

О ВЛИЯНИИ УСЛОВИЙ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ПОВЕДЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ВЗРЫВЧАТОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ТЭНА

В. К. Голубев, А. П. Погорелов

ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

Представлены результаты исследования откольного разрушения и возбуждения взрывчатого превращения в пластическом взрывчатом составе ТП-83 при ударно-волновом нагружении. В первом случае образцы толщиной 20 мм нагружались ударом стальных пластин толщиной 1,0 и 1,6 мм, разгоняемых взрывом до скоростей $120 \div 420$ м/с, во втором случае — до скоростей $430 \div 580$ м/с. Кроме того, во втором случае образцы толщиной 5 мм нагружались ударом медных пластин толщиной $0,10 \div 0,28$ мм, разгоняемых до скоростей $590 \div 1250$ м/с. Расчет условий нагружения образцов выполнялся в упругопластической постановке. Установлены и аналитически представлены взаимосвязи нагрузок, приводящих к откольному разрушению взрывчатого состава и к возбуждению в нем взрывчатого превращения, с реализуемыми условиями ударно-волнового нагружения.

Особенностям поведения взрывчатых веществ в условиях ударно-волнового нагружения посвящено значительное число исследований. Одним из основных методов нагружения при подобных исследованиях является удар быстролетающей пластины по образцу. С помощью этого метода проведены многочисленные исследования возбуждения процесса взрывчатого превращения во взрывчатых составах и его перехода в нормальную детонацию. Во многих случаях полученные экспериментальные результаты достаточно хорошо описываются на основании концепции критической энергии ударного инициирования [1–4]. В то же время число исследований откольного разрушения взрывчатых составов при ударном нагружении довольно ограничено. Получены лишь отдельные результаты по влиянию температуры и исходного состояния образца на откольное разрушение [5, 6].

В принципе, поведение образцов взрывчатого состава при их нагружении ударом пластины с последовательным увеличением ее скорости можно представить следующим упрощенным образом. До некоторой скорости удара образец сохраняет свою макроскопическую целостность, далее начинается его разрушение в волнах разрежения, обусловленное отколом и фрагментацией, увеличивающейся с повышением скорости удара. При определенной скорости удара волна сжатия приводит к возбуждению взрывчатого превращения в об-

разце, а дальнейшее повышение скорости способствует реализации условий перехода этого нестационарного процесса в нормальную детонацию. В данной работе рассматривается поведение пластического взрывчатого состава ТП-83, обусловленное как его откольным разрушением в волнах разрежения, так и возбуждением взрывчатого превращения в волнах сжатия.

Образцы в форме дисков с размерами $\varnothing 120 \times 20$ мм и $\varnothing 50 \times 5$ мм) изготавливали из состава ТП-83 методом прессования. Этот пластический состав содержит не менее 83 % (по массе) высокодисперсного тэна и не более 17 % полимерного связующего — полиизобутилена. Образцы первого типа нагружали ударом стальных пластин толщиной $h_p = 1,0$ и 1,6 мм, а второго типа — ударом медных пластин (фольг), $h_p = 0,10, 0,15$ и 0,28 мм. Форма нагружающих ступенчатых импульсов для ударника из стали, определяющая характер спада давления за фронтом, была подобна форме этих импульсов для ударника из меди, поскольку значения акустических импедансов $\rho_0 c_0$ этих материалов близки. Пластины-ударники разгоняли до необходимых скоростей w_p скользящей детонацией листов того же пластического состава ТП-83. Схемы нагружения, уже использовавшиеся при проведении аналогичных исследований [3, 6], были откалиброваны заранее. Опыты с использованием медных фольг в качестве ударников проводили в ваку-

умной камере. Сохранность фольг при разгоне проверяли в серии предварительных опытов.

Эксперименты по откольному разрушению выполняли с полным сохранением всех фрагментов нагруженных образцов. Характер и степень разрушения образцов наблюдали визуально. Среднюю толщину фрагментов первого откольного слоя h_s измеряли с помощью микрометра в десяти точках фрагмента, среднее значение округляли до десятых долей миллиметра. Для нахождения условий возбуждения взрывчатого превращения находили диапазон скоростей удара, соответствующий переходу от разрушения образца на большое число фрагментов к разрушению устройства для крепления образцов в результате взрыва образца.

Условия ударно-волнового нагружения образцов изучали с использованием программы численного расчета одномерных упругопластических течений [7]. Полные диаграммы действующего в процессе нагружения — разгрузки продольного напряжения σ выводили в тех лагранжевых координатах, которые соответствуют толщинам образующихся откольных слоев, а также в близлежащей области. Плотность ячеек расчетной сетки в примыкающей к тыльной поверхности зоне образца шириной 5 мм и в зоне стального ударника составляла 50 мм^{-1} , в остальном объеме взрывчатого вещества снижалась до 20 мм^{-1} . При определении условий возбуждения взрывчатого превращения основное внимание уделялось нагружаемой поверхности образца. В случае нагружения образцов стальными пластинами плотность ячеек расчетной сетки равнялась 50 мм^{-1} , а при использовании тонких медных пластин она увеличивалась до 500 мм^{-1} .

В выполненных расчетах для состава ТП-83, а также для материалов ударника (низкоуглеродистой стали Ст. 3 и меди) использовалось уравнение состояния в форме Ми — Грюнайзена:

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2}{n} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right] + \gamma \rho E_t.$$

Здесь p — давление, ρ — плотность материала, ρ_0 — его начальная плотность, E_t — удельная тепловая энергия, c_0 — объемная скорость звука, γ — параметр Грюнайзена. Параметр n подбирали с использованием данных по ударно-волновой сжимаемости материалов в области относительно низких давле-

Таблица 1

Материал	ρ_0 , г/см ³	c_0 , км/с	n	γ	Y , МПа	ν
Сталь	7,85	4,63	4,21	1,70	750	0,28
Медь	8,93	3,91	4,85	1,96	140	0,35
ТП-83	1,52	1,27	6,51	0,50	10	0,36

ний. Упругопластические свойства учитывали путем задания динамического предела текучести Y и коэффициента Пуассона ν . Подобранные на основании известных экспериментальных данных и использованные в расчетах параметры уравнения состояния и упругопластические свойства материалов ударника и образца приведены в табл. 1.

На рис. 1 показан характер распространения нагружающего импульса в образце при ударе стальной пластины толщиной 1,0 мм со скоростью 190 м/с для случаев, когда динамический предел текучести взрывчатого состава принимался равным нулю (гидродинамическое поведение), а также при $Y = 10$ и 20 МПа. Приведенные профили напряжения соответствуют моментам выхода волновых возмущений на указанные на рис. 1 координаты x , отсчитываемые от нагружаемой поверхности образца. Видно, что уже на расстоянии $x = 10$ мм первоначально имеющий ступенчатую форму импульс становится монотонно спадающим для всех рассмотренных значений Y . В работе [6] с использованием манганиновых

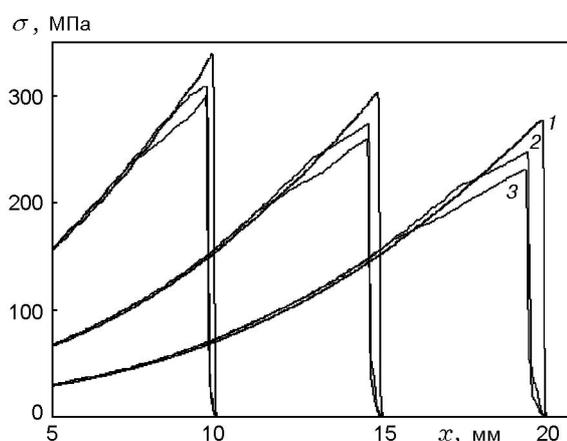


Рис. 1. Характер распространения нагружающего импульса в образце при ударе стальной пластины:

$h_p = 1,0$ мм, $w_p = 190$ м/с, $Y = 0$ (1), 10 (2), 20 МПа (3)

Таблица 2

h_p , мм	w_p , м/с	h_s , мм	σ_t , МПа	σ_0 , МПа	$\Delta\sigma/\Delta x$, МПа/мм
1,6	128	2,5	51	279	20
	180	2,0	60	415	30
	250	1,7	68	619	40
	330	1,5	71	877	47
	404	1,2	72	1146	60
1,0	150	2,1	59	334	28
	200	1,8	66	470	37
	275	1,6	75	697	47
	345	1,4	78	930	56
	413	1,0	65	1180	65

датчиков давления изучался процесс распространения нагружающего импульса при подобных условиях нагружения образца взрывчатого состава ГТК-70 (70 % гексогена, 30 % тротилколлоксилинового связующего). Наиболее приемлемое согласие между экспериментальными и расчетными результатами было получено при $Y = 20$ МПа. Поскольку состав ТП-83 является менее прочным, во всех последующих расчетах для него использовалось значение $Y = 10$ МПа.

Результаты проведенных опытов и выполненных расчетов по определению условий откольного разрушения образцов состава ТП-83 представлены в табл. 2. Здесь σ_t — максимальное растягивающее напряжение на координате откола, σ_0 — максимальное сжимающее напряжение в образце у поверхности удара, $\Delta\sigma/\Delta x$ — градиент напряжения в растягивающем импульсе, значение которого оценивается как σ_t/h_s . Предполагалось, что условная величина разрушающей нагрузки (σ_t) может быть в какой-то степени взаимосвязана с параметрами, характеризующими интенсивность и скорость ударно-волнового нагружения (σ_0 , $\Delta\sigma/\Delta x$). И действительно, уже поверхностное рассмотрение результатов позволяет отметить определенный рост σ_t при увеличении значений выбранных параметров. На рис. 2 показаны диаграммы растягивающего напряжения в нескольких образцах в сечениях, соответствующих отколу, для различных скоростей удара.

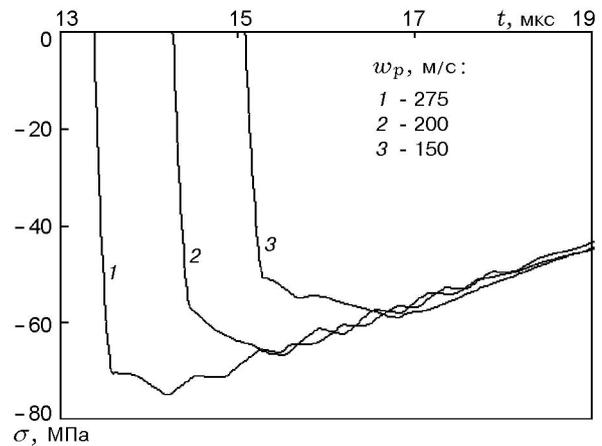


Рис. 2. Диаграммы растягивающего напряжения в сечениях, соответствующих откольному разрушению, при нагружении образцов ударом стальной пластины толщиной 1,0 мм с различными скоростями

В качестве предварительного шага по систематизации полученных результатов по определению условий откольного разрушения исследуемого состава было определено среднее значение разрушающей нагрузки $\bar{\sigma}_t = 66,5$ МПа и стандартное отклонение $s = 8,2$ МПа для совокупности результатов (выборки). Далее было сделано предположение, что зависимость разрушающей нагрузки от параметров, характеризующих условия нагружения, может быть выражена в виде простого линейного соотношения

$$\sigma_t = a + b\Delta\sigma/\Delta x + c\sigma_0. \quad (1)$$

Полученные с использованием метода регрессионного анализа параметры приведены в табл. 3. Здесь N — число рассмотренных результатов; a , b и c — коэффициенты регрессии со своими стандартными отклонениями s_a , s_b и s_c ; R — коэффициент корреляции. При рассмотрении и анализе всех приведенных в табл. 2 результатов ($N = 10$) было отмечено, что один из них (случай $h_s = 1,0$ мм) несколько выпадает из общей совокупности. Приведенные в табл. 3 параметры для случая $N = 9$ ука-

Таблица 3

N	a , МПа	s_a , МПа	b , мм	s_b , мм	c	s_c	R^2	s , МПа
10	40,1	8,5	1,18	0,59	-0,0347	0,0264	0,656	5,4
9	34,3	4,0	1,31	0,26	-0,0325	0,0118	0,940	2,4

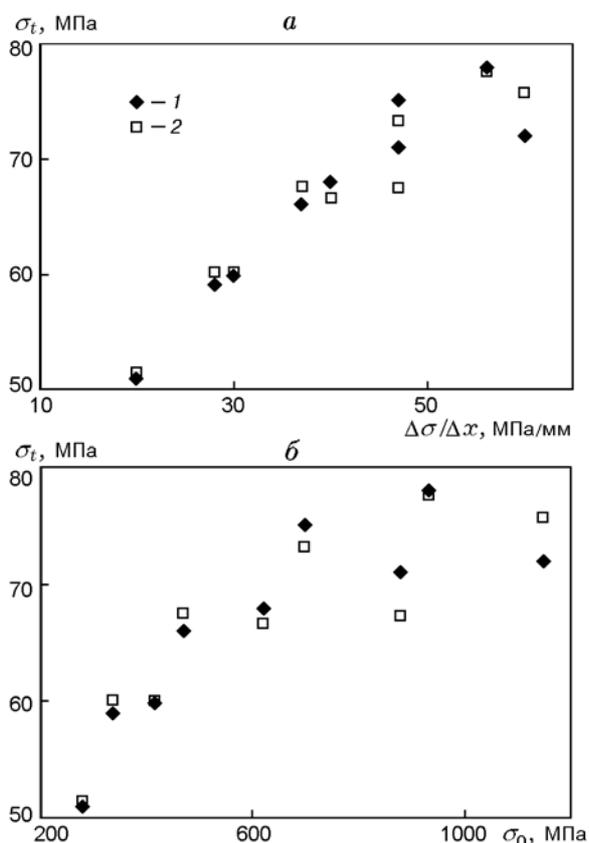


Рис. 3. Результаты определения условий откольного разрушения образцов (1) и их представление с использованием уравнения регрессии (2) в виде зависимостей разрушающей нагрузки от градиента давления в растягивающем импульсе (а) и от интенсивности нагружающей ударной волны (б)

зывают на существенное повышение качества регрессии. Наглядно правомерность использования подобного подхода к обработке данных иллюстрирует рис. 3, где сопоставлены исходные и предсказанные с применением соотношения (1) значения σ_t .

Результаты проведенных опытов и выполненных расчетов по определению условий возбуждения взрывчатого превращения в образцах состава ТП-83 представлены в табл. 4 (τ — характерное время действия напряжения σ_0). На рис. 4 приведены диаграммы сжимающего напряжения на поверхности образцов для условий нагружения, при которых была зафиксирована начальная стадия возбуждения взрывчатого превращения. Как показали результаты выполненных расчетов, при использовании медного ударника $\tau = 2h_p/c_0$, а при использовании стального ударника значение c_0

Таблица 4

Материал ударника	h_p , мм	w_p , м/с	σ_0 , МПа	τ , мкс	Результат
Сталь	1,6	431	1247	0,532	—
		474	1414		—
		494	1494		+
		506	1543		+
	1,0	439	1277	0,333	—
		450	1320		—
484		1454	—		
527		1629	+		
Медь	0,28	590	1865	0,143	—
		680	2271		+
	0,15	730	2509	0,077	—
		770	2705		—
		850	3113		+
		900	3380		+
	0,1	1030	4114	0,051	+
		1250	5488		+

Примечание. Знак «минус» означает отсутствие взрывчатого превращения, знак «плюс» — его наличие.

в этой формуле должно быть заменено значением продольной упругой скорости звука $c_e = c_0 \sqrt{3(1-\nu)/(1+\nu)}$.

С целью систематизации полученных результатов по определению условий возбуждения в исследуемом составе взрывчатого превращения было рассмотрено возможное влияние параметров ударно-волнового нагружения (σ_0 , E_0 , τ) на процесс передачи образцу взрывчатого состава энергии E и импульса I от пластины-ударника. На рис. 5 приведены соответствующие критические значения σ_0 и τ и показана их аппроксимация с использованием зависимостей

$$\sigma_0 = a + b/\tau^c, \quad (2)$$

$$\sigma_0 = b/\tau^c. \quad (3)$$

Полученные параметры регрессии представлены в табл. 5. В ней приведены также параметры для зависимости

$$\sigma_0 = b/\tau^{0,5}, \quad (4)$$

соответствующей широко используемому критерию $p_0^2 \tau = \text{const}$ [4]. Из этого критерия, согласно анализу [1], следует необходимость постоянства критического значения переданной образцу за время τ энергии

$$E_0 = \sigma_0 u \tau. \quad (5)$$

Таблица 5

Определение $E_0(\tau)$ по формуле	a	s_a	b	s_b	c	s_c	R^2	s
(2)	1212	63	145	28	1,01	0,06	0,999	34
(3)	—	—	965	116	0,475	0,047	0,977	191
(4)	—	—	907	26	0,5	—	0,975	173

Примечание. Размерности: σ — МПа, τ — мкс.

Здесь u — массовая скорость. Вычисленные значения удельной (на единицу поверхности) энергии, а также их отношения к значениям кинетической энергии ударников $E_p = \rho_0 h_p w_p^2 / 2$ приведены на рис. 6. Здесь же показана их аппроксимация с использованием зависимостей

$$E_0 = a + b\tau, \quad (6)$$

$$E_0/E_p = a + b\tau + c\tau^2. \quad (7)$$

Полученные параметры регрессии приведены в табл. 6.

Характер передачи образцу взрывчатого состава механического импульса показан на рис. 7. Условия нагружения соответствуют здесь приведенным на рис. 4 критическим условиям возбуждения взрывчатого превращения, а зависимости переданного импульса от времени получены интегрированием соответствующих временных зависимостей для напряжения: $I(t) = \int \sigma(t) dt$. Здесь в качестве ориентировочного критического значения импульса может быть принято значение 0,8 ГПа · мкс.

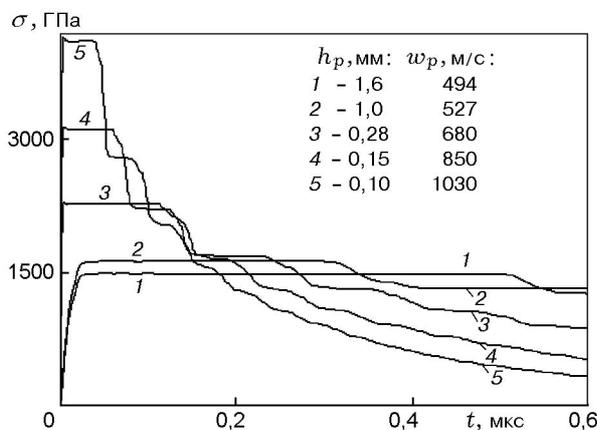


Рис. 4. Диаграммы сжимающего напряжения в образцах у поверхности удара при нагружении стальными (1, 2) и медными (3–5) пластинами разной толщины и с различными скоростями

В момент времени $t = 0,53$, что соответствует значению τ для самого толстого ударника, все зависимости $I(t)$ сходятся в достаточно узкой окрестности этой критической величины импульса.

Полученные результаты позволяют сделать некоторые выводы относительно поведения исследуемого взрывчатого состава при ударно-волновом нагружении. Определенные значения разрушающих нагрузок находятся в диапазоне 51 ÷ 78 МПа и достаточно отчетливо проявляют взаимосвязанную, выявленную в результате регрессионного анализа тенденцию к повышению при увеличении градиента давления в растягивающем импульсе и к снижению при увеличении давления в нагружающей ударной волне. Подобная тенденция наблюдается и для других взрывчатых составов, в частности для состава ГТК-70 [6]. Она вполне объяснима тем, что градиент давления характеризует форму импульса, т. е. его длительность, а увеличение давления приводит к повышению дефектности состава за счет образующихся очагов химического разложения.

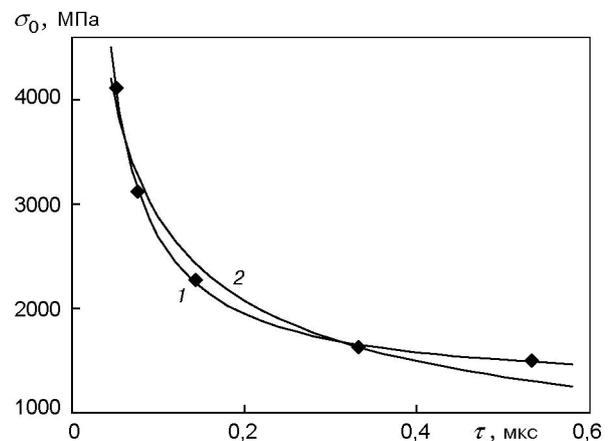


Рис. 5. Условия возбуждения взрывчатого превращения и их представление в виде зависимостей (2), (3) (кривые 1 и 2 соответственно)

Таблица 6

Определение $E_0(\tau)$ по формуле	a	s_a	b	s_b	c	s_c	R^2	s
(6)	16,7	0,6	28,7	2,1	—	—	0,984	0,8
(7)	0,444	0,009	-0,828	0,088	0,719	0,150	0,996	0,007

Примечание. Размерность E_0 — Дж/см².

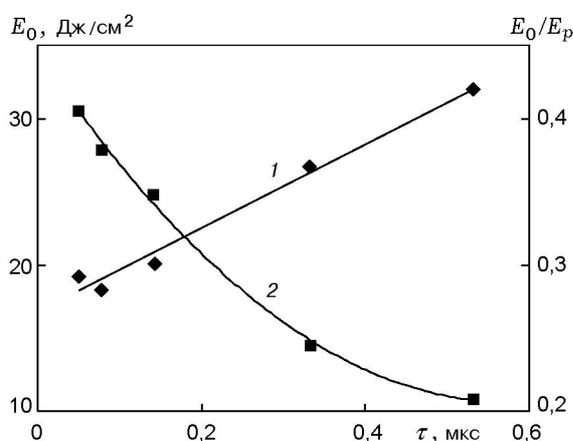


Рис. 6. Энергетические условия возбуждения взрывчатого превращения и их представление в виде зависимостей (6) и (7) (кривые 1 и 2 соответственно)

Определенные условия возбуждения взрывчатого превращения характеризуются диапазоном давлений 1,5 ÷ 4,1 ГПа и отчетливой тенденцией к повышению давления инициирования при уменьшении характерного времени нагружения, которое варьировалось в диапазоне 0,051 ÷ 0,53 мкс. Для описания этих условий наиболее приемлема эмпирическая зависимость (2), наилучшим образом отражающая выявленную для исследуемого состава тенденцию. Подобная тенденция свойственна и другим взрывчатым составам. Зависимости вида (4), (5), выражающие концепцию критической энергии ударного инициирования, хорошо описывают экспериментальные результаты для взрывчатого состава РВХ-9404 [1, 4]. Использование же этих зависимостей для исследуемого состава ТП-83 и ряда других взрывчатых составов [2, 3] уже менее эффективно, хотя и удобно для анализа результатов и сопоставления ударно-волновой чувствительности различных взрывчатых веществ.

ЛИТЕРАТУРА

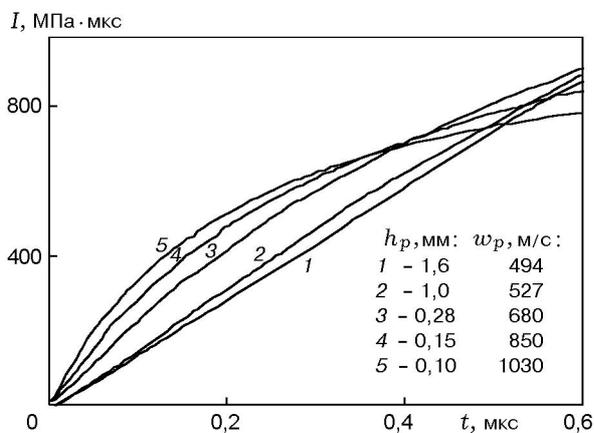


Рис. 7. Характер передачи механического импульса образцам

- Walker F. E., Wasley R. J. Critical energy for initiation of heterogeneous explosives // Explosivstoffe. 1969. Bd 17, N 1. P. 9–13.
- Longueville Y., Fauquignon C., Moulard H. Initiation of several explosives by a given duration shock wave // Proc. of the Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. Office of Naval Research, 1976. P. 105–114.
- Погорелов А. П., Глушак Б. Л., Новиков С. А., Сеницын В. А. Исследование зависимости давления инициирования состава ТГ 50/50 от длительности действия импульса при ударе тонкими стальными пластинами // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 2. С. 294–296.
- Weingart R. C., Jackson R. K., Honodel C. A. Shock initiation of PBX-9404 by electrically driven flyer plates // Propellants and Explosives. 1980. V. 5, N 6. P. 158–162.
- Голубев В. К., Новиков С. А., Соболев Ю. С. О влиянии нагрева на откольное

- разрушение некоторых взрывчатых составов // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 5. С. 129–131.
6. **Голубев В. К., Погорелов А. П.** О влиянии условий нагружения и исходного состояния на откольное разрушение взрывчатого состава на основе гексогена // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 5. С. 18–22.
7. **Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. Н., Софронов В. Р.** Программа УПОК для решения задач механики сплошной среды в одномерном комплексе // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1982. Вып. 3(11). С. 11–21.

*Поступила в редакцию 20/VIII 1999 г.,
в окончательном варианте — 10/IV 2000 г.*
