

УДК 662.2-391.4:544.454.3

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА УДАРОМ ТОНКОЙ ПЛАСТИНКИ

А. С. Юношев^{1,2}, М. С. Воронин^{1,3}, А. В. Пластинин¹¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, yunoshev@hydro.nsc.ru²Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск³Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск

С помощью импульсной рентгенографии изучен процесс ударно-волнового инициирования эмульсионного взрывчатого вещества. Иницирование выполнялось ударом тонкой дюралевой пластинки под небольшим углом к плоской поверхности ВВ. Выполнена оценка параметров инициирующей ударной волны в исследуемом взрывчатом веществе и измерена глубина инициирования детонации.

Ключевые слова: детонация, инициирование, эмульсионное ВВ, импульсная рентгенография.

DOI 10.15372/FGV20220315

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процесса ударно-волнового инициирования взрывчатых веществ (ВВ) важно по многим причинам, например в связи с определением условий безопасного обращения с ВВ или в целях оптимизации способов возбуждения детонации. Основным классом промышленных ВВ на данный момент являются эмульсионные взрывчатые вещества (ЭмВВ). Однако научных работ, посвященных ударному или ударно-волновому инициированию этого класса ВВ, крайне мало. Например, в [1, 2] проведено исследование ударно-волнового инициирования различных ЭмВВ начальной плотностью 1.248 и $1.18 \div 1.33$ г/см³ соответственно, изготовленных на основе аммиачной селитры. В [3] проанализирован процесс возбуждения детонации в различных составах ЭмВВ при простреле их высокоскоростными компактными ударниками. В данной работе изучается инициирование детонации в ЭмВВ ударом тонкой дюралевой пластинки.

СОСТАВ ИССЛЕДУЕМОГО ЭмВВ

В основе исследуемого ЭмВВ лежит эмульсионная матрица, в составе которой присутствуют растворы аммиачной (68.25 %) и натриевой (10.55 %) селитр в воде (15.2 %), индустриальное масло И-20 (4 %) и эмульгатор

сорбитан моноолеат (2 %). Плотность эмульсии составляет 1.41 г/см³. В качестве сенсibilизатора использовались полимерные микробаллоны Expancel 461 DET 40 d25 среднего размера ≈ 60 мкм со средней плотностью отдельного микробаллона ≈ 0.024 г/см³. Плотность исследуемого ЭмВВ после добавления сенсibilизатора в эмульсию составляла 1.0 г/см³. Скорость детонации ЭмВВ данной плотности составляет 4.92 ± 0.05 мм/мкс [4].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схемы экспериментальной сборки до и в процессе эксперимента показаны на рис. 1. Тонкая дюралевая пластинка металась скользящей детонацией активного заряда ВВ на плоский пассивный заряд из исследуемого ВВ. Расположение зарядов было таким, чтобы удар пластинки по пассивному заряду происходил под небольшим углом, а скорость точки контакта метаемой пластинки и пассивного заряда превышала скорость детонации пассивного заряда. В результате удара в пассивный заряд распространялась ударная волна, в некоторых экспериментах переходящая в детонационную волну. При указанных выше условиях картина нагружения пассивного заряда, показанная на рис. 1,б, является стационарной. Процесс удара регистрировался с помощью импульсной рентгенографии. Для этого использовался рентгеновский аппарат «Арион-600» с време-

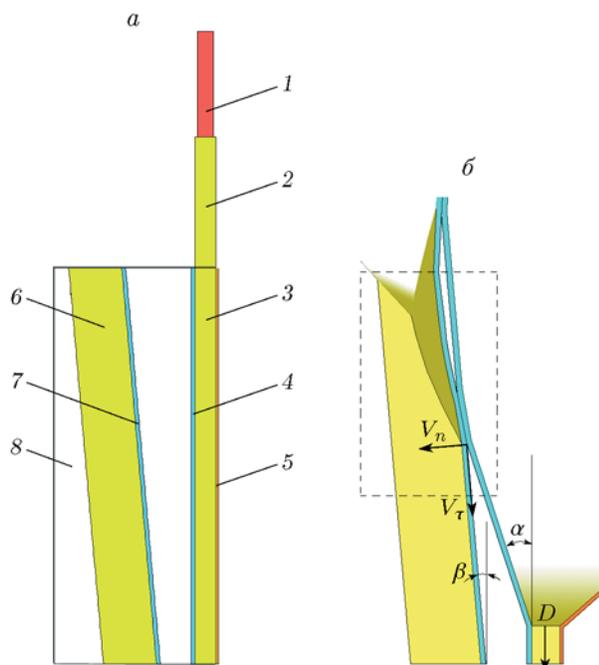


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки:

a — до эксперимента, вид сбоку: 1 — детонатор, 2 — генератор линейной детонационной волны, 3 — активный заряд ВВ, 4 — метаема дюралевая пластинка, 5 — медная фольга, 6 — пассивный заряд, 7 — дюралевая пластинка, 8 — монтажная пластинка из поликарбоната; *b* — в процессе эксперимента, штриховым контуром обозначена часть сборки, показанная на рентгенограммах

нем экспозиции 1.5 нс. Регистрация производилась на медицинскую рентгеновскую пленку Retina XBE, которая помещалась в кассету между двумя флуоресцентными экранами AGFA Structurix NDT-1200. Расстояние от аппаратов до заряда — 1 м, от заряда до кассеты с пленкой — 0.33 м. Сборка перед экспериментом располагалась так, чтобы на полученной рентгенограмме изображения пластин в окрестности точки касания имели минимальную толщину. В этом случае углы поворота пластин минимально искажены перспективой. На рентгенограмме фиксировались угол поворота метаемай пластинки α , угол поворота дюралевой пластинки, прикрывающей пассивный заряд, форма ударной волны, форма детонационной волны (в случае инициирования детонации).

В качестве активного заряда использовалось эмульсионное ВВ плотностью 0.5 г/см^3 со скоростью детонации $3.1 \pm 0.05 \text{ мм/мкс}$ [4]. Длина активного заряда составляла 160 мм, ширина 60 мм, толщина $6 \div 10 \text{ мм}$. Заряд ини-

цировался генератором линейной детонационной волны. С одной стороны к заряду прислонялась плоская дюралевая пластинка толщиной 1.5 мм, которую далее будем называть метаемай, с другой стороны — медная фольга толщиной 0.04 мм.

Толщина слоя исследуемого ВВ составляла около 20 мм. На поверхности пассивного заряда со стороны активного заряда находилась вторая дюралевая пластинка (7 на рис. 1, *a*) толщиной 1.5 мм. Эта пластинка выполняла несколько функций. Во-первых, она придавала поверхности пассивного заряда плоскую форму. Также она защищала пассивный заряд от потока сжатого воздуха, который выдавливается из объема между пластинками в процессе эксперимента и без второй дюралевой пластинки создает заметную волну сжатия в пассивном заряде перед точкой его контакта с метаемай пластинкой. Кроме того, при равной толщине дюралевых пластинок после их взаимодействия метаемай пластинка останавливалась, а вторая приобретала скорость метаемай (это касается только компонент скорости, нормальных к исходной поверхности пассивного заряда). Это обстоятельство упрощает анализ взаимодействия изучаемого ВВ и ударяющей пластинки, поскольку в этом случае ситуацию можно рассматривать как удар пластинки непосредственно по исследуемому ВВ. Приведенные рассуждения справедливы, если при взаимодействии дюралевых пластинок не происходит «сварки взрывом». В проведенных в данной работе экспериментах скорость точки контакта превышала 5.0 мм/мкс, что больше скорости, необходимой для сварки взрывом пары дюраль/дюраль. Кроме того, на всех рентгенограммах фиксируется разделение пластин после удара.

Указанные элементы экспериментальной сборки фиксировались с помощью клея между двумя плоскими параллельными пластинами из поликарбоната толщиной 5 мм.

Метаемай пластинка в процессе ускорения поворачивается на угол α относительно плоскости, в которой эта пластинка находилась вначале (см. рис. 1, *b*). Зависимость угла α от толщины активного заряда $H_{ВВ}$ была предварительно определена экспериментально методом импульсной рентгенографии (рис. 2), она удовлетворительно описывается зависимостью $\alpha = 6.88 + 1.31H_{ВВ}$, где угол определен в градусах, а $H_{ВВ}$ — в миллиметрах. При этом также

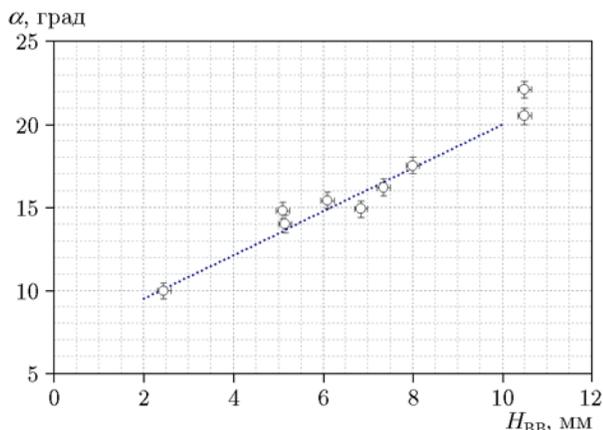


Рис. 2. Зависимость максимального угла поворота метаемой пластинки от толщины активного заряда H_{BB}

было определено расстояние, на котором метаемая пластинка набирает максимальную скорость.

Расстояние между зарядами и момент рентгенографирования выбирались так, чтобы в кадре был зафиксирован момент удара с участком метаемой пластинки, уже разогнавшимся до максимальной скорости.

Для анализа процесса соударения важна нормальная к поверхности пассивного заряда компонента скорости метаемой пластинки V_n , а также перпендикулярная ей скорость точки контакта метаемой пластинки и пассивного заряда V_τ (см. рис. 1, б). Легко показать, что при скорости детонации активного заряда D скорость точки контакта составляет

$$V_\tau = D \sin(\alpha) / \sin(\alpha - \beta).$$

Нормальная компонента скорости метаемой пластинки равна

$$V_n = V_\tau \operatorname{tg}(\alpha - \beta).$$

Изменяя ВВ активного заряда и его толщину, можно в широких пределах варьировать величины D , α и V_n . Изменяя β , также можно легко варьировать скорость точки контакта V_τ . В данной работе основным параметром, определяющим нормальную скорость падения метаемой пластинки, была толщина активного заряда H_{BB} . Необходимая скорость точки контакта достигалась выбором подходящей величины угла β .

На рис. 1, б штриховым контуром отмечена часть экспериментальной сборки, которая в

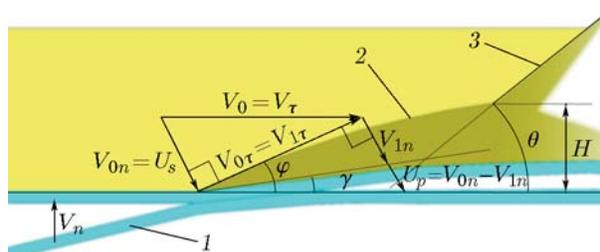


Рис. 3. Схема к расчету ударной адиабаты и скорости детонации ВВ:

1 — ударяющая пластинка, 2 — фронт ударной волны в исследуемом ВВ, 3 — фронт детонационной волны

процессе инициирования детонации фиксировалась на рентгенограммах. Более детально эта область показана на рис. 3.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ АДИАБАТЫ И СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ИССЛЕДУЕМОГО ВВ

По рентгенограмме процесса нагружения пассивного заряда, схематически изображенной на рис. 3, можно построить ударную адиабату исследуемого ЭмВВ и рассчитать скорость детонационной волны в случае ее инициирования. Для этого введем обозначения на рис. 3: φ — угол между исходной поверхностью пассивного заряда и начальным фронтом ударной волны; γ — угол, на который поворачивается поверхность пластинки, прикрывающей пассивный заряд, сразу за точкой контакта; θ — угол между исходной поверхностью пассивного заряда и фронтом детонационной волны. Из-за малой толщины метаемой пластинки параметры косой ударной волны непрерывно меняются с глубиной. По этой причине, а также из-за малого пространственного разрешения рентгенограмм определить углы φ и γ непосредственно вблизи точки контакта можно лишь с точностью $\pm 0.3^\circ$. Поскольку углы φ и γ невелики, это приводит к значительным погрешностям определяемых параметров ударных волн.

Перейдем в систему отсчета, связанную с точкой соударения. Волновая конфигурация в этой системе стационарна. Исходное ВВ втекает во фронт УВ со скоростью V_0 , а вытекает со скоростью V_1 . Очевидно, что $V_0 = V_\tau$. Из приведенной на рис. 3 геометрии с учетом того, что величины V_0 , φ , γ известны, можно выразить компоненты скоростей V_0 и V_1 : нор-

мальные к фронту ударной волны — V_{0n} , V_{1n} , направленные вдоль фронта ударной волны — $V_{0\tau}$, $V_{1\tau}$. Причем для косой ударной волны известно, что $V_{0\tau} = V_{1\tau}$. Нас интересуют только величины V_{0n} и $V_{0n} - V_{1n}$, поскольку в лабораторной системе отсчета они равны соответственно скорости ударной волны U_s в исследуемом ВВ и его массовой скорости за фронтом ударной волны U_p :

$$U_s = V_{0n} = V_\tau \sin(\varphi),$$

$$U_p = V_{0n} - V_{1n} = V_\tau \sin(\gamma) / \cos(\varphi - \gamma).$$

Для скорости детонации D исследуемого ВВ справедливо выражение (см. рис. 3) $D = V_\tau \sin(\theta)$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках изучения инициирования было проведено четыре эксперимента. Начальный угол между плоскостями дюралевых пластинок β в разных экспериментах варьировался в диапазоне $6.5 \div 12^\circ$. Другие параметры экспериментов приведены в табл. 1.

На рис. 4,а, соответствующем эксперименту 1 из табл. 1, зафиксирована косая ударная волна в пассивном заряде. После эксперимента дюралевая пластинка, прикрывавшая пассивный заряд, была найдена сильно деформированной, но целой. На ее поверхности сохранились остатки исследуемого ВВ, что подтверждает отсутствие инициирования детонации в этом эксперименте.

На рис. 4,б, соответствующем эксперименту 3 из табл. 1, зафиксирован быстрый переход ударной волны в детонационную. Переходный процесс распространяется на глубину около 3 мм. Далее фиксируется детонационная волна.

Таблица 1

Геометрические параметры соударения

№ п/п	$H_{ВВ}$, мм	α , град	β , град	V_τ , мм/мкс	V_n , мм/мкс
1	6.4 ± 0.1	15.6	7.6	5.99 ± 0.3	0.84 ± 0.03
2	7.4 ± 0.1	16.6	6.5	5.05 ± 0.2	0.90 ± 0.03
3	8.5 ± 0.1	18.03	10.6	7.27 ± 0.38	0.98 ± 0.03
4	7.3 ± 0.1	16.46	11.6	10.37 ± 0.84	0.88 ± 0.03

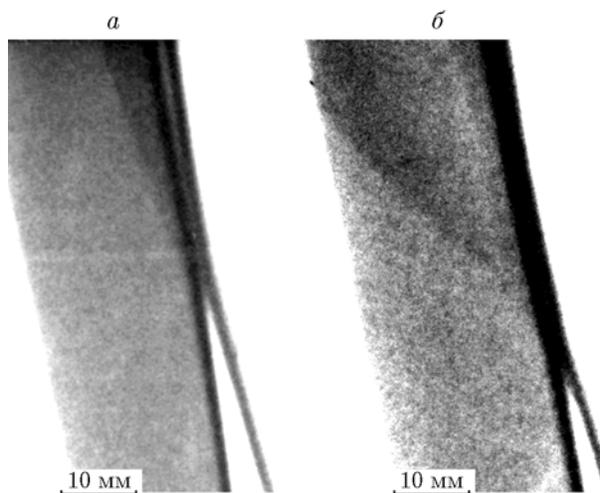


Рис. 4. Рентгенограммы, соответствующие экспериментам 1 (а) и 3 (б)

Процесс инициирования детонации в экспериментах 4 и 2 показан на рис. 5,а и 5,б соответственно. Нормальные скорости метаемой пластинки в этих экспериментах близки и равны ≈ 0.9 мм/мкс. Однако продольные скорости значительно отличаются. На рис. 5,а скорость точки контакта примерно 10.4 мм/мкс. Поэтому процесс ударно-волнового инициирования оказывается хорошо «развернутым по времени». На рис. 5,б расчетная скорость точки контакта равна 5.05 ± 0.2 мм/мкс. В действительности она оказалась меньше скорости детонации исследуемого ЭмВВ. Об этом свидетельствует тупой угол между фронтом детонацион-

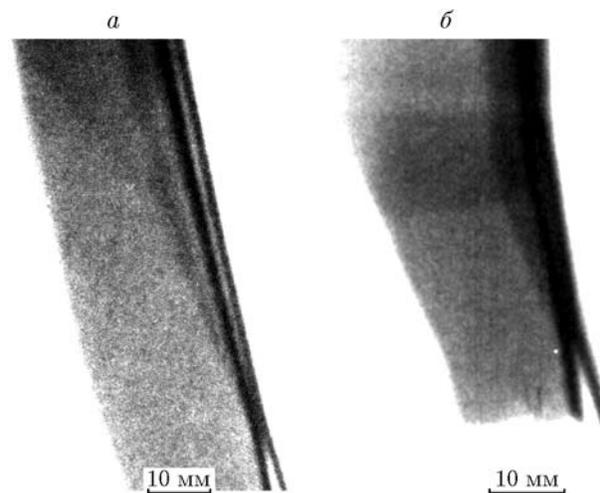


Рис. 5. Рентгенограммы, соответствующие экспериментам 4 (а) и 2 (б)

Таблица 2

Параметры нагружения и детонации исследуемого ВВ

№ п/п	U_p , мм/мкс	U_s , мм/мкс	D , мм/мкс	p , ГПа	ρ , г/см ³	ΔE , кДж/г	ΔT , К	H , мм
1	0.47 ± 0.07	1.60 ± 0.13	—	0.74 ± 0.24	1.41 ± 0.07	0.11 ± 0.03	49 ± 16	>20
2	0.48 ± 0.05	1.57 ± 0.10	—	0.73 ± 0.20	1.44 ± 0.08	0.11 ± 0.03	51 ± 14	$>5.2 \pm 0.2$
3	0.54 ± 0.07	1.94 ± 0.16	4.95 ± 0.29	1.03 ± 0.23	1.39 ± 0.06	0.15 ± 0.04	66 ± 19	3.4 ± 0.2
4	0.64 ± 0.14	2.16 ± 0.26	4.96 ± 0.45	1.37 ± 0.37	1.42 ± 0.08	0.20 ± 0.09	92 ± 45	5.3 ± 0.2

ной волны и поверхностью пассивного заряда. То есть детонационный процесс, возбужденный в пассивном заряде, догоняет точку контакта метаемой пластинки и пассивного заряда. Это означает, что зафиксированная на этой рентгенограмме картина не является стационарной и оцененная по ней глубина инициирования будет заниженной.

На полученных рентгенограммах можно непосредственно определить глубину инициирования H (в случае возбуждения детонации), как показано на рис. 3. Измеренные величины приведены в табл. 2. Также можно оценить энергию ударно-волнового инициирования исследуемого ВВ. Обозначим через V_n^* такое значение V_n , при котором в пассивном заряде инициируется процесс детонации. Предположим, что при этом кинетическая энергия движения метаемой пластинки в направлении пассивного заряда полностью поглощается исследуемым ВВ и идет на возбуждение детонационного процесса. Эта энергия в расчете на единицу поверхности метаемой пластинки может быть записана как

$$W = \rho_{Al} h V_n^{*2} / 2,$$

где ρ_{Al} — плотность метаемой пластинки, h — толщина метаемой пластинки. Учет малых углов α и β незначительно влияет на величину W . Если принять, что для инициирования детонации в ЭМВВ ударом дюралевой пластинки толщиной 1.5 мм необходимо придать ей нормальную скорость 0.88 мм/мкс (см. табл. 1), то рассчитанная таким образом энергия ударно-волнового инициирования детонации будет равна 1.57 Дж/мм².

На рис. 4 и 5 видно, что фронт косой ударной волны в пассивном заряде не плоский. На эту ударную волну влияет тыльная волна разгрузки со стороны метаемой пластинки. Кроме этого, исследуемое ВВ — материал, в котором за фронтом ударной волны возможно

энерговыведение за счет возникающих химических реакций. Эти процессы искривляют форму фронта, причем в разные стороны. Если энергии летящей пластинки недостаточно для инициирования детонации, фиксируется затухающая ударная волна с изгибом фронта, как на рис. 4,а. Если детонация возбуждается быстро, то фронт ударной волны изгибается в другую сторону и плавно сопрягается с фронтом детонационной волны, как на рис. 4,б. В промежуточном случае, как на рис. 5,а, возникшая ударная волна сначала затухает, но через некоторое время разгоняется и переходит в детонационную волну.

По изображениям рис. 4 и 5 рассчитаны параметры ударного сжатия исследуемого ВВ. Эти параметры показаны на рис. 6 и приведены также в табл. 2. Сплошной линией на рис. 6 изображена ударная адиабата эмульсии плотностью 1.41 г/см³, на основе которой изготовлено исследуемое ВВ [5]. Штриховой линией на рис. 6 показана ударная адиабата исследуемого ВВ начальной плотностью 1.0 г/см³, расчи-

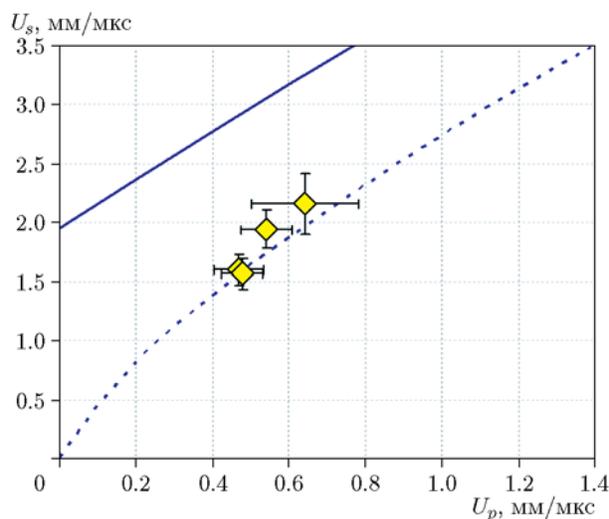


Рис. 6. Ударная адиабата

танная из ударной адиабаты эмульсии методом, описанным в работе [6].

В экспериментах 3 и 4, в которых была возбуждена детонация и $D < V_T$, определенные таким образом значения скорости детонации оказались равны 4.95 ± 0.29 и 4.96 ± 0.45 мм/мкс соответственно. Эти значения с экспериментальной точностью равны предельной скорости детонации исследуемого ВВ [4].

В табл. 2, кроме начальных параметров ударных волн в проведенных экспериментах для исследуемого ВВ, также приведены значения скорости детонации, давления p , плотности ρ и приращения энергии ΔE за фронтом ударной волны, рассчитанные по известным формулам для одномерной плоской ударной волны. Приращения средней температуры ΔT оценены по формуле $\Delta T = \Delta E/C_v$, где значение удельной теплоемкости эмульсии $c_v = 2.2 \pm 0.1$ Дж/(г·К) взято из [5].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассчитанное давление в исследуемом ЭмВВ в момент удара, приводящее к иницированию детонации, составило примерно 1 ГПа, что значительно меньше давления Чепмена — Жуге для данного ВВ, которое примерно равно 6 ГПа [7]. Также обращает на себя внимание небольшой прирост средней температуры в иницирующей ударной волне, всего несколько десятков градусов, что соответствует температуре изготовления ЭмВВ (≈ 90 °С). Это в очередной раз подтверждает, что в ЭмВВ реакция разложения эмульсионной матрицы начинается в горячих точках, т. е. в областях за фронтом ударной волны, температура в которых гораздо больше средней. В ЭмВВ горячие точки возникают в окрестности ударно-сжатых пор.

Полученное в данной работе значение энергии иницирования детонации в 1.8 раза больше, чем соответствующая энергия в [3] для близкого по составу и плотности ЭмВВ. Большая разница может быть вызвана разными причинами. Основная из них, вероятно, различные условия нагружения зарядов ЭмВВ. В [3] иницирование детонации ЭмВВ выполнялось ударом компактного ударника (цилиндра).

Важно отметить особенность используемого в данной работе метода нагружения ЭмВВ. В случае классической плоской ударной волны вещество за ее фронтом приводится в движение поршнем, который перемещается в

направлении распространения ударной волны. В нашем случае в качестве поршня выступает пластинка, через которую производится удар по ЭмВВ. Фронт ударной волны не параллелен поверхности пластинки. Это означает, что ЭмВВ движется вдоль поверхности пластинки. Оценка относительной скорости дает значение около 0.1 мм/мкс. Поскольку эмульсия обладает вязкостью, вдоль поверхности пластинки появляется дополнительный источник тепла из-за сил трения между пластинкой и ЭмВВ, который отсутствовал бы в случае удара по нормали. Вклад этого процесса в иницирование детонации пока нами не выяснен.

Обращает на себя внимание тот факт, что в опытах 1 и 2 (см. табл. 2) значения начального давления в исследуемом ВВ практически одинаковые, а результат иницирования разный. Причина этого заключается в том, что расчет давления выполнялся по рентгенограммам, качество которых не позволяет улучшить точность определения этой величины. Нет никакого сомнения, что действительное начальное давление в исследуемом ВВ монотонно растет в экспериментах 1–3, поскольку в них увеличивается толщина метаемого заряда и, как следствие, увеличивается нормальная скорость метаемой пластины.

ВЫВОДЫ

С помощью импульсной рентгенографии изучен процесс ударно-волнового иницирования ЭмВВ. Получены данные об ударной сжимаемости ЭмВВ плотностью 1.0 г/см³, выполнена оценка энергии иницирования детонации и измерена глубина иницирования детонации.

Полученные данные могут быть полезны для тестирования моделей уравнений состояния исследуемого ВВ и кинетики его превращения в продукты детонации. Используемая постановка экспериментов вполне удобна для численного моделирования, а полученные из рентгенограмм формы ударных и детонационных волн легко сравнивать с соответствующими рассчитанными параметрами волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lee J., Sandstrom F. W., Craig B. G., Persson P.-A. Detonation and shock initiation properties of emulsion explosives // Proc. 9th Int. Symp. Detonation, Portland, Oregon, USA. — 1989. — V. 1. — P. 573–584.

2. Сильвестров В. В., Караханов С. М., Дерibas А. А., Пластинин А. В. Ударно-волновая чувствительность эмульсионного ВВ // IX Харитоновские тематические чтения: сб. тр. междунар. конф. — Саров, 2007. — С. 133–138.
3. Nielsen K. L. S., Craciun C., Craig T. R., Turcotte R. High-velocity projectile initiation of emulsion explosives // 38th Int. Pyrotech. Seminar, Denver, CO, USA. — 2012. — https://www.researchgate.net/publication/257432578_High-velocity_Projectile_Initiation_of_Emulsion_Explosives.
4. Юношев А. С., Пластинин А. В., Рафейчик С. И. Скорость детонации эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного полимерными микробаллонами // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 6. — С. 132–137. — DOI: 10.15372/FGV20170616.
5. Сильвестров В. В., Юношев А. С., Пластинин А. В., Рафейчик С. И. Ударная сжимаемость эмульсионной матрицы при давлении до 37 ГПа // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 4. — С. 110–116.
6. Horie Y., Sawaoka A. V. Thermomechanics of powder compaction and mass mixing // Shock Compression Chemistry of Materials. — Tokyo: KTK Scient. Publ., 1993. — Ch. 4. — P. 117–170.
7. Юношев А. С., Бордзиловский С. А., Воронин М. С., Караханов С. М., Макаров С. Н., Пластинин А. В. Детонационное давление эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного полимерными микробаллонами // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 4. — С. 60–68. — DOI: 10.15372/FGV20190408.

Поступила в редакцию 01.10.2021.

После доработки 15.12.2021.

Принята к публикации 12.01.2022.
