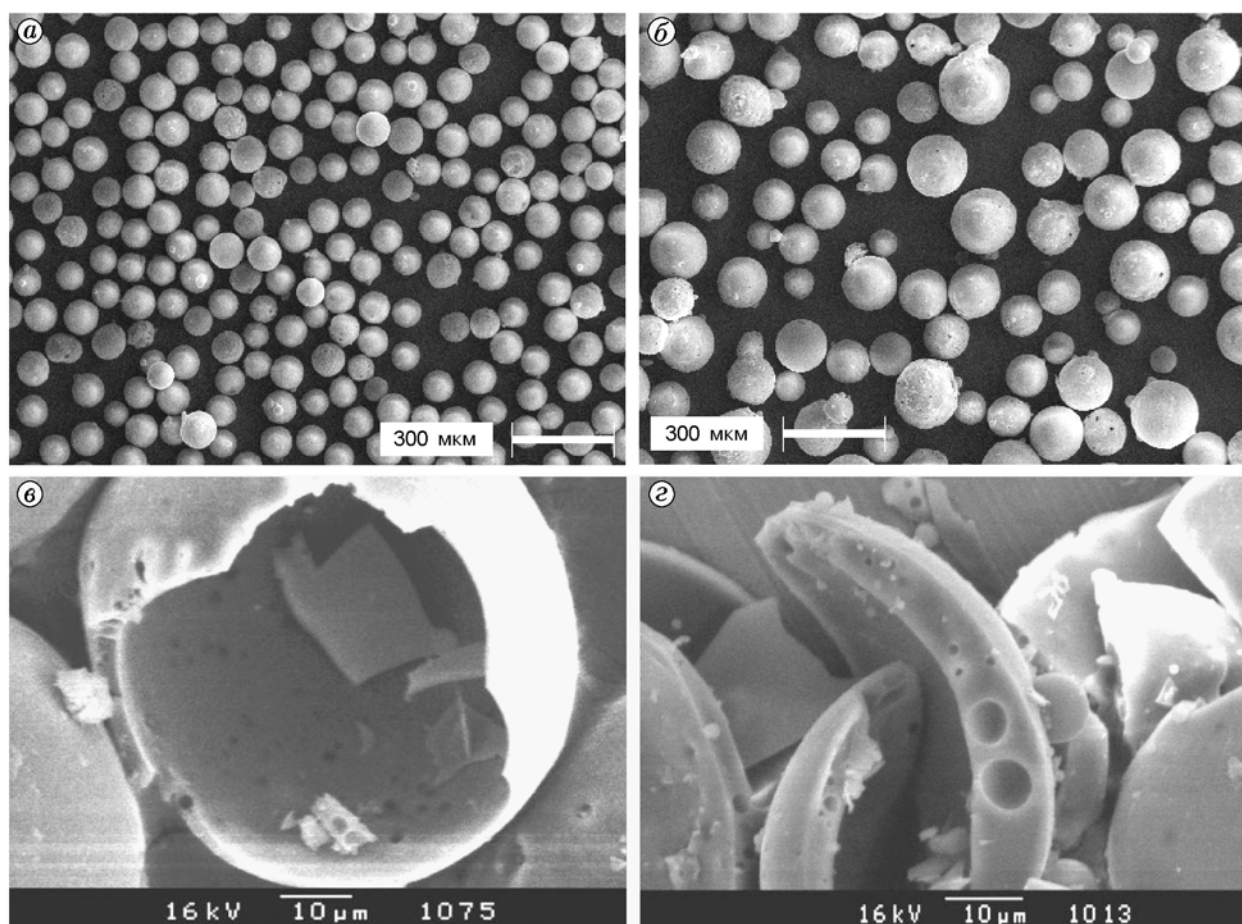


Рис. 3. Микрофотографии целых (*a*, *b*) и разрушенных (*в*, *г*) ценосфер:

*a* — фракция  $70 \div 80$  мкм, *b* —  $70 \div 250$  мкм, *в* —  $50 \div 63$  мкм ( $\rho_{mb} = 0.34$  г/см<sup>3</sup>), *г* —  $50 \div 63$  мкм ( $\rho_{mb} = 0.46$  г/см<sup>3</sup>)

рактены оболочки с более толстой стенкой ( $\delta = 5 \div 20$  мкм) и высокой пористостью. Таким образом, с увеличением размера и насыпной плотности ценосфер увеличиваются и толщина оболочки, и ее пористость. В отличие от ценосфер толщина стенки микробаллонов 3М из стекла уменьшается при увеличении их диаметра и пористость практически отсутствует [8].

### ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ОТ ПЛОТНОСТИ ЭВВ

Для определения зависимости скорости детонации от плотности ЭВВ и типа микросфер использовались цилиндрические заряды диаметром  $d = 55$  мм в трубках из полиэтилена с толщиной стенки 1 мм. Длина зарядов составляла 350 мм, в контрольных опытах — 700 мм. При определении критического диаметра детонации использовались заряды мень-

ших диаметров в трубках из винипласта или бумаги с толщиной стенки  $0.5 \div 1$  мм, длина заряда  $10 \div 15$  калибров. Для сокращения длины переходного участка заряд инициировался с помощью боевика из сплава ТГ50/50 диаметром  $d$  и высотой  $\approx d/2$ . Скорость детонации измерялась на последних 120 мм заряда ЭВВ при помощи четырех контактных датчиков. Порог срабатывания датчиков по давлению составлял  $\approx 1$  кбар, и при срыве детонации фиксировалась затухающая ударная волна в ЭВВ. Интервалы времени регистрировались цифровыми хронометрами с разрешением 10 нс. Погрешность измерения скорости детонации  $< 1$  %.

Для контроля качества используемой эмульсии для заряда диаметром 55 мм (со стеклянными микробаллонами 3М в качестве сенсibilизатора) определена зависимость  $D(\rho_0)$ . На рис. 4 приведены результаты вы-

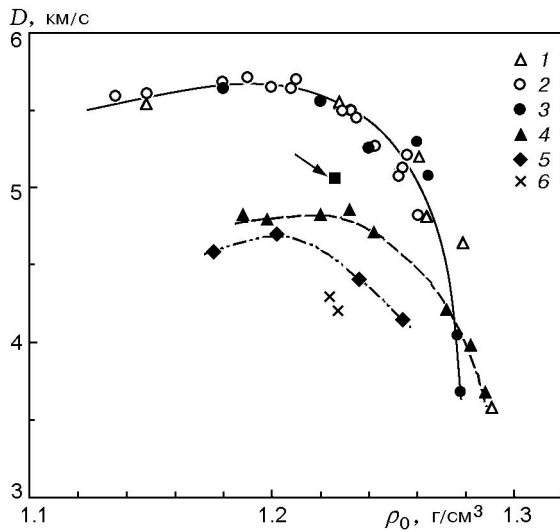


Рис. 4. Зависимость скорости детонации от плотности ЭВВ:

1 — данные [4], диаметр заряда  $d = 52.5$  мм, микросферы 3М; данные авторов,  $d = 55$  мм: 2 — микросферы 3М, 3 — пеносферы  $70 \div 100$  мкм, 4 — пеносферы  $80 \div 180$  мкм; 5 — пеносферы  $70 \div 250$  мкм, 6 — зольный концентрат

полненных нами измерений и данные [4], полученные при  $d = 52.5$  мм. В [4] использовались несепарированные микросферы 3М со средним размером  $d_{mb} \approx 70$  мкм и эмульсия, близкая к нашей по составу, но с меньшим размером капель окислителя ( $\approx 1 \div 5$  мкм). Данные, полученные нами на зарядах с микросферами 3М при  $\rho_0 = 1.14 \div 1.26$  г/см<sup>3</sup>, практически совпадают с данными [4], что указывает на несущественное влияние максимального размера капель окислителя в диапазоне  $1 \div 50$  мкм на значение скорости детонации при достаточно большом диаметре заряда ЭВВ. Максимум скорости детонации наблюдается при  $\rho_m \approx 1.18 \div 1.22$  г/см<sup>3</sup> ( $v_{mb} = 14 \div 17$  %,  $\mu_{mb} \approx 2.3 \div 2.7$  %). Срыв детонации наблюдается при  $\rho_0 \geq 1.26$  г/см<sup>3</sup> ( $v_{mb} < 8$  %,  $\mu_{mb} < 1.3$  %). Заметно уменьшение критической плотности  $\rho_{cr}$  примерно на  $0.02$  г/см<sup>3</sup> по сравнению с [4]. Возможно, это связано с различием дисперсностей эмульсии и горючего компонента, используемого для изготовления ЭВВ.

Зависимость  $D(\rho_0)$  определена для трех фракций пеносфер. Для легкой узкой фракции  $70 \div 100$  мкм ( $\rho_{mb} = 0.36 \div 0.38$  г/см<sup>3</sup>) максимум скорости составляет  $D_{max} = 5.5 \div 5.6$  км/с и достигается при  $\rho_m = 1.18 \div 1.2$  г/см<sup>3</sup> ( $v_{mb} =$

$16.7 \div 18$  %,  $\mu_{mb} \approx 8 \div 9$  %). Срыв детонации наблюдается при  $\rho_0 > 1.28$  г/см<sup>3</sup> ( $v_{mb} < 11$  %,  $\mu_{mb} < 5$  %). Наши данные по скорости детонации практически совпадают с экспериментами, в которых использовались стеклянные микробаллоны насыпной плотностью  $0.12$  г/см<sup>3</sup> компании 3М. Максимальное значение скорости детонации выше максимума скорости детонации ЭВВ с газогенерирующей добавкой нитрита натрия, который составляет  $D_{max} \approx 5$  км/с для зарядов порэмита П-1 диаметром  $70$  мм [10]. Этот результат расходится с утверждением об уменьшении скорости детонации ЭВВ на  $450 \div 1600$  м/с при использовании твердых полых включений по сравнению с газовым сенсibilизатором [10], но согласуется с результатами работы [8], где показано, что по влиянию на скорость детонации газовые включения занимают промежуточное положение между включениями из перлита и полыми микробаллонами из стекла.

Для более широкой фракции  $80 \div 180$  мкм ( $\rho_{mb} = 0.36 \div 0.38$  г/см<sup>3</sup>) в интервале  $\rho_m = 1.18 \div 1.22$  г/см<sup>3</sup> максимум скорости детонации  $D_{max} = 4.8 \div 4.9$  км/с наблюдается при  $v_{mb} = 18 \div 28$  %,  $\mu_{mb} \approx 9 \div 14$  % (см. рис. 4). При плотности ЭВВ  $\rho_0 \geq 1.29$  г/см<sup>3</sup> ( $\mu_{mb} < 5.5$  %) детонация срывается. Увеличение среднего размера пеносфер до  $200$  мкм (фракция  $70 \div 250$  мкм,  $\rho_{mb} = 0.43$  г/см<sup>3</sup>) приводит к дальнейшему снижению максимальной скорости до  $4.6 \div 4.7$  км/с, достигаемой при  $\rho_0 \approx 1.2$  г/см<sup>3</sup> ( $v_{mb} \approx 25$  %,  $\mu_{mb} \approx 15$  %).

Таким образом, для обеспечения максимальной скорости детонации на уровне  $4.6 \div 5.7$  км/с для заряда ЭВВ диаметром  $55$  мм необходимо в  $4 \div 6$  раз больше (по массе) пеносфер, чем микробаллонов 3М фракции К1. За счет более толстой стенки эффективность отдельной пеносферы как «горячей точки» при инициировании детонационного процесса в локальном объеме ЭВВ меньше, чем при использовании тонкостенного микробаллона 3М. Поэтому пеносфер и требуется по числу «горячих точек» (числу отдельных микробаллонов), примерно в  $\sqrt[3]{4 \div 6} \approx 1.7$  раз больше. Более высокая насыпная плотность пеносфер (больше в три раза) увеличивает и необходимую массовую концентрацию. Поэтому при практическом использовании пеносфер как сенсibilизатора для ЭВВ необходимо, чтобы их стоимость была, по меньшей мере, примерно в пять раз ни-

же стоимости стеклянных микробаллонов 3М фракции К1 за единицу массы.

Отрицательное влияние высокой насыпной плотности ценосфер (иначе, более толстой стенки) видно по результату опыта, в котором использовались ценосферы размером  $70 \div 100$  мкм с  $\rho_{mb} = 0.4$  г/см<sup>3</sup> (точка на рис. 4, помеченная стрелкой). При увеличении удельной массы или относительной толщины стенки  $\delta/d_{mb}$  ценосфер только на 10 % (см. таблицу) максимальная скорость детонации уменьшается на 0.5 км/с. Отметим, при двукратном увеличении насыпной плотности микробаллонов 3М из стекла (фракции К1 и К25) скорость детонации также уменьшается, но всего на 0.13 км/с [8].

### ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЦЕНОСФЕР

Влияние размера полых микросфер из стекла или полимера на скорость детонации хорошо известно [2, 6, 9]: чем больше диаметр микробаллона, тем ниже скорость детонации. Предполагается, что этот эффект обусловлен «охлаждением горячей точки» волной разгрузки, генерируемой из центра «точки» при ее взрыве. Эти данные получены при различных составах эмульсий и различных диаметрах заряда ЭВВ, но вполне могут использоваться для качественной оценки влияния среднего размера микробаллонов  $d_{mb}$  из стекла и ценосфер на скорость детонации. Для микробаллонов 3М при изменении  $d_{mb}$  от 153 до 35 мкм значение  $D_{max}$  растет при уменьшении размера включения, но максимума не достигает (рис. 5).

Для определения «оптимального» размера ценосфер, при котором скорость детонации достигает максимума при прочих равных условиях, проведены эксперименты для ценосфер со средним размером  $d_{mb} = 57 \div 200$  мкм при объемной концентрации ценосфер  $v_{mb} \approx 17$  %. Плотность ЭВВ составляла  $1.18 \div 1.22$  г/см<sup>3</sup>. Результаты для заряда диаметром 55 мм приведены на рис. 5. Как и для микробаллонов из стекла, скорость детонации падает более чем на 1 км/с при увеличении среднего размера ценосфер от 85 до 200 мкм. Максимальное значение скорости детонации достигается для ценосфер фракции  $70 \div 100$  мкм с отношением толщины стенки к диаметру  $\delta/d_{mb} \approx 0.04$ .

Стрелкой на рис. 5 отмечен результат эксперимента, в котором были использованы «тяжелые» ценосферы фракции  $50 \div 63$  мкм

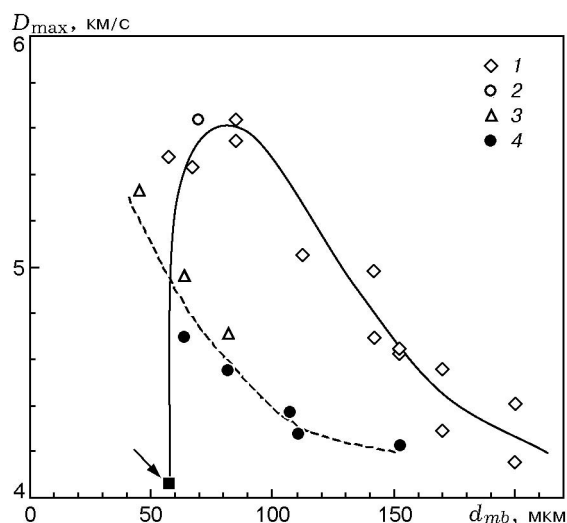


Рис. 5. Зависимость скорости детонации от размера микробаллонов:

данные авторов,  $d = 55$  мм: 1 — ценосферы; 2 — микросферы 3М; данные для микросфер 3М: 3 —  $d = 30$  мм [6], 4 —  $d = 23.6$  мм [7]

( $\rho_{mb} = 0.46$  г/см<sup>3</sup>) с максимальным отношением  $\delta/d_{mb} = 0.067$ . При этом детонация затухла, т. е. наличие  $5 \div 10$  % «плеросфер» — оболочек, заполненных более мелкими глобулами, — привело к тому, что ценосферы не выполнили роль «горячих точек». Этот опыт еще раз указывает на отрицательную роль высокой плотности отдельных фракций ценосфер.

Если определяющим механизмом разогрева «горячей точки» в ЭВВ является вязкий разогрев эмульсии за счет внутреннего трения при схлопывании полых микросфер, то на кривой  $D = f(d_{mb})$  должен существовать максимум, так как предельный диаметр схлопывания  $d^*$  микропоры будет ограничиваться объемом материала разрушенной оболочки. Результаты описанного выше опыта позволяют оценить диаметр схлопывания  $d^* \approx d_{mb}/3$ , при котором происходит эффективный разогрев «горячей точки», при этом площадь поверхности микропоры уменьшается примерно в 10 раз.

Другой причиной значительного влияния размера и насыпной плотности ценосфер на максимальную скорость детонации (см. рис. 5) может быть существенное влияние размера и насыпной плотности микросфер (а также дисперсности эмульсии) на критический диаметр детонации ЭВВ\*. В этом случае уменьшение

\* Данное объяснение предложено рецензентом работы К. К. Шведовым, за что авторы выражают ему глубокую признательность.

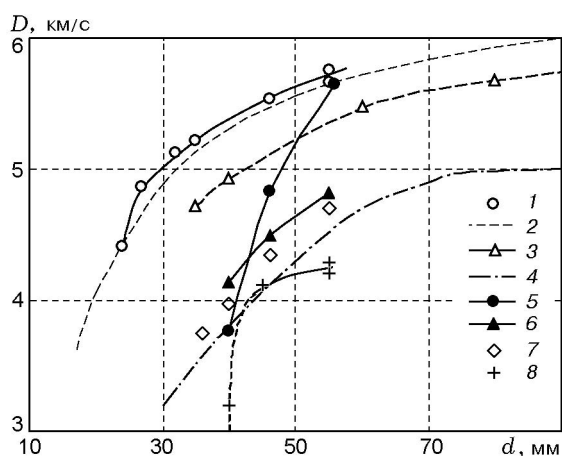


Рис. 6. Влияние диаметра заряда на скорость детонации ЭВВ:

микробаллоны 3М: 1 — данные авторов, 2 — [4], 3 — [11]; газовые включения: 4 — порэммит П-1 [10]; пеносферы фракции (мкм): 5 —  $70 \div 100$ , 6 —  $80 \div 180$ , 7 —  $70 \div 250$ ; зольный концентрат — 8

скорости детонации при увеличении размера пеносфер объясняется увеличением критического диаметра ЭВВ, так как данные на рис. 5 получены при фиксированном диаметре заряда ЭВВ (причина качественно аналогична той, которая объясняет уменьшение скорости детонации при увеличении плотности ЭВВ, см. рис. 4 и объяснение эффекта ниже). Из этого пояснения следует, что скорость детонации рассматриваемого ЭВВ может существенно расти при увеличении диаметра заряда даже при использовании полых микросфер большого размера, более 100 мкм (или несепарированных пеносфер, или зольного концентрата).

Таким образом, при практическом использовании пеносфер в качестве сенсibilизатора для ЭВВ для получения максимальной скорости детонации целесообразно выделить наиболее легких фракций с насыпной плотностью не более  $0.4 \text{ г/см}^3$  и отсеб мелкой, «тяжелой» фракции с  $d_{mb} < 70$  мкм. Максимальный размер пеносфер следует ограничить значением  $\approx 200 \div 250$  мкм. При этих условиях скорость детонации используемой эмульсии не менее  $4.5 \div 5.5$  км/с при диаметре заряда  $d \geq 55$  мм.

### КРИТИЧЕСКИЙ ДИАМЕТР ДЕТОНАЦИИ ЭВВ

В первой серии опытов в качестве сенсibilизаторов использовались микросферы 3М и критический диаметр исследуемой эмульсии находился в пределах  $19$  (отказ)  $< d_{cr} <$

(взрыв)  $24$  мм при  $\rho_0 \approx 1.19 \div 1.20 \text{ г/см}^3$  (рис. 6). Значение  $d_{cr}$  для аналогичного ЭВВ, но с размером капель эмульсии  $1 \div 5$  мкм составляло  $14$  мм [4]. По-видимому, разница связана с различием дисперсностей эмульсий: изменение максимального размера капель эмульсии от  $10$  до  $3$  мкм приводит к уменьшению критического диаметра ЭВВ примерно в  $1.7$  раза [13].

Для пеносфер фракции  $70 \div 100$  мкм критический диаметр детонации составил  $35 < d_{cr} < 40$  мм при  $\rho_0 = 1.21 \div 1.23 \text{ г/см}^3$ . Для более крупных пеносфер фракции  $80 \div 180$  мкм при  $\rho_0 = 1.21 \div 1.22 \text{ г/см}^3$  получен тот же результат:  $35 < d_{cr} < 40$  мм. Для пеносфер фракции  $100 \div 250$  мкм и плотности ЭВВ  $\rho_0 = 1.2 \div 1.21 \text{ г/см}^3$  критический диаметр детонации лежит в диапазоне  $30 < d_{cr} < 35$  мм. Для пеносфер скорость детонации вблизи критического диаметра составляет  $D_{cr} = 3.7 \div 4.1$  км/с и близка к скорости детонации вблизи критической плотности (см. рис. 4). Это совпадение не случайно и указывает на то, что причина срыва детонации как вблизи критического диаметра, так и вблизи критической плотности одна и та же.

Наше исследование было бы неполным без данных для несепарированных пеносфер — наиболее дешевого из рассматриваемых сенсibilизаторов. С этой целью была измерена скорость детонации заряда диаметром  $55$  мм ( $\mu_{mb} \approx 14\%$ ,  $\rho_0 = 1.2 \text{ г/см}^3$ ) при использовании в качестве сенсibilизатора зольного концентрата в состоянии поставки. В двух опытах получено значение  $D = (4.24 \pm 0.04)$  км/с (см. рис. 4). Критический диаметр детонации для этого ЭВВ составил  $40 \leq d_{cr} < 45$  мм: при  $d_{cr} = 40$  мм в обоих опытах зарегистрирован затухающий взрывной процесс со скоростью от  $3.3 \div 3.45$  до  $2.9 \div 3.3$  км/с на последних  $150$  мм заряда длиной  $0.5$  м (см. рис. 6).

Представление данных в виде зависимости  $D(d)$  еще раз показывает, что по скорости детонации ЭВВ с пеносферами занимает промежуточное положение между ЭВВ с микробаллонами 3М и порэммитом П-1 — эмульсионным ВВ с газовыми включениями. Средние значения критического диаметра детонации ЭВВ с пеносферами составляют  $35 \div 40$  мм, что  $1.5 \div 2$  раза больше, чем при использовании микробаллонов 3М. Но, используя смесь аммиачной и натриевой селитры для изготовления эмульсии, можно существенно уменьшить

критический диаметр детонации ЭВВ [2–4] и с ценосферами, что необходимо при использовании патронированных ЭВВ с ценосферами при диаметре заряда  $30 \div 35$  мм.

### О ПРИЧИНЕ УМЕНЬШЕНИЯ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ЭВВ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ПЛОТНОСТИ

Остановимся на уменьшении скорости детонации ЭВВ при росте плотности после достижения максимума скорости детонации (см. рис. 4). Качественное объяснение этого эффекта очевидно\*. С уменьшением количества микросфер уменьшается пористость ЭВВ и растет не только его плотность, но и критический диаметр детонации. Это хорошо известно из экспериментов с микробаллонами из стекла [2–8, 13]. Эксперимент по определению зависимости  $D = D(\rho_0)$  ставится при постоянном диаметре цилиндрического заряда  $d$ . С уменьшением пористости ЭВВ (росте плотности) скорость детонации сначала растет за счет увеличения удельной энергии взрыва. При дальнейшем увеличении плотности по мере сближения значений  $d$  и  $d_{cr}$  скорость детонации начинает уменьшаться, и наступает момент, когда выполняется соотношение  $d \leq d_{cr}(\rho_{cr})$ , т. е. происходит срыв детонации. Значение плотности в данный момент и является «критической плотностью»  $\rho_{cr}$  для данного диаметра заряда. Физического смысла это понятие не имеет, так как  $\rho_{cr}$  зависит от диаметра заряда [10]. На участке  $\rho_m < \rho_0 < \rho_{cr}$  скорость детонации уменьшается за счет роста влияния боковой разгрузки при сближении значений постоянного диаметра заряда ВВ и увеличивающегося критического диаметра ЭВВ. Из этого объяснения следует, что зависимость  $D = D(\rho_0)$  с экстремумом при постоянном значении  $d$  есть эффект двумерности, и правильное объяснение этой зависимости невозможно без учета влияния диаметра заряда на скорость детонации в заряде конечного диаметра. В первом приближении эффект диаметра можно учесть при помощи простейшей модели Эйринга [14], например, как  $D = D_i(\rho_0)(1 - A_r(\rho_0)/d)$ , где  $D_i(\rho_0)$  — скорость детонации заряда бесконечного диаметра и  $A_r(\rho_0)$  — ширина зоны реакции, кото-

рые зависят от плотности ВВ. Для ЭВВ ширина зоны реакции должна увеличиваться при росте его плотности.

Данная качественная модель позволяет объяснить не только существование максимума на зависимости  $D = D(\rho_0)$ , т. е. уменьшение  $D$  при  $\rho > \rho_m$ , но и возрастание значений  $\rho_{max}$  и  $\rho_{cr}$  при увеличении диаметра заряда ВВ. Предполагая, что ширина зоны реакции  $a_r$  и соответственно критический диаметр  $d_{cr} \sim a_r$  (принцип Харитона) растут при уменьшении скорости реакции детонационного превращения при увеличении диаметра микробаллона  $d_{mb}$  за счет волны разгрузки из центра микробаллона, можно понять, почему скорость детонации растет при уменьшении  $d_{mb}$ . Все эти эффекты действительно наблюдаются в эксперименте [3–8]. В этой связи представляет интерес прямое измерение ширины зоны реакции  $a_r$  при  $\rho_0 > \rho_{max}$  в области, где влияние пористости ЭВВ, размера  $d_{mb}$  и удельной массы микробаллонов  $\rho_{mb}$  на ширину зоны реакции должно быть весьма значительным.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что ценосферы, выделенные из угольной золы, могут быть использованы в качестве сенсibilизатора в составе эмульсионных ВВ. Максимальная скорость детонации достигается при использовании узкой фракции ценосфер размером  $70 \div 100$  мкм с насыпной плотностью  $0.36$  г/см<sup>3</sup> при плотности ЭВВ  $1.18 \div 1.2$  г/см<sup>3</sup> и составляет  $5.5 \div 5.6$  км/с при диаметре заряда  $55$  мм. Необходимая объемная концентрация ценосфер составляет  $17 \div 20$  %, массовая —  $8 \div 10$  %. Критический диаметр ЭВВ на основе аммиачной селитры с ценосферами — около  $35 \div 40$  мм. Увеличение среднего размера ценосфер до  $200$  мкм приводит к уменьшению максимума скорости детонации на  $1 \div 1.3$  км/с. Применение зольного концентрата в состоянии поставки (несепарированные ценосферы) позволяет получить скорость детонации  $4.2$  км/с и критический диаметр до  $45$  мм.

Ценосферы в качестве сенсibilизатора для ЭВВ могут конкурировать с микробаллонами из стекла или газообразными включениями в практике взрывных работ, если диаметр заряда ЭВВ не менее  $40 \div 50$  мм. Но их конкурентоспособность по сравнению с другими сенсibilизаторами будет определяться их сто-

\* По-видимому, впервые идея, правильно объясняющая уменьшение скорости детонации при увеличении плотности для смесевых промышленных ВВ, была высказана в [15].



имостью. Применение ЭВВ на основе смеси аммиачной и натриевой (или кальциевой) селитры позволит получить меньшие значения критического диаметра и разработать ЭВВ, чувствительные к инициированию только капсулем-детонатором.

Авторы признательны А. С. Юношеву за помощь при подготовке экспериментов. Авторы благодарят также Московское представительство фирмы ЗМ за безвозмездную поставку микробаллонов из стекла.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Water-resistant** sensitizers for blasting agents / R. S. Egly, A. E. Neckar. US Pat. N 31, 615, 51. 1964.
2. **Hattori K., Fukatsu Y., Sakai H.** Effect of the size of glass microballoons on the detonation velocity of emulsion explosives // J. Ind. Explos. Soc. Japan. 1982. V. 43. P. 295–309.
3. **Yoshida H., Iida M., Tanaka K., et al.** Detonation behavior of emulsion explosives containing glass microballoons // Proc. 8th Intern. Symp. on Detonation, 1985. P. 171–177.
4. **Lee J., Sandstrom F. W., Craig B. G., Persson P.-A.** Detonation and shock initiation properties of emulsion explosives // Proc. 9th Intern. Symp. on Detonation, 1989. P. 263–271.
5. **Cooper J., Leiper G.** Void size dependence of the steady detonation properties of emulsion explosives // J. Energetic Materials. 1989. V. 7. P. 405–417.
6. **Lee J., Person P.-A.** Detonation behavior of emulsion explosive // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1990. V. 15. P. 208–216.
7. **Chaudhri M. M., Almgren L.-A., Persson A.** Detonation behavior of a water-in-oil type emulsion explosive containing glass microballoons of selected sizes // Proc. 10th Intern. Symp. on Detonation, 1993.
8. **Holcomb B.** The role of glass bubble in emulsion explosives // Proc. China Soc. of Engineering Blasting Conf., 1997.
9. **Hirosaki Y., Murata K., Kato Y., Itoh S.** Detonation characteristics of emulsion explosive as function of void size and volume // Proc. 12th Intern. Symp. on Detonation, 2002. P. 263–271.
10. **Соснин В. А., Колганов Е. В.** Исследование процесса детонации в эмульсионных промышленных взрывчатых веществах // Труды междунар. конф. «V Харитоновские тематические научные чтения», 17–21 марта 2003. Саратов: ВНИИЭФ, 2003. С. 288–297.
11. **Шведов К. К., Лавров В. В.** Параметры детонации эмульсионных ВВ // Проблемы взрывного дела: Сб. статей и докладов. М.: Изд-во МГГУ, 2002. № 1. С. 90–99.
12. **Верецагина Т. А., Аншиц Н. Н. и др.** Получение ценосфер из энергетических зол стабилизированного состава и их свойства // Химия в интересах устойчивого развития. 2001. Т. 9. С. 379–391.
13. **Cooper J., Leiper G. A., Neilson G. W.** Molecular and microscopic structural effects in the detonation of fluid explosives // Proc. 12th Intern. Symp. on Detonation, 2002.
14. **Eyring H., Powell R. E., Duffey G. H., Parlin R. B.** The stability of detonation // Chem. Rev. 1949. V. 45. P. 69.
15. **Дремин А. Н., Шведов К. К., Кривченко А. Л. и др.** Исследование детонации промышленных ВВ. Детонационные характеристики амонита 6ЖВ // Физ.-техн. проблемы разработки полез. ископаемых. 1971. № 1. С. 46–51.

*Поступила в редакцию 28/XII 2004 г.*