

УДК 662.215

ОБ ИСПЫТАНИИ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ ПО МЕТОДУ РАЗРУШАЮЩЕЙСЯ ОБОЛОЧКИ

А. В. Дубовик

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва
a-dubovik@mail.ru

Выполнен приближенный теоретический анализ нового метода испытаний взрывчатых материалов на чувствительность к механическим воздействиям, который известен как метод разрушающейся оболочки. В этом безударном методе разрыв оболочки освобождает находящийся в ней твердый взрывчатый материал от сжимающей нагрузки и предоставляет ему возможность свободного бокового расширения. В процессе высокоскоростного течения вещество взрывается, если сжимающее напряжение создается достаточно большим. Картина взрыва в целом представляется аналогичной явлению инициирования взрыва при разрушении заряда твердого взрывчатого материала ударом на копре. Поэтому для математического описания рассматриваемой методики испытаний частично использована ранее разработанная модель радиального течения вязкопластичного взрывчатого материала, его диссипативного разогрева и теплового воспламенения в горячих точках текучей среды. Полученные данные об изменении различных параметров при возбуждении взрыва позволяют наглядно представить его протекание не только в рамках рассматриваемой методики, но и обобщить их на взрывоподобные процессы в самых различных материалах, внезапно освобождающихся от высокой нагрузки.

Ключевые слова: чувствительность, взрывчатый материал, сжатие, разрушение, течение, диссипация, воспламенение, взрыв.

DOI 10.15372/FGV20220112

ВВЕДЕНИЕ

Разработка и исследование новых методов испытаний взрывчатых материалов (ВМ) на чувствительность к механическим воздействиям до сих пор не потеряли своей актуальности. Дело в том, что стандартные (ГОСТ 4545-88, ОСТ и др.) методы, с помощью которых определяется доля взрывов при постоянной энергии удара или минимальная энергия инициирующего воздействия при фиксированной массе заряда испытываемого вещества, не всегда дают возможность получить объективные показатели чувствительности ВМ. В работе [1] показано, что для любого ВМ минимальная для возбуждения взрыва энергия удара зависит от массы заряда (ее эквивалент —

толщина заряда) по параболическому закону с минимумом при критической толщине, которой соответствуют критические для данного ВМ энергия и давление удара. Объективный показатель минимальности воздействия и чувствительности ВМ к удару при стандартных испытаниях определяется лишь в том случае, если масса испытываемого заряда совпадает с критической или хотя бы близка к ней. Чаще всего это не так, и полученная по стандарту механическая чувствительность ВМ оказывается недооцененной.

Метод испытаний, основанный на определении объективных показателей возбуждения взрыва при ударе (метод критических давлений) [2], не получил широкого распространения на практике из-за сложности его использования. В нем применяется электронная аппаратура (осциллографы, источники питания, фоторегистраторы момента взрыва и т. д.), он требует знания тонкостей изготовления специальных тензодатчиков и умелой расшифровки полученных данных (50%-й переход от взры-

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ХФ РАН по теме 0082-2014-0012 «Фундаментальные исследования процессов превращения энергоемких материалов и разработка научных основ управления этими процессами» (номер госрегистрации АААА-А17-117040610346-5).

© Дубовик А. В., 2022.

вов к отказам фиксируется только при первом акте разрушения зарядов). Поэтому не случаен интерес к безударному методу испытаний [3], в котором порошкообразный ВМ помещается в тонкостенную плексигласовую трубку между двумя вложенными в нее стальными пуансонами. Испытательный прибор с обоймой и поддоном устанавливается вертикально между поршнем и траверсой гидравлического пресса и далее помещается под нагрузку. При некотором давлении сжатия заряда, которое фиксируется манометром пресса, оболочка разрушается и заряд разбрасывается в радиальном направлении. При движении масса вещества нагревается и взрывается, если давление разрушения оболочки превышает некоторое минимальное (критическое) для данного заряда ВМ значение p_{cr} . Оно устанавливается последовательными опытами с варьированием толщины оболочки и массы заряда. Характерно, что полученные таким образом для разных ВМ значения p_{cr} приблизительно в 1.5 раза превышают измеренные в испытаниях по методу критических давлений. При этом ряд чувствительности ВМ, сформированный в [3] по возрастанию p_{cr} , согласуется с аналогичным рядом ВМ, полученным методом критических давлений. Это наблюдение открыло возможность широкого использования метода разрушающейся оболочки в практических работах по определению механической чувствительности ВМ, в частности ВМ, особо опасных в обращении, характеризующихся малыми значениями p_{cr} [3, 4].

Однако множество вопросов последовало по интерпретации полученных результатов испытаний ВМ, особенно по механизму инициирования взрыва. В основном вопросы возникли в связи с отсутствием подробного описания методики испытаний ВМ, указаний конкретных масс и толщин зарядов, сведений о состоянии оболочек к моменту разрушения, данных по скорости бокового разлета вещества, по времени разрушения заряда и задержке взрыва и прочих факторов, не обладая которыми невозможно представить картину инициирования ВМ, а также построить рабочую модель возбуждения взрыва. Чтобы хотя бы частично восполнить этот пробел, в данной работе выполнено демонстрационное моделирование метода разрушающейся оболочки, дающее общее понимание сложной картины инициирования взрыва при динамической разгрузке сжатого заряда ВМ.

МОДЕЛЬ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВА ПО МЕТОДУ РАЗРУШАЮЩЕЙСЯ ОБОЛОЧКИ

На рис. 1 схематически показан прибор для испытания ВМ по методу разрушающейся оболочки. Вследствие осевой симметрии конструкции приведена только половина вида прибора: слева от оси z показана часть прибора непосредственно перед разрушением оболочки 2 с ее характерной радиальной деформацией (выпучиванием) на уровне заряда ВМ 3, справа — после разрушения оболочки, с истечением разрушенного заряда. В полуплоскости $z < 0$ располагается не показанное на рисунке симметричное относительно оси r продолжение прибора в виде второго пуансона и все той же оболочки, причем контактная поверхность пуансона проходит вдоль оси r . Горизонтальными стрелками 4 в правой части рисунка показаны радиальные линии тока продуктов разрушения заряда. Противоположные заряду ВМ торцы пуансонов контактируют соответственно с поршнем и траверсой гидравлического пресса, создающего разного уровня давления в различных участках конструкции прибора.

1. Рассмотрим условие равновесия сил в нагруженном приборе с пуансонами 1 диаметром $2R$ и зарядом ВМ 3 толщиной h_0 . В замкнутом объеме заряда перед разрушением оболочки создается напряженное состояние, близкое к гидростатическому сжатию. При этом среднее по контактной поверхности пуансона давление p уравнивается контактным трением заряда, ограниченным сверху пределом текучести ВМ на сдвиг, $p_1 = 2\tau_0 R/3h_0$, вязким

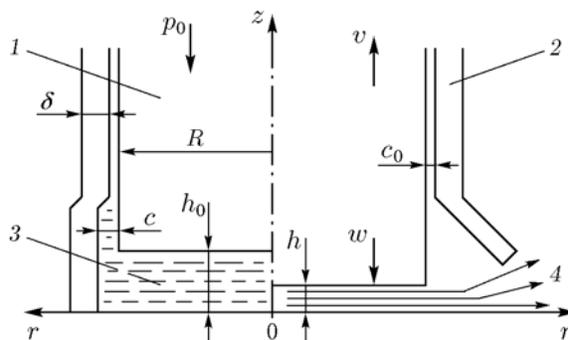


Рис. 1. Схема прибора для испытания ВМ на чувствительность к механическим воздействиям по методу разрушающейся оболочки:

1 — стальной пуансон, 2 — плексигласовая оболочка, 3 — заряд ВМ, 4 — истекающие продукты разрушения заряда

сопротивлением заряда осевому сжатию $p_2 = 3\mu w/h_0$ (где μ — пластическая вязкость ВМ), фрикционным сопротивлением втеканию ВМ в узкий зазор c_0 между боковыми поверхностями пуансонов и внутренней поверхностью оболочки $p_3 = 2\tau_0 h/c_0$ и прочностным сопротивлением оболочки разрыву под влиянием действующей изнутри сосредоточенной силы $p_4 = \sigma_p(\delta/h_0)(\delta/R\sqrt{3})^{1/2}$ [5] (где σ_p — предел прочности плексигласа на растяжение). При записи перечисленных формул предполагалось, что образующийся под пуансонами спрессованный слой ВМ тонкий ($h_0 \ll R$), предел текучести ВМ τ_0 связан с пределом прочности заряда на сжатие σ_0 соотношением $\tau_0 = \sigma_0/\sqrt{3}$, периферийный зазор между пуансонами и оболочкой узкий ($c_0 \ll R$), вещество заряда заполняет его в обе стороны на глубину не более h_0 , толщина стенок оболочки $\delta < R$, радиальное усилие p_4 на оболочку со стороны заряда действует на площадке размером $2\pi R h_0$, силы вязкости в заряде проявляются только при сдавливании его со скоростью $w = -\frac{dh}{dt}$.

Суммируя перечисленные давления p_i и приравнивая их внешнему давлению p_0 в момент разрушения оболочки, получаем

$$p_0 = 2\frac{\sigma_0 h_0}{c_0 \sqrt{3}} \left[1 + \frac{R c_0}{3 h_0^2} + \frac{\sigma_p}{\sigma_0} \frac{\delta c_0}{4 h_0^2} \left(\frac{\delta \sqrt{3}}{R} \right)^{1/2} \right]. \quad (1)$$

Проведенные по (1) численные оценки показывают, что разрушение оболочки определяется в основном давлением p_4 , создаваемым на периферии заряда веществом, заполняющим зазор, поэтому периферийный участок заряда наиболее опасен для возбуждения взрыва именно во время нагружения опытного прибора, особенно в случае использования трудно деформируемых толстостенных оболочек, что нередко наблюдается в эксперименте [3, 4].

Зависимость $p_0(h_0)$ (1) имеет минимум при $h_{\min} \approx [(R c_0/3)(1 + (3^{5/4}/4)(\sigma_p/\sigma_0) \times (\delta/R)^{3/2})^{1/2}]$. Эксперименты [3] показывают, что на практике реализуется только левая ветвь кривой $p_0(h_0)$, соответствующая условию снижения p_0 с ростом h_0 (здесь прослеживается аналогия с гиперболической зависимостью давления разрушения зарядов $p_0(h_0)$ в испытаниях по методу критических давлений [2]). Наличие минимума на кривой $p_0(h_0)$ свидетельствует о существовании минимального давления нагрузки p_{\min} , которая еще спо-

собна разрушить оболочку. Наконец, укажем, что следующая из (1) зависимость $p_0(\delta)$ линейная и весьма слабая (в пределах δ , допускаемых методикой эксперимента).

Заметим, что рекомендуемая в [3] для опытного прибора скользящая посадка пуансона в оболочке допускает зазор между ними $c_0 \leq 10$ мкм. Но тогда значение p_0 , вычисляемое по (1), становится нереально высоким. Оценим реальное локальное давление вследствие выпучивания оболочки как результат заполнения зазора веществом заряда в предельных условиях нагружения. Полагая модуль Юнга для плексигласа $Y_p = 2.7$ ГПа и предел прочности на растяжение $\sigma_p = 65$ МПа, найдем тангенциальную (кольцевую) деформацию оболочки $\varepsilon_\varphi = 0.025$, с помощью которой определим зазор перед разрушением оболочки: $c = 2R\varepsilon_\varphi \approx 0.12$ мм (при осесимметричной деформации $\varepsilon_r = \varepsilon_\varphi$). Тогда по (1) при замене c_0 на c предельное давление разрушения оболочки с зарядом октогена ($\sigma_0 = 130$ МПа) составляет $p_{\min} \approx 0.88$ ГПа при $\delta = 1.5$ мм и $2R = 5$ мм. При этом толщина спрессованного заряда $h_{\min} \approx 0.35$ мм. Для тротила получаем соответственно $p_{\min} = 0.33$ ГПа и $h_{\min} = 0.42$ мм. Пониженное по сравнению с октогеном значение p_{\min} в случае малопрочного тротила ($\sigma_0 = 40$ МПа) объясняется его более высокой способностью заполнять зазор. Отметим, что приведенные параметры характеризуют лишь предельное состояние нагруженных испытательных приборов, причем необязательно перед моментом взрыва. При этом полученные расчетом давления разрушения оболочек весьма близки к их экспериментальным значениям [3].

2. Представляется очевидным, что с момента разрушения оболочки последующее боковое (радиальное) истечение заряда происходит под действием осевого сжатия распрямляющимися стальными пуансонами, которые до разрушения оболочки находились в состоянии типа сжатой пружины, обладающей механической жесткостью $k = YS/l$, где $S = \pi R^2$, Y — модуль упругости стали, l — длина пуансона. Тогда запасенная при сжатии потенциальная энергия системы нагружения заряда (прибор, обойма, поддон и др. — все массой M) определяется как $E_0 = p_0^2 S^2 / 2k$, время механической релаксации прибора — $t_0 = \sqrt{M/k}$, характерная скорость осевого смещения системы нагружения — $v_0 = h_0/t_0$.

Далее полагаем, что оболочка разрушает-

ся мгновенно и одновременно по всему периметру заряда ВМ. Такое предположение способно привести к заметному уменьшению времени механического воздействия на заряд, но практически не повлияет на результаты расчета начального давления разрушения p_0 . Причем картина радиального растекания заряда теперь становится аналогичной движению растекающегося вещества при осевом ударе. Тогда для описания поведения заряда в условиях разрушающейся оболочки можно воспользоваться уравнениями динамики удара на копке и свободного растекания тонкого вязкопластичного слоя, сдавливаемого твердыми шероховатыми поверхностями пуансонов со скоростью $w(t)$ [1]:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{8h}{\rho R^2} \left(p - \frac{2\sigma R}{3h\sqrt{3}} - \frac{3\mu w}{h} \right) - \frac{3w^2}{2h}, \quad w(0) = 0,$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{k}{S} (v - w), \quad \frac{dh}{dt} = -w, \quad \frac{dv}{dt} = -\frac{pS}{M}, \quad (2)$$

$$p(0) = p_0, \quad h(0) = h_0, \quad v(0) = 0.$$

Здесь при записи первого уравнения учтены инерционные силы, действующие в потоке ВМ, которые поддерживают уровень спадающего давления и ограничивают скорость частиц, максимальные значения которой $u_{\max} = wR/2h$ могут достигать нескольких сотен метров в секунду.

Далее в соответствии с (2) полагаем, что при разрушении оболочки происходит перестройка профиля давления в заряде ВМ — от равномерного до близкого к треугольному с максимумом $3p$ на оси с последующим спадом давления к периферии заряда до уровня $\approx \sigma$. Поэтому разогревы ВМ, возникающие вследствие вязкопластической деформации заряда, распределяются неравномерно по его радиусу в соответствии с линейным распределением давления $p(r) = 3p(1 - r/R)$. Тогда уравнение баланса тепла в тонком слое ВМ запишется в виде

$$\rho C \frac{dT}{dt} = \frac{3pw}{h} \left[1 - \frac{r_0}{R} \left(\frac{h_0}{h} \right)^{1/2} \right] - \frac{\alpha(T - T_0)}{h} + \rho Q Z W(t), \quad T(0) = T_0, \quad (3)$$

$$\frac{d\eta}{dt} = ZW(t), \quad \eta(0) = 0,$$

$$W(t) = (1 - \eta) \exp \left(-\frac{E}{R_g T} \right).$$

Здесь C — удельная теплоемкость ВМ, Q — теплота химической реакции термораспада, E , Z — термоактивационные характеристики ВМ, R_g — газовая постоянная, r_0 — начальное положение пробной частицы по радиусу заряда, α — коэффициент теплообмена между зарядом и контактной поверхностью пуансона, η — относительная концентрация продуктов распада ВМ. Полагаем, что термораспад ВМ протекает по закону химической реакции первого порядка с аррениусовской зависимостью константы скорости от температуры.

Уравнения (2), (3) образуют замкнутую систему, описывающую осесимметричное течение, локальный диссипативный разогрев и воспламенение заряда ВМ с момента полного разрушения оболочки ($t = 0$). Данная система интегрировалась численно при условиях:

1) разогрев заряда сопровождается его термическим разупрочнением, причем реологические характеристики ВМ зависят от температуры и давления как

$$\sigma = \sigma_0 [1 - (T - T_0)/(T_m + \beta p - T_0)]^n,$$

$$\mu = \mu_0 \exp[(-U/R_g)(1/T_0 - 1/T) + \gamma p],$$

где T_m — температура плавления ВМ, β — пьезомодуль плавления, U — активационный параметр текучести, γ — пьезокоэффициент вязкости, показатель степени $0 \leq n \leq 1$;

2) критические условия взрыва определяются вариацией различных параметров задачи, но регистрируются только при снижении p до нуля в момент времени t_{end} ; воспламенения при $t > t_{end}$, вследствие их неспособности привести к развитию взрыва в заряде ВМ, относятся к отказам;

3) полноценное воспламенение фиксируется при $\eta_{end} = 1$, пробная частица при $t = t_{end}$ не должна выходить за пределы контактной поверхности пуансона ($r_{end} < R$).

Необходимым параметром экспериментов по методу разрушающейся оболочки является масса (толщина) зарядов исследуемых ВМ, особенно в критических условиях возбуждения взрыва. К сожалению, сведения о массе в работах [3, 4] полностью отсутствуют. Поэтому, учитывая демонстрационный характер расчетов взрыва, произвольно для всех ВМ принята

Таблица 1

Физико-химические и взрывчатые характеристики ВМ

ВМ	σ_0 , МПа	C , кДж/(кг·К)	T_m , К	β , К/МПа	Q , МДж/кг	E , кДж/моль	$\lg(Z [c^{-1}])$
Гексоген	82	1.26	475	0.2	5.44	174	15.5
Октоген	130	1.05	553	0.2	5.52	188	16
Тэн	60	1.14	414	0.3	5.75	165	15.6
Тротил	40	1.465	353	0.3	4.23	144	11.4
Азид свинца	155	550	643	0.25	1.79	155	13.2

Примечание. Значения σ_0 и β взяты из [1, 2], C и T_m — из [6], Q — из [7], E и Z — из таблиц [8, 9].

Таблица 2

Показатели чувствительности ВМ по методу разрушающейся оболочки

ВМ	p_{cr} , ГПа	E_{cr} , Дж	t_{end} , мкс	w_{max} , м/с	h_{end} , мм	u_{max} , м/с	η_1 , %	T_1 , К	μ_{cr} , Па·с
Гексоген	1.1	2.88	56.8	22.2	0.216	108	3.6	859	995
Октоген	1.0	2.38	76.3	15.9	0.258	68.7	3.4	881	711
Тэн	0.9	1.93	18.4	38.9	0.189	212	2.4	844	650
Тротил	1.4	4.67	35.3	83.3	0.124	594	5.1	1260	220
Азид свинца	0.4	0.38	26.7	13.7	0.305	55.4	5.3	519	800

Примечание. η_1 и T_1 — предвзрывные содержание продуктов распада и температура соответственно.

критическая толщина спрессованных зарядов $h_0 = h_{cr} = 0.4$ мм, которая соответствует средней массе ВМ около 15 мг. Для качественного сопоставления параметров потоков с экспериментом рассчитываемые значения p_{cr} максимально приближены к данным [3]. Напомним, что при давлении разрушения $p_0 < p_{cr}$ взрывы отсутствуют и регулярно происходят только при $p_0 > p_{cr}$. В качестве калибровочного параметра расчетов выбрана малоизвестная из экспериментов пластическая вязкость ВМ μ_0 (отказы при $\mu_0 > \mu_{cr}$).

Необходимые для расчетов физико-химические характеристики ВМ, взятые из различных источников [1, 2, 6–9], приведены в табл. 1. В табл. 2 представлены полученные результаты расчетов. Для всех ВМ положены одинаковые значения параметров: $U = 20$ кДж/моль, $\gamma = 5$ ГПа⁻¹, $M = 0.35$ кг, $r_0 = 0.01$ мм, $\alpha = 10^3$ Дж/(м²·с·К), $n = 0.7$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 показано изменение во времени различных видов энергии системы нагружения во время разлета заряда октогена в кри-

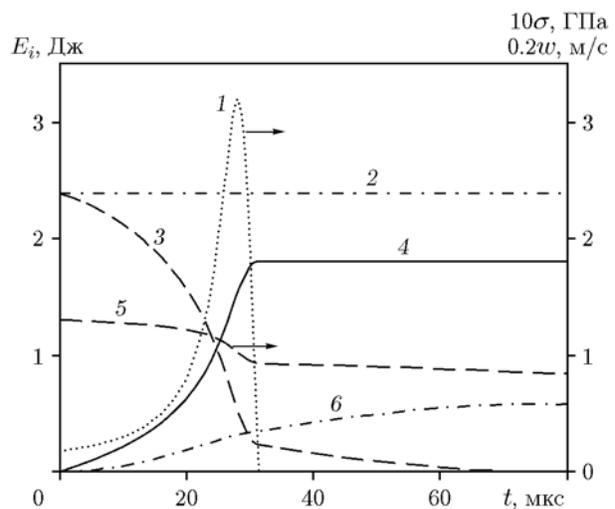


Рис. 2. Изменение во времени параметров ВМ и системы нагружения прибора:

1 — скорость контактной поверхности пуансона w , 2 — суммарная энергия системы E_0 , 3 — потенциальная энергия E_p , 4 — тепловая энергия E_T , 5 — прочность заряда ВМ σ , 6 — кинетическая энергия E_k

тических условиях инициирования — потенциальной $E_p = p^2 S^2 / 2k$, внутренней (тепловой)

$$E_T = S \int_0^t p w dt \text{ и кинетической } E_k = M v^2 / 2.$$

Скорость центра масс системы нагружения $v < 0$ направлена противоположно w и отражает явление рикошета системы нагружения на снятие нагрузки. Сумма всех видов энергии равна $E_0 = 2.38$ Дж и сохраняется постоянной в интервале времени $0 < t < t_{end}$. Из рис. 2 следует, что уменьшение E_p ведет к росту E_k и E_T , но если E_k монотонно возрастает, то E_T возрастает только до момента разупрочнения заряда $t_n = 0.41 t_{end}$, начиная с которого энергия $E_T = 0.76 E_0$ остается постоянной. Дело в том, что октоген — весьма прочный ВМ с относительно высокой температурой плавления. Вследствие небольшого диссипативного нагрева (средняя температура ВМ в момент времени t_n составляет 429 К) заряд октогена разупрочняется лишь на четверть своей величины ($\sigma_n = 0.72 \sigma_0$). В результате с момента t_n под пуансонами формируется довольно толстый ($h_n = 0.65 h_0 = h_{end}$) остаточный слой весьма прочного ВМ. Из-за его фрикционного сопротивления скорость сжатия заряда w , достигнув максимума $w_{max} = 15.9$ м/с, резко падает до нуля. Далее энергия E_p снижается по линейному закону, характерному для механической разгрузки «холостой» системы нагружения.

На рис. 3 показано изменение во времени параметров октогена в критических условиях разгрузки. С момента времени t_n рост локальной температуры также должен был бы прекратиться, но начавшийся ранее термораспад октогена ($\eta_n = 5 \cdot 10^{-6}$) продолжил ее подъем до значения $T_1 = 881$ К ($\eta_1 = 0.034$), при котором произошло воспламенение. В результате температура в горячей точке поднялась до ≈ 3100 К ($\eta_{end} = 1$).

Описанная картина изменения параметров заряда октогена характерна также и для критических условий инициирования гексогена, но несколько отличается от картины взрыва тэна и тротила. Эти ВМ обладают довольно малой прочностью на сжатие, поэтому заряды из них с начала разрушения разупрочняются полностью ($\sigma_n \approx 0$, но вязкость ВМ μ_n , сильно уменьшаясь, еще сохраняется на значительном уровне), скорости сжатия заметно возрастают, в результате температура в горячей точке заряда тротила, к примеру, поднимается до 1260 К, а скорость разлета вещества дости-

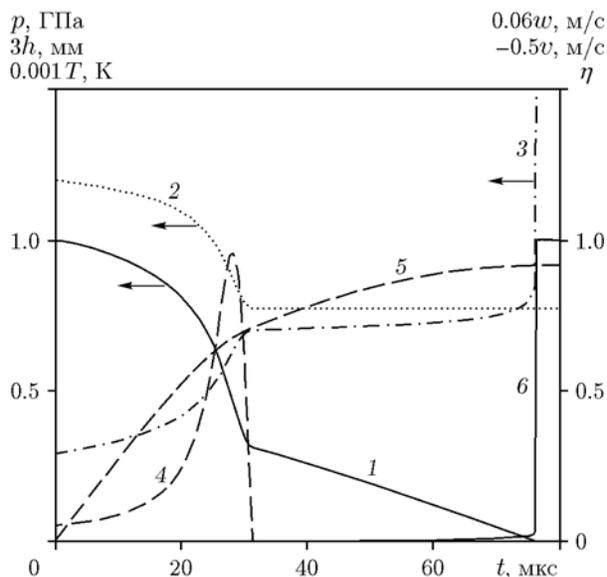


Рис. 3. Параметры заряда ВМ в зависимости от времени:

1 — давление p , 2 — толщина h , 3 — температура горячей точки T , 4 — скорость осевого сжатия w , 5 — скорость центра масс системы нагружения v , 6 — относительная концентрация продуктов распада ВМ η

гает 600 м/с. Отметим, что подобная картина разрушения и взрыва заряда наблюдается и во всех перечисленных выше ВМ вдали от критических условий инициирования (при $p_0 > p_{cr}$). Однако при этом взрывы фиксируются уже при $t < t_{end}$.

Расчеты параметров взрыва инициирующих ВМ не привели к положительным итогам. Приведенные в табл. 2 результаты для азид свинца получены лишь при снижении энергии активации термораспада до 68 кДж/моль. Столь малое значение для этого ВМ представляется нереальным. Возможно, инициирование азид свинца в условиях разрушающейся оболочки протекает не по вязкопластическому, а по иному (фрикционному) механизму возбуждения взрыва.

Отметим высокую эффективность инициирования ВМ по методу разрушающейся оболочки. Как следует из рис. 2, около 80 % запаса энергии в системе нагружения затрачивается на диссипативный разогрев разрушенного ВМ. Примечательно и то, что на примере разлета заряда тротила при разрушающейся оболочке можно увидеть внешние черты взрывоподобного поведения слабо реагирующих или практически инертных материалов, освобож-

даемых в какой-то момент времени от большой внешней нагрузки [10, 11]. На это указывают высокие скорости разлета фрагментов разрушения, способные создать в окружающей среде, особенно в воздухе, довольно сильные волновые возмущения. Причем скорость образующихся осколков и амплитуда волн «взрыва» зависят не только от запаса энергии в конкретной системе нагружения, но и от характера разрушения сжатого материала и его реологических характеристик.

ВЫВОДЫ

1. Проведен теоретический анализ принципа работы предложенного ранее метода испытаний ВМ на чувствительность к механическим воздействиям — «разрушающаяся оболочка», позволяющий наглядно представить реальную картину взрыва.

2. Построена приближенная математическая модель разрушения заряда ВМ и инициирования взрывной реакции в процессе разлета фрагментов разрушения заряда.

3. Проведены демонстрационные расчеты критических параметров инициирования взрыва ряда известных ВМ, которые в целом согласуются с показателями взрыва, полученными в эксперименте; отмечена высокая эффективность возбуждения взрыва ВМ по методу разрушающейся оболочки.

4. Представленная модель взрыва ВМ при снятии внешней нагрузки способна качественно объяснить многие черты взрывообразного поведения при динамической разгрузке инертных материалов (реологические взрывы при сжатии вещества, взрывоподобные химические реакции при ударе и т. д.).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дубовик А. В.** Чувствительность твердых взрывчатых систем к удару. — М.: Изд-во РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2011.
2. **Афанасьев Г. Т., Боболев В. К.** Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. — М.: Наука, 1968.
3. **Щетинин В. Г.** Оценка механической чувствительности по методу разрушающейся оболочки // Физика горения и взрыва. — 1999. — Т. 35, № 5. — С. 116–121.
4. **Теселкин В. А.** Влияние размера частиц компонентов на механическую чувствительность металлизированных взрывчатых веществ // Хим. физика. — 2008. — Т. 27, № 8. — С. 43–52.
5. **Огibalов П. М.** Вопросы динамики и устойчивости оболочек. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1963.
6. **Орлова Е. Ю.** Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. — М.: Химия, 1981.
7. **Пепекин В. И., Махов М. Н., Лебедев Ю. А.** Теплоты взрывчатого разложения индивидуальных ВВ // Докл. АН СССР. — 1977. — Т. 232, № 4. — С. 852–855.
8. **Манелис Г. Б., Назин Г. И., Рубцов Ю. И., Струнин В. А.** Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов. — М.: Наука, 1995.
9. **Андреев К. К., Беляев А. Ф.** Теория взрывчатых веществ. — М.: Оборонгиз, 1960.
10. **Ярославский М. А.** Реологический взрыв. — М.: Наука, 1982.
11. **Дубовик А. В.** Взрывоподобные химические реакции в твердых веществах, стимулированные механическим ударом // Хим. физика. — 2016. — Т. 35, № 11. — С. 37–43.

Поступила в редакцию 01.03.2021.

После доработки 05.05.2021.

Принята к публикации 09.06.2021.