

УДК 534.222.2

# ДЕТОНАЦИОННОЕ ДАВЛЕНИЕ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА, СЕНСИБИЛИЗИРОВАННОГО ПОЛИМЕРНЫМИ МИКРОБАЛЛОНАМИ

А. С. Юношев<sup>1,2</sup>, С. А. Бордзиловский<sup>1</sup>, М. С. Воронин<sup>1,3</sup>,  
С. М. Караханов<sup>1</sup>, С. Н. Макаров<sup>4</sup>, А. В. Пластинин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, yunoshev@hydro.nsc.ru

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск

<sup>4</sup>Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630059 Новосибирск

Детонационное давление эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного полимерными микробаллонами, определено в двух схемах — при нормальном падении детонационной волны на преграду и при скользящей детонации. Начальная плотность взрывчатого вещества варьировалась от 0.2 до 1.2 г/см<sup>3</sup>. Полученные значения давления хорошо согласуются с расчетами, известными из литературы, и сопоставлены со значениями детонационного давления эмульсионного взрывчатого вещества со стеклянными микробаллонами в качестве сенсibilизатора. Выполнены оценки времени реакции и показателя изоэнтропии использованного эмульсионного взрывчатого вещества.

Ключевые слова: эмульсионное взрывчатое вещество, низкоплотное взрывчатое вещество, детонационное давление, скользящая детонация.

DOI 10.15372/FGV20190408

## ВВЕДЕНИЕ

Эмульсионные взрывчатые вещества широко используются в горном деле. Поэтому вопросы, связанные с технологией их изготовления и применения, достаточно детально разработаны [1, 2]. Предприняты значительные усилия для изучения детонационных характеристик эмульсионных взрывчатых веществ (ЭмВВ). Так, например, исследовалось влияние различных сенсibilизаторов на детонационные характеристики ЭмВВ. В качестве сенсibilизаторов в таких исследованиях чаще всего использовались стеклянные микробаллоны [3–6], но применялись также и зольные цеолиты [7], гидриды металлов [8], газогенерирующая добавка [9] и полимерные микробаллоны [10–12].

Использование порообразующих сенсibilизаторов приводит к уменьшению плотности ЭмВВ по сравнению с эмульсионной матрицей, на основе которой создано ЭмВВ. Таким образом, варьируя количество сенсibilизатора можно в широком диапазоне изменять плот-

ность ЭмВВ. Скорость детонации ЭмВВ при постоянном диаметре заряда сначала растет с ростом плотности ЭмВВ, достигает максимума, а затем уменьшается. При этом критический диаметр увеличивается с ростом плотности. Это характеризует ЭмВВ как ВВ второго типа по классификации [13].

Предметом исследований становились различные характеристики ЭмВВ. В работах [3–6] измерялась зависимость скорости детонации различных составов от начальной плотности ЭмВВ и диаметра заряда. В работах [11, 14] с помощью ряда методик определялось давление детонации ЭмВВ. Изучалась также металлотвердость ЭмВВ [15–17]. Для некоторых взрывчатых композиций измерялась температура детонационного фронта, в том числе при добавлении в ЭмВВ алюминиевого порошка [18, 19].

Полимерные микробаллоны особенно интересны в качестве сенсibilизатора. Это связано с их очень низкой плотностью ( $\approx 0.02$  г/см<sup>3</sup>), в связи с чем их добавление в ЭмВВ практически не меняет состава взрывчатой композиции, а влияет только на пористость. В то же время, в отличие от

газовых пузырей, полимерные микробаллоны создают постоянную пористость с известными и неизменными по размеру порами. В работе [20] показано, что использование полимерных микробаллонов позволяет наиболее полно реализовать энергетический потенциал эмульсионной матрицы.

Несмотря на то, что общие закономерности детонационного поведения ЭМВВ известны, до сих пор практически отсутствуют работы, в которых проводился бы анализ детонационного превращения ЭМВВ с построением моделей кинетики. Огромный массив экспериментальных данных по детонации ЭМВВ, который доступен на данный момент, получен зачастую для ЭМВВ с разными составами, с различными сенсibilизаторами и с различной начальной плотностью. Это осложняет попытки построить самосогласованную, даже феноменологическую, модель детонации ЭМВВ.

В данной работе проведена регистрация профилей давления ЭМВВ в широком диапазоне начальных плотностей для определения детонационного давления и времени реакции. При этом состав эмульсии взят аналогичным применявшемуся ранее, для которого уже измерены скорость детонации [12], температура детонации [21] и метательная способность [15]. В качестве сенсibilизатора использовались легкие полимерные микробаллоны. Эти исследования позволят расширить набор экспериментальных данных для конкретного состава и приблизиться к полному описанию процесса детонации ЭМВВ.

### СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Основой взрывной композиции была эмульсионная матрица, состоящая из водного раствора аммиачной и натриевой селитры, индустриального масла и эмульгатора. Плотность чистой эмульсии  $1.41 \text{ г/см}^3$ . В качестве сенсibilизатора использовались полимерные микросферы Exrapcel плотностью  $0.023 \text{ г/см}^3$ . Плотность ЭМВВ варьировали изменением массового содержания микробаллонов. Более подробно технология изготовления взрывчатых композиций описана в [12, 22]. Плотность исследуемых ЭМВВ изменялась в диапазоне  $0.2 \div 1.2 \text{ г/см}^3$ . Детонационное давление измерялось в двух схемах.

В первой схеме детонационная волна (ДВ) падает по нормали на преграду, находящуюся

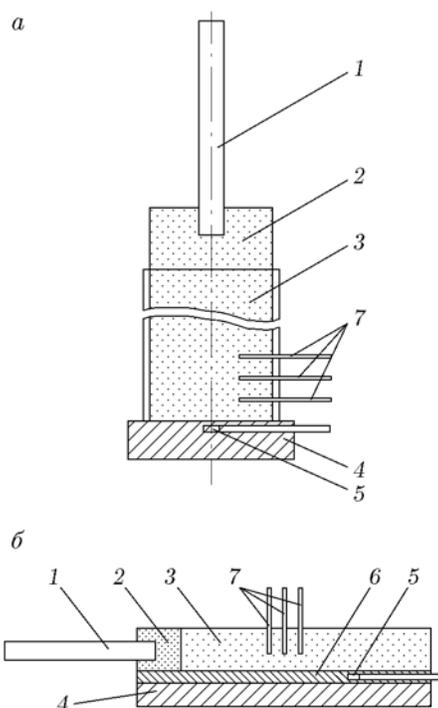


Рис. 1. Схема эксперимента:

*а* — нормальное падение ДВ на преграду, *б* — скользящая детонация; 1 — детонатор, 2 — генератор плоской ДВ, 3 — заряд ЭМВВ, 4 — преграда, 5 — манганиновый датчик, 6 — изоляция, 7 — контактные датчики

в контакте с ЭМВВ (рис. 1, *а*). Диаметр зарядов составлял 57 мм, а длина 120 мм. Заряды находились в трубе из ПВХ с толщиной стенки 3 мм. Иницирование проводилось ударом дюралевой пластинки толщиной 0.8 мм, метаемой с поверхности многоточечной иницирующей системы со скоростью 1.8 мм/мкс. Разновременность удара пластинки по заряду составляла 0.1 мкс при диаметре заряда 40 мм.

Манганиновый датчик давления располагался в преграде на глубине  $0.5 \div 0.6 \text{ мм}$  от границы ЭМВВ/преграда. При использовании в качестве преграды ПТФЭ датчик прикрывался пленкой из ПТФЭ. В ряде экспериментов преграда была выполнена из ПММА. В этом случае датчик прикрывался слоем эпоксидной смолы.

В зависимости от давления детонации (плотности ЭМВВ) использовались или самодельные датчики давления из расплющенной проволоки ПЭММ-0.1, или вытравленные из фольги манганиновые датчики Dynasen решетчатого типа Mn8-50-ЕК или Mn4-50-ЕК. В слу-

чае проволочных датчиков для расчета давления использовалась калибровка [23]. Для датчиков Dynasen применялась калибровка в соответствии с инструкцией к ним и в целом мало отличающаяся от калибровок [23] или [24].

В описанном выше варианте при взаимодействии ДВ с преградой в продукты детонации идет отраженная волна: либо ударная, либо волна разрежения. Чтобы уменьшить влияние отраженной волны на зону реакции, для ЭмВВ каждой начальной плотности необходимо подбирать такую преграду, чтобы амплитуда отраженной волны была минимальной. Для ЭмВВ начальной плотности  $1.0 \div 1.2 \text{ г/см}^3$  хорошей преградой является ПММА. Для ЭмВВ меньшей плотности в продукты детонации идет отраженная ударная волна. Подобрать материал преграды со значительно меньшим ударно-волновым импедансом, чем у ПММА, трудно, что является недостатком этой схемы.

Во второй схеме, показанной на рис. 1, б, ДВ двигалась вдоль преграды. В этой схеме в продукты детонации всегда идет волна разрежения (рис. 2), причем интенсивность этой волны тем меньше, чем больше ударно-волновой импеданс материала преграды. Поэтому эта схема больше подходит для измерения детонационного давления в низкоплотных ЭмВВ.

Манганиновый датчик располагался на границе ЭмВВ/преграда в пакете из фторопласта общей толщиной 0.5 мм таким об-

разом, чтобы чувствительный элемент был параллелен детонационному фронту. В этой схеме использовались также либо проволочные манганиновые датчики давления, либо низкоомные манганиновые датчики Dynasen Mn10-050-EPТFE. Поскольку ширина чувствительного элемента манганинового датчика Dynasen составляет 2 мм, в некоторых экспериментах для улучшения временного разрешения этот элемент обрезался так, чтобы его ширина оставалась равной  $0.5 \div 0.7 \text{ мм}$ . Во всех экспериментах, как в первом, так и во втором варианте, скорость детонации измерялась с помощью контактных датчиков.

### ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Алгоритм оценки давления Чепмена — Жуге и времени реакции был следующим. Прежде всего следовало определить на профиле давления положение точки, соответствующей точке Чепмена — Жуге. Выбор этой точки неоднозначен и часто бывает предметом дискуссий [14, 25]. В данной работе положение точки Чепмена — Жуге выделялось следующим образом. В обеих схемах на профиле давления проводилась прямая линия, касательная к части профиля, соответствующей давлению в волне разгрузки. За точку, соответствующую давлению Чепмена — Жуге, выбиралось то место, где значение давления на профиле становилось больше значений на касательной (на рис. 3–5 эта область выделена маркером).

При нормальном падении ДВ давление, регистрируемое в зоне реакции, плавно сопрягалось с давлением в волне разрежения, в то же время на профиле давления, зарегистрированном при скользящей детонации, в месте сопряжения наблюдался четкий излом, в результате определение точки Чепмена — Жуге значительно облегчалось.

Время на профиле, соответствующее точке Чепмена — Жуге, обозначим  $t_{чж}$ . Время реакции  $\tau$ , измеренное при нормальном падении ДВ, определялось как  $t_{чж}$ , поскольку в этой постановке датчик движется вместе со средой. При скользящей детонации для определения времени реакции  $\tau$  выполнялась следующая процедура. Поскольку ширина чувствительного элемента датчика  $h$  вдоль направления детонации достаточно велика, длительность измеренного «химпика» увеличивается на время, равное времени прохождения ДВ по

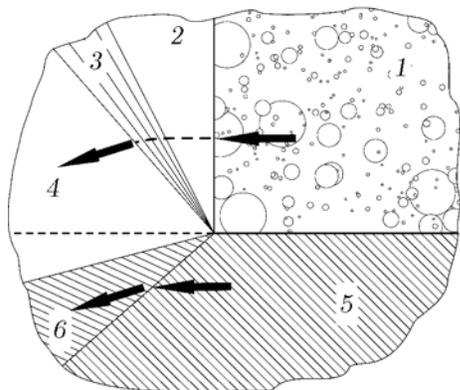


Рис. 2. Схема скользящей детонации:

1 — ЭмВВ, 2 — область Чепмена — Жуге, 3 — волна Прандтля — Майера, 4 — продукты детонации, 5 — преграда (сталь, ПТФЭ или свинец), 6 — материал преграды после прохождения ударной волны

датчику  $h/D$ , где  $D$  — скорость ДВ. Ширина зоны реакции  $a_r$  в этом случае определяется как  $a_r = D(t_{\text{ЧЖ}} - h/D)$ . С другой стороны, ширина зоны реакции равна  $a_r = \tau(D - \langle u_r \rangle)$ , где  $\langle u_r \rangle$  — среднее значение скорости вещества внутри зоны реакции. Согласно [26] значение  $\langle u_r \rangle$  можно оценить как  $\langle u_r \rangle = 1.25U_{\text{ЧЖ}} = 1.25D/(n + 1)$ , где  $U_{\text{ЧЖ}}$  — скорость продуктов детонации в точке Чепмена — Жуге,  $n$  — показатель изоэнтропии продуктов детонации. Таким образом, для второй постановки время реакции  $\tau$  можно рассчитать по формуле

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{a_r}{D - \langle u_r \rangle} = \frac{D(t_{\text{ЧЖ}} - h/D)}{D - \langle u_r \rangle} = \\ &= \frac{t_{\text{ЧЖ}} - h/D}{1 - 1.25/(n + 1)} = \frac{(t_{\text{ЧЖ}} - h/D)(n + 1)}{n - 0.25}. \end{aligned}$$

Значение давления Чепмена — Жуге в продуктах детонации (ПД) рассчитывалось из давления, измеренного в преграде, по методике, например, из работы [27]. Продукты детонации рассматривались как идеальный газ. При нормальном падении ДВ для расчета использовался метод ударно-волновых импедансов. Точка Чепмена — Жуге находится на детонационном луче ЭМВВ, который в плоскости давление/массовая скорость описывается уравнением  $p = \rho_0 u D$  ( $\rho_0$  и  $D$  — известные измеренные величины). Точка на этом луче является точкой Чепмена — Жуге, если проведенная через нее отраженная ударная адиабата или изоэнтропа (в зависимости от ударно-волнового импеданса преграды) проходят через точку на ударной адиабате материала преграды с давлением, соответствующим времени  $t_{\text{ЧЖ}}$  на измеренном профиле давления. При скользящей детонации, пренебрегая шириной зоны реакции, схему течения ПД можно представить следующим образом (см. рис. 2). В системе отсчета, связанной с фронтом ДВ, детонационный фронт касается материала преграды под прямым углом. За фронтом находится газ в состоянии Чепмена — Жуге, вытекающий из фронта со скоростью  $D - D/(n + 1)$ , где  $n$  — показатель изоэнтропии ПД. Из точки касания в преграду идет косая ударная волна, что вызывает изгиб поверхности преграды на некоторый угол. Таким образом, получается, что ПД обтекают угол, т. е. в них реализуется течение Прандтля — Майера. Данное предположение справедливо, если скорость ДВ больше

скорости звука в материале преграды. Поэтому в схеме со скользящей детонацией для низкоплотных ЭМВВ в качестве преграды использовался фторопласт или свинец — материалы с низкой скоростью звука. При оценке параметров Чепмена — Жуге проводился поиск такого состояния в ПД, чтобы угол разворота ПД в волне Прандтля — Майера был равен углу разворота материала преграды в косой ударной волне, а также выполнялось равенство давления в обеих средах на границе контакта. При этом давление на границе преграда/ПД определялось из экспериментального профиля в момент времени  $t_{\text{ЧЖ}}$ .

В обоих способах расчета давления в ПД в качестве подбираемых параметров использовалось давление и показатель изоэнтропии ПД. После удовлетворения указанным выше условиям остальные параметры детонации можно рассчитать по известным формулам.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3,а показан ряд профилей давления, зарегистрированных при нормальном падении ДВ. Наблюдается значительный разброс экспериментальных данных, вызванный, очевидно, неконтролируемой неоднородностью ЭМВВ, связанной со случайным распределением воздушных пузырьков, попадающих в ВВ при его изготовлении, а также с формированием заряда в оболочке. Если осреднить профили, зарегистрированные в нескольких экспериментах, то в результате получается гладкий профиль без каких-либо явно выраженных особенностей (рис. 3,б, кривая 1).

На этом же рис. 3,б приведен профиль давления для такого же состава ЭМВВ ( $1.0 \text{ г/см}^3$ ) при скользящей детонации, когда в качестве преграды использовалась стальная пластина толщиной 5 мм, а толщина слоя ЭМВВ составляла 13 мм. Обратим внимание на то, что длительность переднего фронта при скользящей детонации составляет около 0.1 мкс, что почти в 2.5 раза больше, чем при нормальном падении. Это вызвано конечным временем прохождения фронта ДВ по ширине датчика. В данной схеме наблюдается излом на профиле в момент времени  $\approx 0.4$  мкс, который выражен более четко, чем при нормальном падении ДВ. Значения моментов времени, с которыми соотносено давление Чепмена — Жуге, в обоих

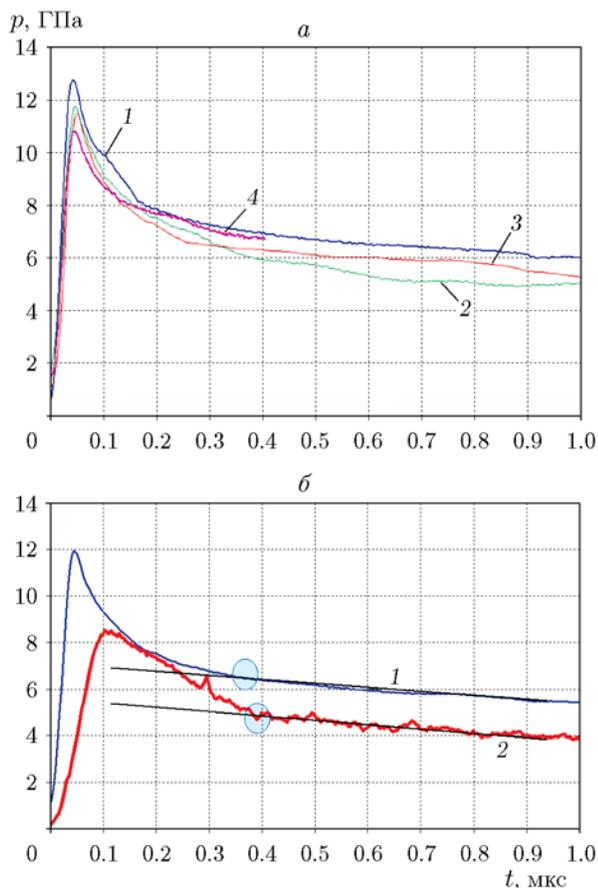


Рис. 3. Профили давления в преграде для ЭМВВ плотностью  $1.0 \text{ г/см}^3$  ( $D = 4.92 \pm 0.05 \text{ км/с}$ ):

*a*: нормальное падение ДВ, преграда из ПММА, 1, 3 — стальная оболочка, 2, 4 — оболочка ПВХ;  
*б*: 1 — нормальное падение ДВ, осредненный профиль, преграда из ПММА, 2 — скользящая детонация, преграда из стали

случаях практически совпадают и составляют  $\approx 0.38 \div 0.4 \text{ мкс}$ .

Аналогичные профили получены и для ЭМВВ с другой плотностью (рис. 4, 5). На рис. 4 показаны профили давления при плотности ЭМВВ  $1.2 \text{ г/см}^3$ . Так же, как и при плотности ЭМВВ  $1.0 \text{ г/см}^3$  (см. рис. 3), при скользящей детонации (см. рис. 4, б) излом в точке Чепмена — Жуге выделяется лучше, чем при нормальном падении ДВ (см. рис. 4, а).

Влияние ширины датчика на форму регистрируемого профиля давления в схеме со скользящей детонацией отчетливо видно на рис. 5. При увеличении ширины датчика увеличиваются как время нарастания давления,

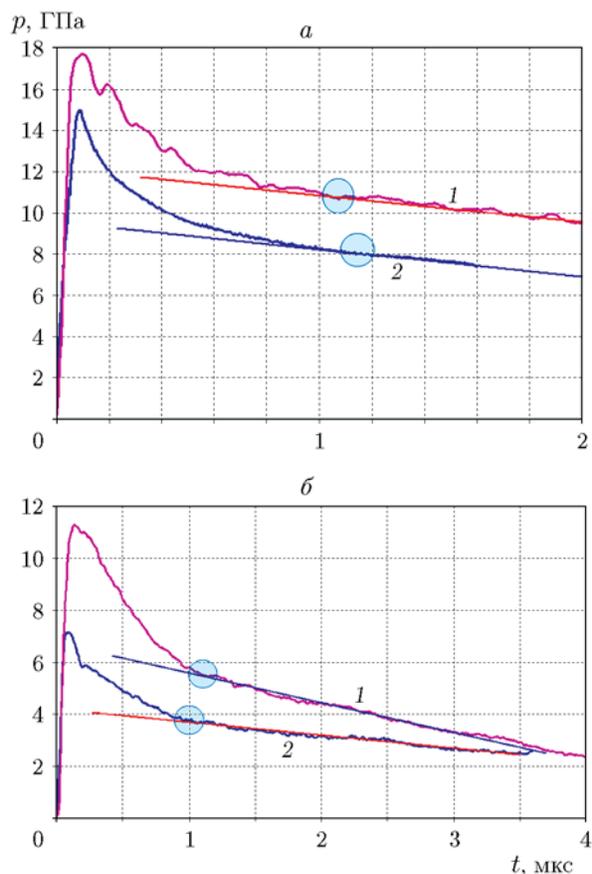


Рис. 4. Профили давления в преграде для ЭМВВ плотностью  $1.2 \text{ г/см}^3$ :

*a*: нормальное падение ДВ ( $D = 5.9 \pm 0.05 \text{ км/с}$ ), 1 — преграда из ПТФЭ, 2 — из ПММА; *б*: скользящая детонация ( $D = 5.4 \pm 0.05 \text{ км/с}$ ), 1 — преграда из свинца, 2 — из ПТФЭ, ширина датчиков  $0.3 \text{ мм}$

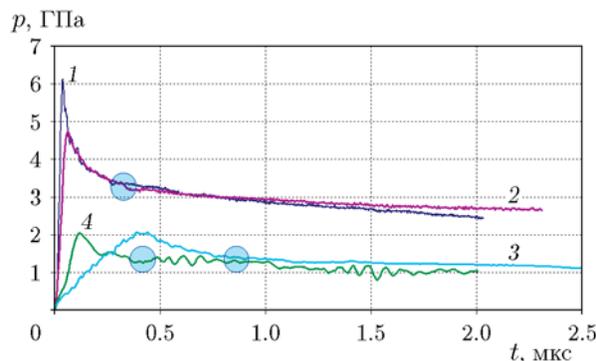


Рис. 5. Профили давления в преграде при плотности ЭМВВ  $0.63 \text{ г/см}^3$  ( $D = 3.65 \pm 0.05 \text{ км/с}$ ):

1, 2 — нормальное падение ДВ, преграда из ПММА, 3, 4 — скользящая детонация, преграда из ПТФЭ, датчики шириной 2 и  $0.5 \text{ мм}$  соответственно

так и длительность области повышенного давления (химпика).

Интересным оказался результат, полученный для ЭМВВ плотностью  $0.2 \text{ г/см}^3$  (рис. 6). На профиле давления, полученном в первой схеме, присутствует четкий пик длительностью  $0.3 \div 0.5 \text{ мкс}$  с амплитудой, более чем в 1.5 раза превышающей последующий, почти постоянный уровень давления. Если предположить, что время реакции на этом профиле меньше  $1.0 \text{ мкс}$ , то формальный расчет показателя энтропии ПД при попытке пересчета давления в преграде в давление ПД дает значение меньше единицы, что не имеет физического смысла. При регистрации профиля давления для этого ЭМВВ по второй схеме использовалась преграда из свинца. При этом область высокого давления, которую можно было бы соотнести с зоной химической реакции в рамках модели детонации Зельдовича — Неймана — Дёринга, вообще отсутствует. Профиль давления имеет быстро меняющийся характер, плавно понижающийся от максимального значения  $0.35 \div 0.4 \text{ ГПа}$ . Это может быть вызвано, например, сменой механизма детонации. То есть детонационный процесс, возможно, ведет не ударная волна. Также возможно, что узкий «химпик» не виден из-за низкого временного разрешения манганинового датчика во второй постановке. При ширине датчика  $0.7 \text{ мм}$  и скорости детонации  $2 \text{ мм/мкс}$  время нарастания давления на измеренном профиле не может

быть меньше  $0.35 \text{ мкс}$ . На наш взгляд, более вероятно первая причина, которая подтверждается выводами работы [12], в которой предполагается возможность смены режима детонации низкоплотного ЭМВВ. В схеме нормального падения ДВ появление «химпика» обусловлено, на наш взгляд, очень жесткой (для данной плотности ЭМВВ) преградой, являющейся причиной появления сильной отраженной ударной волны, искажающей профиль давления.

Зависимость давления Чепмена — Жуге от начальной плотности ЭМВВ приведена на рис. 7. Сопоставление результатов измерения детонационного давления для полимерных и стеклянных микробаллонов показывает, что в случае использования полимерных микробаллонов давление заметно выше, чем при использовании стеклянных, во всем диапазоне исследованных плотностей. Это различие связано с тем, что полимерные микробаллоны представляют собой практически идеальные (без инертной оболочки) микропоры. Поэтому при одной и той же плотности ЭМВВ в случае полимерного сенсibilизатора массовая доля реагирующего вещества — эмульсии — больше.

Зависимость находится в хорошем согласии с теоретическими расчетами [28] и нашими расчетными данными, полученными при подборе параметров уравнения состояния ПД в виде JWL, описывающих метательную способность ЭМВВ [15]. Заметное отличие экспериментальных данных от расчета наблюдает-

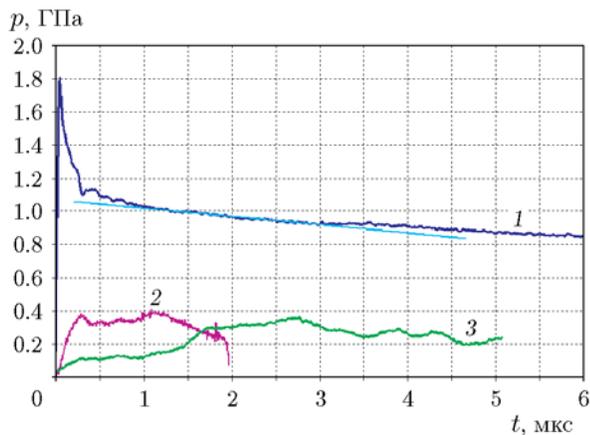


Рис. 6. Профили давления в преграде при плотности ЭМВВ  $0.2 \text{ г/см}^3$  ( $D = 2.1 \pm 0.05 \text{ км/с}$ ):

1 — нормальное падение ДВ, преграда из ПММА, 2, 3 — скользящая детонация, преграда из свинца, ширина датчиков  $0.7$  и  $2 \text{ мм}$  соответственно

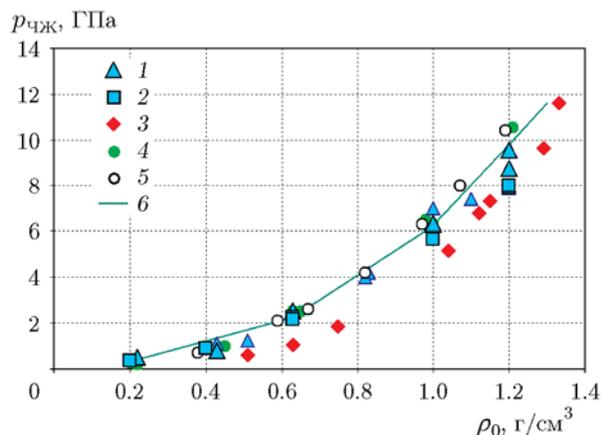


Рис. 7. Зависимость давления Чепмена — Жуге от начальной плотности ЭМВВ:

1 — нормальное падение ДВ, 2 — скользящая детонация, 3 — сенсibilизатор стеклянные микробаллоны МС-В [14], 4 — расчет [15], 5 — расчет [28], 6 — идеальное давление  $p_{id}$

ся только при плотности ЭмВВ  $1.2 \text{ г/см}^3$  в схеме скользящей детонации. Однако это вызвано недостаточной толщиной (10 мм) слоя ЭмВВ в этом конкретном эксперименте, что привело к несколько заниженной скорости детонации  $5.4 \text{ мм/мкс}$  по сравнению с идеальной  $6.0 \text{ мм/мкс}$ .

На рис. 8 приведена зависимость времени реакции ЭмВВ от начальной плотности ВВ при использовании в качестве сенсibilизатора стеклянных (марка МС-В) и полимерных (Ехрарсел) микробаллонов. В диапазоне плотностей  $0.4 \div 1.1 \text{ г/см}^3$  время реакции для обоих типов микробаллонов остается практически постоянным (см. рис. 8). В то же время как при нормальном падении ДВ, так и при скользящей детонации оно заметно меньше, когда используются полимерные микробаллоны, чем когда применяются стеклянные. Возможная причина этого заключается в отсутствии инертной стеклянной массы, на прогрев и ускорение которой тратится часть энергии, запасенной в эмульсии. Кроме этого, такой результат может быть связан с разным средним размером стеклянных (60 мкм) и полимерных (40 мкм) микробаллонов.

Большее время реакции ЭмВВ с полимерными микробаллонами, чем со стеклянными, при плотности ЭмВВ  $1.2 \text{ г/см}^3$  вызвано, возможно, разными методами определения точки Чепмена — Жуге на зарегистрированном про-

филе. В работе [14] это пересечение касательных, одна из которых проведена к участку профиля, соответствующему предполагаемой зоне реакции, а вторая — к участку, соответствующему волне разрежения. Вероятно, время реакции в работе [14] несколько занижено по сравнению с данными настоящей работы. Понятно, что при большой плотности ЭмВВ массовое содержание стекла в нем мало и значительной разницы во времени реакции не должно быть, если не учитывать влияние разного количества стеклянных и полимерных микробаллонов при одинаковой плотности ЭмВВ, что определяет количество горячих точек. Это обстоятельство лишней раз подчеркивает сложность и неоднозначность определения точки Чепмена — Жуге даже в работах одних и тех же авторов.

Зависимость показателя изоэнтропы ПД от плотности ЭмВВ представлена на рис. 9. Видно, что значение показателя изоэнтропы для полимерных микробаллонов ожидаемо падает с уменьшением плотности. Ошибка определения показателя велика и составляет до 25 %, что вызвано погрешностями в определении  $D$  и  $p_{\text{ЧЖ}}$ . С учетом погрешности полученные значения показателя изоэнтропы близки к таковым, определенным из уравнения состояния JWL [15], а также к приведенным в [14] для ЭмВВ со стеклянными микробаллонами.

На примере настоящей работы видно, что сравнение значений времени реакции, полученных в разных исследованиях, иногда может

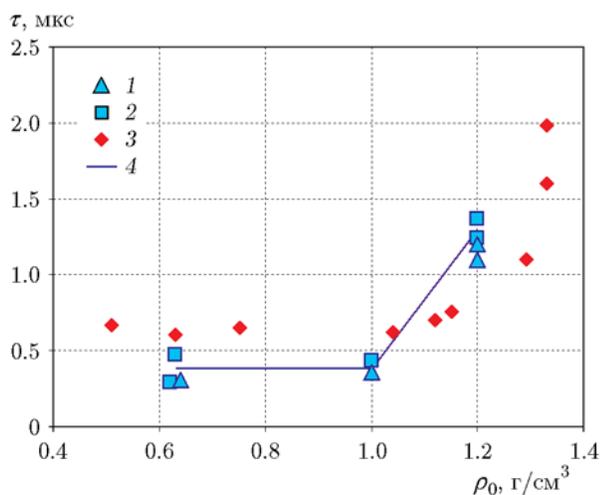


Рис. 8. Зависимость времени (лагранжева) реакции ЭмВВ от начальной плотности ВВ:

1 — нормальное падение ДВ, 2 — скользящая детонация, 3 — сенсibilизатор стеклянные микробаллоны МС-В [14], 4 — среднее значение  $\tau$

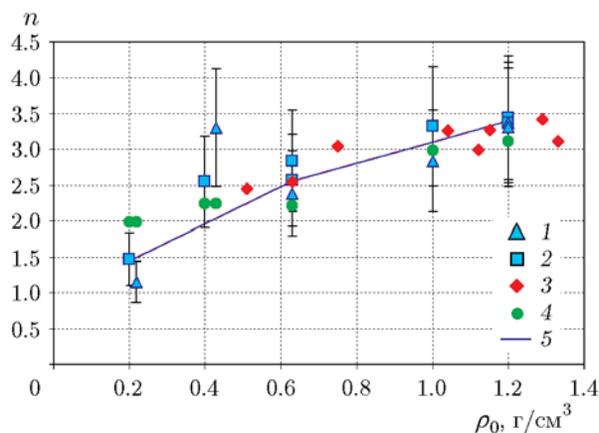


Рис. 9. Зависимость показателя изоэнтропы продуктов детонации от плотности ЭмВВ:

1 — нормальное падение ДВ, 2 — скользящая детонация, 3 — сенсibilизатор стеклянные микробаллоны МС-В [14], 4 — расчет [15], 5 — среднее значение показателя изоэнтропы  $n_{av}$

быть не совсем корректным, поскольку используются разные методы определения положения точки Чепмена — Жуге, а она, как правило, лежит на пологом участке профиля давления или массовой скорости.

Определение времени или ширины зоны реакции некоторые исследователи не считают нужным, поскольку точка Чепмена — Жуге жестко привязана к модели Зельдовича — Неймана — Дёринга. Некоторое варьирование положения этой точки несильно влияет на определяемое состояние ПД и детонационного давления, хотя время реакции при этом может меняться значительно. Однако в некоторых вопросах, например, связанных с кинетикой разложения ЭМВВ в детонационной волне, или в вопросах инициирования время реакции необходимо знать, и поэтому полезно иметь какие-нибудь ориентиры. Хотя в масштабных задачах или приложениях, где размером ширины зоны реакции можно пренебречь, а важно, например, только интегральное воздействие ПД на какой-либо объект, время реакции, конечно, несущественно.

В заключение приведем обобщающую таблицу, в которой представлены детонационные характеристики исследованных составов ЭМВВ. Поскольку в экспериментах наблюдался разброс измеренных значений давления, а скорость детонации иногда была меньше идеальной, приведенной в [12] для аналогичного состава ЭМВВ, для согласованности данных в таблице процедура их получения была следующей. Идеальная скорость детонации ( $D_{id}$ ), соответствующая заданной начальной плотности ЭМВВ, определялась по данным [12], значение показателя изоэнтропии ( $n_{av}$ ) получено в настоящей работе и осреднено по обеим схемам нагружения, давление Чепмена — Жуге, соответствующее идеальной скорости детонации, рассчитано по формуле  $p_{id} = \rho_0 D_{id}^2 / (n_{av} + 1)$ . Время  $\tau$  и ширина зоны реакции  $a_r$ , полученные в настоящей работе, приведены также после осреднения по схемам нагружения.

$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$D_{id}$ , км/с	$n_{av}$	$p_{id}$ , ГПа	$\tau$ , мкс	$a_r$ , мм
0.20	2.10	1.45	0.36	—	—
0.63	3.57	2.56	2.26	0.38	0.88
1.00	5.07	3.10	6.27	0.38	1.34
1.20	5.99	3.40	9.79	1.30	5.57

## ВЫВОДЫ

Детонационное давление эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного полимерными микробаллонами, измерено в диапазоне начальной плотности  $0.2 \div 1.2$  г/см<sup>3</sup>. Измерения проведены по двум схемам: при нормальном падении детонационной волны на преграду и при скользящей детонации. Показано, что в случае скользящей детонации положение точки Чепмена — Жуге, соответствующее окончанию зоны химической реакции, выделяется лучше, чем при нормальном падении детонационной волны. Полученные значения давления хорошо согласуются с известными расчетами [28]. На основе проведенных измерений выполнены оценки времени реакции, значения которого лежат в интервале плотностей  $0.4 \div 1.3$  мкс и показателя изоэнтропии продуктов детонации. Проведено сопоставление этих величин при использовании полимерных или стеклянных микробаллонов. Показано, что время реакции заметно меньше, когда используются полимерные микробаллоны, чем когда применяются стеклянные.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Wang Xuguang. Emulsion Explosives. — Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.
2. Колганов Е. Б., Соснин В. А. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. — Дзержинск: ГосНИИ «Кристалл», 2009.
3. Yoshida H., Iida M., Tanaka K., Kusakabe M., Shiino K. Detonation behavior of emulsion explosives containing glass microballoons // Proc. 8th Int. Symp. on Detonation, Albuquerque, NM, 1985. — P. 171–177.
4. Cooper J., Leiper G. Void size dependence of the steady detonation properties of emulsion explosives // J. Energ. Mater. — 1989. — V. 7. — P. 405–417.
5. Lee J., Sandstrom F. W., Craig B. G., Persson P.-A. Detonation and shock initiation properties of emulsion explosives. // Proc. 9th Int. Symp. on Detonation, Portland, Oregon, 1989. — P. 263–271.
6. Сильвестров В. В., Пластинин А. В. Исследование низкоскоростных эмульсионных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 5. — С. 124–133.
7. Аншиц А. Г., Аншиц Н. Н., Дерibas А. А., Караханов С. М., Касаткина Н. С., Пластинин А. В., Решетняк А. Ю., Сильвестров В. В. Скорость детонации эмульсионных взрывчатых веществ с ценосферами // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 5. — С. 119–127.

8. **Чэн Я.-Ф., Ма Х.-Х., Шень Чж.-У.** Детонационные характеристики эмульсионных взрывчатых веществ, сенсibilизированных гидридом магния // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 5. — С. 120–125.
9. **Соснин В. А., Колганов Е. В.** Исследование процесса детонации в эмульсионных промышленных взрывчатых веществах // Хим. физика. — 2003. — Т. 22, № 8. — С. 100–107.
10. **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. // 2013 Joint APS-SCCM/AIRAPT Conf. J. Phys.: Conf. Ser. — 2014. — V. 500. — 052030. — DOI:10.1088/1742-6596/500/5/052030.
11. **Hirosaki Y., Murata K., Kato Y., Itoh S.** Detonation Characteristics of emulsion explosives as functions of void size and volume // Proc. 12th Int. Detonation Symp., San Diego, CA, 2002. — P. 263–270.
12. **Юношев А. С., Пластинин А. В., Рафeyчик С. И.** Скорость детонации эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного полимерными микробаллонами // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 6. — С. 132–137.
13. **Price D.** Contrasting patterns in the behavior of high explosives // Proc. 11th Symp. (Int.) on Combustion, 1966. — Pittsburgh: The Combustion Inst., 1967. — P. 693–702.
14. **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.
15. **Юношев А. С., Пластинин А. В., Рафeyчик С. И., Воронин М. С.** Метательная способность эмульсионного взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 4. — С. 123–129.
16. **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.
17. **Hakan Hanson.** Determination of properties for emulsion explosives using cylinder expansion tests and numerical simulation // Swebrec Rep. 2009:1. — Stockholm: Univ. of Technology, 2009.
18. **Сильвестров В. В., Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Пластинин А. В.** Температура детонационного фронта эмульсионного взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 135–142.
19. **Lefrancois A., Grouffal J.-V., Bouinot P., Mencacci S.** Temperature and pressure measurements comparison of the aluminized emulsion explosives detonation front and products expansion // Proc. 12th Int. Detonation Symp., San Diego, CA, 2002. — 2002. — P. 432–439.
20. **Юношев А. С., Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Рафeyчик С. И.** Влияние искусственных пор на параметры детонации эмульсионного взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 2. — С. 91–97.
21. **Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Пластинин А. В., Рафeyчик С. И., Юношев А. С.** Температура детонации эмульсионного взрывчатого вещества с полимерным сенсibilизатором // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 6. — С. 123–131.
22. **Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Юношев А. С.** Нагружение эмульсии ударом высокоскоростной пластины // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 114–118.
23. **Paul S. De Carli.** Manganin stress gage calibration to 125 GPa // Bull. Amer. Phys. Soc. — 1976. — V. 2, N 11. — 1286.
24. **Vantine H. C., Erickson L. M., Jansen J. A.** Hysteresis-corrected calibration of manganin under shock loading // J. Appl. Phys. — 1980. — V. 51, N 4. — P. 1957–1962.
25. **Лобойко Б. Г., Любятинский С. Н.** Зоны реакции детонирующих твердых взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 6. — С. 45–64.
26. **Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К.** Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.
27. **Селиванов В. В., Кобылкин И. Ф., Новиков С. А.** Взрывные технологии. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.
28. **Tanaka K.** Shock compression of solid with voids by gridless Lagrangian SPH // Shock Compression of Condensed Matter — 2005. — AIP Conf. Proc. — V. 1426. — Pt 2. — P. 1117–1120.

*Поступила в редакцию 18.01.2019.*

*После доработки 08.02.2019.*

*Принята к публикации 20.02.2019.*