

15. Логинов Н.П. Механоактивация перхлората аммония при вибрационной обработке // XI Всесоюз. симп. "Механохимия и механоэмиссия твердых тел". Чернигов, 1990 / Сб. тез. докл. — Черногловка, 1990. — Т. 2. — С. 44—46.
16. Логинов Н.П., Клименко В.С. Механохимические реакции нитроцеллюлозы при вибрации // XI Всесоюз. симп. "Механохимия и механоэмиссия твердых тел". Чернигов, 1990 / Сб. тез. докл. — Черногловка, 1990. — Т. 2. — С. 112—113.

443010, г. Самара,
СамГТУ

Поступила в редакцию
7/11 1994

УДК 534.222.2

Ю.А. Аминов, А.В. Вершинин, Н.С. Еськов,
О.В. Костицын, Б.Г. Лобойко,
В.С. Любимов, С.Н. Любятинский, Г.Н. Рыкованов, М.А. Стриженок

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ВВ НА ОСНОВЕ ТАТБ

Представлены результаты расчетного моделирования экспериментов по определению ударно-волновой чувствительности пластифицированного состава на основе ТАТБ. Модель макрокинетики разложения ВВ построена в рамках гипотезы горячих точек.

Экспериментальным исследованиям ударно-волновой чувствительности и построению полуэмпирических моделей макрокинетики детонации гетерогенных ВВ посвящено значительное количество работ. В основном исследовался процесс развития взрывчатого превращения ВВ высокой и средней чувствительности на основе тротила, гексогена, октогена [1, 2]. Обзор предложенных для описания макрокинетики ВВ расчетных моделей можно найти, например в [3—5]. В последнее время большое внимание уделяется изучению свойств низкочувствительных составов на основе ТАТБ [6, 7].

В данной работе представлены результаты расчетного моделирования экспериментов по возбуждению детонации низкочувствительного пластифицированного состава на основе ТАТБ (ПСТ) с начальной плотностью $\rho_0 = 1,91 \text{ г/см}^3$.

При описании макрокинетики для скорости разложения ПСТ использовалось выражение

$$\frac{d\xi}{dt} = -B \frac{\rho_{\text{ВВ}}^{1/3}}{\rho} \xi^{2/3} \exp(-E_a/3E_T) \left(\frac{p}{p_x}\right)^k, \quad (1)$$

где B , k — параметры модели; ξ — массовая концентрация ВВ; E_a — энергия активации; E_T — тепловая составляющая удельной внутренней энергии ВВ; p_x — давление Жуге. Величины ρ , p (плотность и давление смеси ВВ и ПВ в данной точке) определяются из условий механического

равновесия компонентов смеси: $\frac{1}{\rho} = \frac{\xi}{\rho_{\text{ВВ}}} + \frac{1-\xi}{\rho_{\text{ПВ}}}$; $p_{\text{ПВ}} = p_{\text{ВВ}} = p$.

Вывод (1) основан на представлении ВВ в виде сферических гранул. Предполагается также, что распределение тепловой энергии горячих точек подчиняется статистике Больцмана, а фронт волны горения распространяется к центру гранулы со скоростью

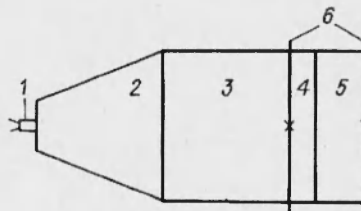
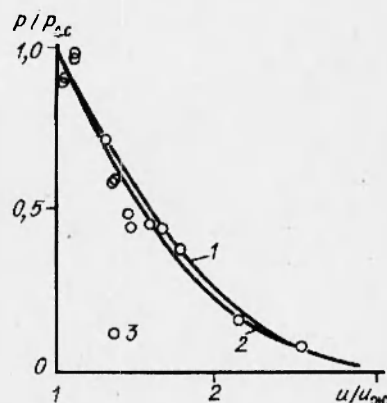


Рис. 1. Схема экспериментов с плоской УВ.

© Ю.А. Аминов, А.В. Вершинин, Н.С. Еськов, О.В. Костицын, Б.Г. Лобойко, В.С. Любимов, С.Н. Любятинский, Г.Н. Рыкованов, М.А. Стриженок, 1995.

Рис. 2. Изознтропа разгрузки продуктов взрыва ПСТ.
1 — данная работа; 2 — обобщенная зависимость [14]; 3 — экспериментальные точки ТАТВ/Т2 [14].



$u \sim p^k / \rho$. Указанная зависимость отражает попытку неким образом учесть имеющиеся экспериментальные данные о повышении чувствительности ПСТ при уменьшении плотности и о сокращении расстояния выхода детонации на стационарный режим при увеличении давления инициирования. Близкий по идеологии подход ранее реализован в [8, 9].

Для калибровки модели проводились эксперименты по возбуждению детонации ПСТ плоской ударной волной (УВ). Схема установки изображена на рис. 1. Детонатор 1 и плосковолновая линза 2 служат для инициирования активного заряда ВВ 3 (диаметр $d = 60$ мм, высота $l = 50$ мм). Образец ПСТ ($d = 60$ мм, $l = 20$ мм) инициируется через металлическую преграду 4, с помощью электрических контактов 6 измеряется время прохождения волны через систему преграда + исследуемый заряд. При определении времени движения детонационной волны (ДВ) по ПСТ (табл. 1) учитывалось время прохождения преграды. Варьировались тип активного ВВ (сплав ТГ с $p_{ж} = 28$ ГПа, октогенсодержащий состав с $p_{ж} = 36,5$ ГПа), материал преграды (алюминиевый сплав АМЦ, медь М1) и ее толщина h (табл. 2).

Уравнение состояния активного ВВ и ПВ задавалось в виде [10], остальных веществ — в виде Ми — Грюнайзена с параметрами, указанными в табл. 2. При определении коэффициентов для «холодного» ПСТ использованы экспериментальные данные [11]. Уравнение состояния продуктов взрыва ПСТ задавалось в виде [12, 13]

$$p = h_x(\rho) + \beta\rho(E - E_x);$$

$$p_x(\rho) = \rho_0 m A \delta^{m+1} + \omega \rho_0 F \exp(-\xi/\delta),$$

$$E_x = \int_0^{\rho} \frac{p_x}{\rho^2} d\rho, \quad \delta = \rho / \rho_k,$$

где индекс x соответствует холодному компоненту.

Набор констант $A = 1,54$, $F = 56,5$, $m = 0,6$, $\gamma = 0,6$, $\omega = 3,67$ при удельной калорийности $Q = 3,51$ кДж/г обеспечивает хорошее согласие

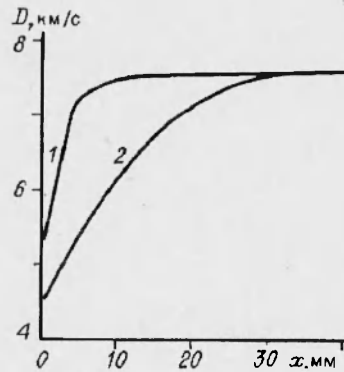
Т а б л и ц а 1

Параметры уравнения состояния Ми—Грюнайзена					
Материал	ρ_0 , г/см ³	ρ_k , г/см ³	c_0 , км/с	γ	n
АМЦ	2,73	2,73	5,231	3,0	4,2
Сu	8,9	8,937	3,60	2,67	6,0
ПСТ	1,91	1,927	2,955	2,155	6,024

Т а б л и ц а 2

Время движения ДВ по ПСТ							
Опыт	ВВ	Преграда		$p_{ф}$, ГПа	τ_p , мкс	$\tau_{экс}$, мкс	$\tau_p/\tau_{экс}$
		h , мм	материал				
1	ТГ	9	Al	23,5	2,696	2,672	1,009
2	Октоген	6	Al	18,6	2,851	2,888	0,987
3	ТГ	6	Al	15,0	3,721	3,754	0,991

Рис. 3. Зависимость $D(x)$ для плоской ДВ.
 $p_{\text{ф}}$, ГПа: 1 - 17, 2 - 14.



расчетных значений давлений Жуге и скорости стационарной детонации с экспериментом. На рис. 2 изоэнтропа разгрузки продуктов взрыва ПСТ сравнивается с обобщенной зависимостью $p/p_{\text{ж}} = 2,412 - 1,7315u/u_{\text{ж}} + 0,3195(u/u_{\text{ж}})^2$ [14], полученной в результате анализа изоэнтроп разгрузки ряда ВВ на основе тротила, гексогена, октогена (индекс ж соответствует параметрам в точке Жуге).

Расчетное моделирование экспериментов проведено в рамках двумерного комплекса МАХ [15]. В силу ограниченных возможностей ЭВМ использовалась счетная сетка с размерами ячейки $0,6 \times 0,6$ мм, обеспечивающая 1-2 счетные точки на химическую зону ПСТ. В остальных областях сетка выбиралась из условия равенства масс счетных ячеек. Хорошее согласие расчетов и экспериментов реализуется при $E_a = 0,45$ кДж/г, $k = 6$, $B = 65$. Различие расчетного и экспериментального интервалов времени, необходимого для прохождения ДВ по образцу ПСТ, составляет $\sim 1\%$ в интервале давлений на фронте входящей в ПСТ ударной волны $p_{\text{ф}} = 15 \div 24$ ГПа (см. табл. 1).

Для исследования процесса выхода ДВ на стационарный режим в рамках реализованной модели проведены расчеты разгона детонации ПСТ плоской УВ от взрыва прилегающего слоя инициирующего ВВ толщиной 8 мм. Величина $p_{\text{ф}}$ варьировалась изменением калорийности активного ВВ. Зависимость скорости ДВ от пройденного в ПСТ расстояния $D(x)$ представлена на рис. 3. При $p_{\text{ф}} = 14$ ГПа, близком к критическому по инициированию детонации, величина разгонного участка $L \approx 30$ мм. При увеличении $p_{\text{ф}}$ до 17 ГПа значение L сокращается в 3 раза.

Расходящейся УВ ПСТ инициировали в экспериментах двух типов. В опытах первого типа (рис. 4) полусферический заряд из ВВ на основе октогена ($p_{\text{ж}} = 36,5$, $p_{\text{ф}} = 33,4$ ГПа) радиусом 20 мм инициирует заряд из состава ПСТ. С помощью электроконтактных датчиков регистрировалась скорость ДВ в образцах длиной 20 мм. В опытах второго типа (gap-test) заряд ПСТ инициировался через преграду из оргстекла различной толщины (рис. 5). Для измерения времени прохождения системы преграда + исследуемый заряд также использовались электрические контакты. Предварительно в специальной серии калибровочных экспериментов определялось время движения УВ по преграде.

Отсутствие влияния боковой разгрузки на результаты измерений в опыте первого типа позволяет проводить его моделирование в сферически

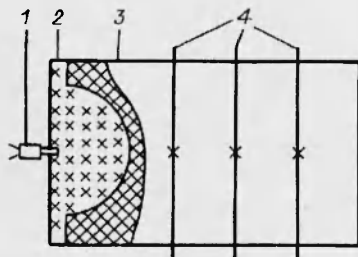


Рис. 4. Схема эксперимента с расходящейся ДВ.

1 - детонатор; 2 - инициирующий заряд; 3 - образец ПСТ ($d = 60$ мм, $l = 20$ мм); 4 - электроконтакты.

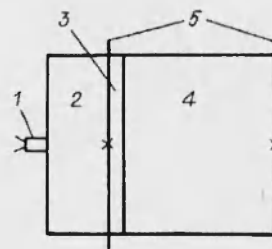


Рис. 5. Схема опытов gap-test.

1 - детонатор; 2 - инициирующий заряд ($d = 60$ мм, $l = 20$ мм); 3 - преграда из оргстекла; 4 - образец ПСТ ($d = 60$ мм, $l = 50$ мм); 5 - электроконтакты.

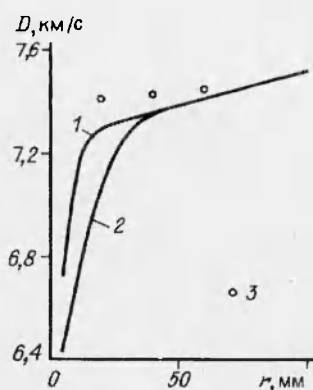


Рис. 6. Зависимость $D(r)$ для сферической ДВ.
РФ, ГПа: 1 — 33,4; 2 — 32,6; 3 — эксперимент.

симметричном расчете. Максимальное расхождение расчетной и экспериментальной зависимостей $D(r)$ (r — пройденный волной путь в ПСТ) не превышает 3 % (рис. 6). В обоих случаях разгонный участок выхода расходящейся ДВ на стационарный режим составляет не менее 100 мм, что в $\sim 5 - 6$ раз больше, чем для плоской волны с интенсивностью, близкой к критической.

В экспериментах gap-test выбрана преграда из оргстекла толщиной $h = 3,5$ и 4 мм. В первом случае по ПСТ распространяется ДВ, расчетное значение средней скорости волны на базе 50 мм $\bar{D}_p = 5,61$ км/с согласуется с экспериментальным $\bar{D}_{\text{экс}} = 5,8$ км/с. При $h = 4$ мм детонация в ПСТ затухает, расхождение расчетной и экспериментальной величины средней скорости $\sim 7\%$ ($\bar{D}_{\text{р}} = 4,44$ км/с, $\bar{D}_{\text{экс}} = 4,7$ км/с).

При интенсивности УВ, близкой к критической (соответствующей $h \sim 3,5$ мм), корректное моделирование опытов второго типа предполагает проведение расчетов в двумерной постановке, поскольку в расчете появляется кольцевой очаг горения в прилегающей к преграде зоне вблизи боковой поверхности ПСТ. Картина детонационного процесса в

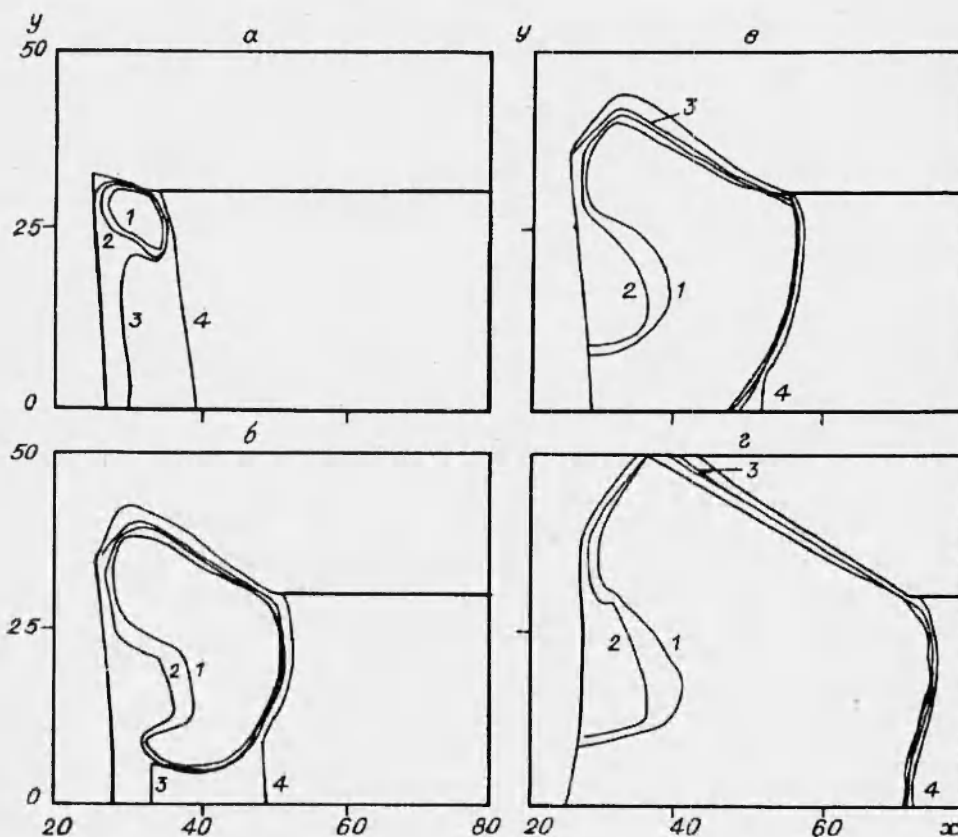


Рис. 7. Профиль концентрации ВВ $\xi(x, y)$ в образце ПСТ.
 ξ : 1 — 0,1, 2 — 0,8, 3 — 0,9, 4 — 1; t , мкс: а — 6, б — 8,3, в — 9, г — 11,4.

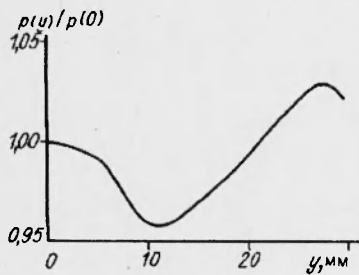


Рис. 8. Зависимость $p_{\phi}(y) > p_{\phi}(0)$.

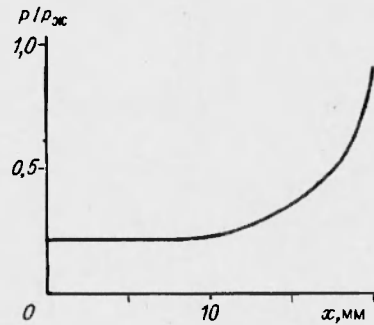


Рис. 9. Распределение давления $p(x)/p_*$ в активном ВВ (сферический расчет).

данном случае представлена на рис. 7, где приведены профили массовой концентрации ВВ $\xi(x,y)$ в различные моменты времени. Развитие детонации определяется очагом, имеющим первоначальную форму кольца с радиусом ~ 25 мм.

При выбранном законе кинетики ($d\xi/dt \sim p^6$) показанный на рис. 7 процесс может реализоваться, если давление на фронте УВ в ПСТ вблизи границы с преградой в удаленной от оси симметрии зоне окажется больше, чем в центре. Двумерный расчет, отличающийся от предыдущего только заменой ПСТ на инертное вещество с сохранением начальных параметров и уравнения состояния, подтверждает сказанное. Полученная в нем расчетная зависимость $p_{\phi}(y)/p_{\phi}(0)$ (y — расстояние от оси симметрии) показана на рис. 8. По мере удаления от оси вначале происходит снижение p_{ϕ} вследствие уменьшения угла падения ДВ на преграду. При дальнейшем увеличении y наблюдается подъем, и при $y > H$, где H — толщина активного ВВ, имеем $p_{\phi}(y) > p_{\phi}(0)$.

Для объяснения причины отмеченного явления привлечем качественные соображения. Если значительно увеличить поперечный размер рассматриваемой системы, то при большом удалении от оси симметрии ДВ в активном ВВ по отношению к преграде распространяется в скользящем режиме, а кривизна детонационного фронта стремится к нулю. Тогда для удаленных от оси точек с координатой $y \gg H$ распределение давления продуктов взрыва активного ВВ по толщине имеет форму «полочки», $p(x) = p_*$. В то же время, для $y \ll H$ профиль $p(x)$, определяемый сферически расходящейся ДВ, характеризуется резким спадом за детонационным фронтом. После распада разрыва по преграде в первом случае будет распространяться плоская УВ с постоянным давлением на фронте до прихода волны разрежения

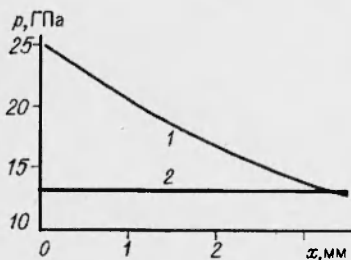


Рис. 10. Распределение $p(x)$ в преграде из оргстекла.

1 — сферический расчет; 2 — плоский расчет.

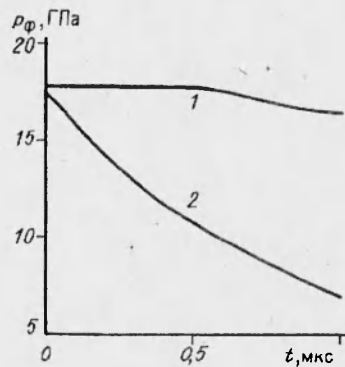


Рис. 11. Зависимость $p(t)$ на входе в ПСТ.

1 — плоский расчет; 2 — сферический расчет.

со свободной границы активного ВВ. Во втором случае по преграде идет сферически расходящаяся УВ с быстро спадающим по мере распространения давлением на фронте. Очевидно, что, начиная с некоторой толщины преграды, давление на фронте УВ в сечении $y \gg H$ будет больше, чем на оси симметрии.

Для численного моделирования рассмотренных режимов скользящей и нормальной детонации система 20 мм ВВ + 3,5 мм оргстекла + ПСТ рассчитывалась по одномерной программе «ВОЛНА» [16] в плоской и сферической конфигурации. В качестве начальных условий в плоской задаче в активном ВВ задавались параметры, соответствующие точке Жуге (кроме скорости ПВ, равной нулю), сферическая система инициировалась в центре. На рис. 9 приведен профиль давления $p(x)/p_{\infty}$ в активном ВВ для сферической системы в момент выхода ДВ на границу с оргстеклом. Рис. 10 показывает падение давления на фронте сферической УВ при ее движении по оргстеклу. Зависимость от времени давления на входе в ПСТ приведена на рис. 11, который наглядно иллюстрирует причины возникновения эффекта.

Таким образом, появление кольцевого очага горения в расчетах систем рассматриваемого типа определяется как геометрическими размерами активного ВВ, так и толщиной и свойствами вещества преграды. Можно предположить, что при радиусе инициирующей взрывчатки $R < H$ процесс взрывчатого превращения в исследуемом образце будет определяться только ударной волной на оси симметрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gibbs T.R., Popolato A. LAST Explosive Property Data. University of California, Berkeley, 1980.
2. Васильев М.Я. Детонация: Материалы VI Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. — Черногловка, 1980.
3. Бордзиловский С.А., Караханов С.М., Лобанов В.Ф. Моделирование ударного инициирования детонации гетерогенных ВВ // ФГВ. — 1987. — 23, № 5. — С. 132.
4. Бушман А.В., Канель Г.И. и др. Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий. — Черногловка, 1988.
5. Альтшулер Л.В., Доронин Г.С., Жученко В.С. Режимы детонации и параметры Жуге конденсированных взрывчатых веществ // ФГВ. — 1989. — 25, № 2. — С. 84.
6. Ramsay J.B. 8th Symposium (International) on Detonation. USA, 1985.
7. Vanperpynqhe J. et al. 8th Symposium (International) on Detonation. USA, 1985.
8. Баталова М.В., Бахрах С.М., Зубарев В.Н. Возбуждение детонации в гетерогенных ВВ ударными волнами // ФГВ. — 1980. — 16, № 2. — С. 105.
9. Лобанов В.Ф. Моделирование детонационных волн в гетерогенном конденсированном ВВ // ФГВ. — 1980. — 16, № 6. — С. 113.
10. Куропатенко В.Ф. Уравнение состояния продуктов детонации плотных ВВ // ФГВ. — 1989. — 25, № 6. — С. 112.
11. Shorohov E.V., Litvinov B.V. Proc. XIII AIRAPT International Conference on High Pressure Science and Technology. India, 1991.
12. Жерноклетов М.В., Зубарев В.Н., Телегин Г.С. // ПМТФ. — 1969. — № 4. — С. 127.
13. Зубарев В.Н., Евстигнеев А.А. Уравнения состояния продуктов взрыва конденсированных ВВ // ФГВ. — 1984. — 20, № 6. — С. 114.
14. Cooper P.W. 9th Symposium (International) on Detonation. USA, 1989.
15. Anuchina N.N., Es'kov N.S. et al. Russian / U.S. Weapons Laboratories Introductory Technical Exchange in Computational and Computer Science. USA, 1992.
16. Куропатенко В.Ф., Коваленко Г.В. и др. Комплекс программ ВОЛНА и неоднородный разностный метод для расчета неустановившихся движений сжимаемых сплошных сред // Вопросы атомной науки и техники. Математическое моделирование физических процессов. — 1989. — Вып. 1.

454070, г. Челябинск
ВНИИТФ

Поступила в редакцию
5/X 1992,
после доработки 5/V 1994