

УДК 623.454.242

DOI: 10.53403/9785951504937\_188

# Численное моделирование работы слэпперного детонатора на основе малочувствительного взрывчатого вещества

**А. В. Скляров, П. А. Устимкин,  
А. А. Селезнев, С. А. Чевтаев,  
Н. А. Абрамов**

*Представлены результаты численного моделирования процессов, протекающих при срабатывании детонаторов слэпперного типа. Построена и верифицирована математическая модель процесса нагружения малочувствительного взрывчатого вещества гексанитростильбена импульсом короткой длительности. Определены условия инициирования гексанитростильбена. Верифицирована модель метания ударника, формируемого продуктами детонации взрывчатого вещества. Сделаны выводы о влиянии конструктивных особенностей детонатора и физических свойств материала пластины-ударника на скорость ее метания.*

## *Введение*

В настоящее время является актуальной задача создания боеприпасов нового поколения, которые должны обладать повышенной стойкостью к внешним воздействиям и поражающим факторам [1]. Для ее решения ведутся разработки новых типов энергетических материалов, требующих, в свою очередь, создания новых средств инициирования. Долгое время в качестве инициирующих устройств применялись детонаторы, использующие энергию взрывающейся тонкой проволоки. Предполагается, что боеголовки нового поколения самонаводящихся, адаптивных и высокоскоростных проникающих снарядов должны иметь усовершенствованные системы одноточечного и многоточечного инициирования на основе слэпперных детонаторов (англ. exploding foil initiator – EFI) [2]. Слэпперный детонатор (рис. 1) обладает набором характеристик, которые позволяют ему считаться одним из наиболее безопасных: высокой стойкостью к пулеосколочному воздействию, стойкостью к внешним токам наводки, отсутствием контакта между взрывчатым веществом (ВВ) и токопроводящим мостиком.

## 1. Физическая модель функционирования слэпперного детонатора

Слэпперный детонатор (см. рис. 1) [3] состоит из колпачка 1, шашки промежуточного заряда взрывчатого вещества 2, запрессованного в металлическую втулку 3. К металлической втулке прилегает слой из пленки-изолятора 4, разделяющей инициирующее устройство и инициируемое ВВ. Инициирующее устройство состоит из поликоровой подложки 8, тонкого металлического мостика 7, укрывающей мостик полимерной пленки 6 и диафрагмы 5.

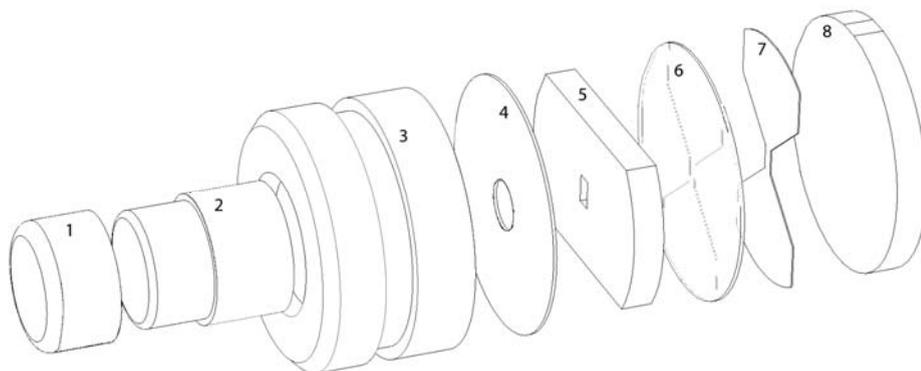


Рис. 1. Слэпперный детонатор: 1 – колпачок, 2 – навеска ВВ, 3 – втулка, 4 – полимерная изоляция, 5 – диафрагма, 6 – полимерная пленка, 7 – мостик, 8 – подложка

При прохождении электрического тока по мостику происходит взрывное испарение металла, в результате чего формируется импульс давления, выдавливающий полимерную пленку 6 в окно диафрагмы 5 инициирующего устройства. Метаемый таким способом слэппер разгоняется в канале диафрагмы под действием расширяющихся продуктов испарения мостика и к моменту соприкосновения с ВВ достигает скорости около 4 км/с. При ударе слэппера о заряд ВВ реализуется импульс высокого давления и малой длительности, вызывающий детонацию последнего. Образующиеся в результате детонации ВВ продукты взрыва расширяются и формируют из металлического колпачка 1 ударник, предназначенный для инициирования основного заряда ВВ.

Для снаряжения слэпперных детонаторов применяется взрывчатое вещество пониженной чувствительности гексанитростильбен (ГНС). Детонаторы, снаряженные ГНС, сохраняют работоспособность при действии ударных нагрузок высокой интенсивности, возникающих, в частности, при пулеосколочном воздействии на боеприпасы. Прогнозирование и исключение возможных нестабильностей в работе с применением расчетно-теоретических методов на этапе проектирования позволит сократить количество проводимых опытов.

Для математического моделирования процесс работы слэпперного детонатора может быть разделен на три этапа: взрывное испарение электрического проводника и метание слэппера, инициирование детонации малочувствительного ВВ слэппером, метание колпачка ударника продуктами взрыва.

## 2. Инициирование детонации гексанитростильбена

Рассмотрим процесс инициирования детонации малочувствительного ВВ гексанитростильбена.

В рамках разрабатываемой модели решаются три задачи: константное обеспечение уравнений состояния (УРС) используемых материалов, построение расчетной модели ударно-волнового

нагружения и определение критических параметров инициирования ГНС с помощью методов математического моделирования.

Для определения параметров состояния материала при его ударно-волновом сжатии можно использовать УРС в форме Ми – Грюнайзена [4]

$$P(\rho, T) = P_y(\rho) + \gamma \rho E_T(T), \quad (1)$$

$$E(\rho, T) = E_y(\rho) + E_T(T), \quad (2)$$

где  $\rho$ ,  $T$  – плотность и температура материала;  $P$ ,  $E$  – давление и удельная внутренняя энергия;  $P_y$ ,  $E_y$  – упругая составляющая давления и внутренней энергии;  $E_T$  – тепловая составляющая внутренней энергии;  $\gamma$  – коэффициент Грюнайзена.

Уравнения (1) и (2) совместно с уравнениями сохранения на ударном скачке могут быть разрешены относительно давления на фронте ударной волны  $P_\Gamma$  [4]:

$$P_\Gamma = \frac{\rho_0 C_0^2}{n} \frac{\left[ \left( h - \frac{n+1}{n-1} \right) \sigma^n + \frac{2n\sigma}{n-1} - (h+1) \right]}{h - \sigma}, \quad (3)$$

где  $C_0$  – скорость звука в материале,  $n$  – показатель степени в уравнении Мурнагана для упругого давления,  $\rho_0$  – начальная плотность материала,  $\sigma = \frac{V_0}{V}$ ,  $E_y = \int_V^{V_0} P_y dV$ ,  $V = \frac{1}{\rho}$ ,  $h = 1 + 2/\gamma$ .

Приведенные соотношения позволяют полностью определить УРС Ми – Грюнайзена путем подбора параметров  $n$  и  $h$  с целью установления максимального соответствия опытным данным по ударно-волновому сжатию. В соответствии с изложенным подходом были подобраны параметры для определения свойств твердой фазы ГНС и слэппера из полиимид-фторопластовой пленки. Ударные адиабаты материалов были получены на основе молекулярно-динамических расчетов и экспериментальных данных [5]. Плотность материалов при нормальных условиях, показатель степени в уравнении Мурнагана и коэффициент Грюнайзена приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры УРС материалов, задействованных в инициировании ГНС

Материал	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$n$	$\gamma$
Кристаллический ГНС	1,745	4,7	1,4
Пористый ГНС	1,600	8,7	1,7
Полиимид	1,414	3,5	1,5
Фторопласт	2,204	5,7	1,2

Для подтверждения корректности выстраиваемой математической модели использовались, в частности, результаты экспериментов по ударно-волновому нагружению пористого ГНС, приведенные в работе [6]. В табл. 2 приведены результаты расчетов с применением программного комплекса Master Professional [7] в сравнении с результатами экспериментов [6].

В [6] показано, что ударно-волновое инициирование ГНС (при нагружении полимерными ударниками) происходит при достижении давления инициирующего импульса 10 ГПа при длительности 0,02 мкс. Для получения данных о кинетике нагружения ВВ в составе слэпперного детонатора была построена трехмерная модель взаимодействия ГНС с малым (0,2×0,4 мм) со-

ставным полиимид-фторопластовым слэппером. В результате моделирования получено, что инициирующее давление на границе раздела слэппер – заряд ГНС реализуется в промежутке времени до 0,026 мкс при скорости слэппера не менее 2,8 км/с (табл. 3).

Таблица 2

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов

Скорость ударника, км/с	Напряжение в ГНС [6], ГПа	Напряжение в ГНС [7], ГПа
0,503	1,25	1,30
0,814	2,72	2,76
0,951	3,30	3,67
1,164	4,33	4,48
1,346	5,28	5,25

Таблица 3

Давление на фронте ударной волны в ГНС при соударении со слэппером

V, км/с	P, ГПа
2,20	6,74
2,40	7,68
2,60	8,84
2,80	10,20
3,00	12,00
3,20	12,66
3,40	15,10

### 3. Моделирование метания ударника в составе слэпперного детонатора

В результате детонации заряда ГНС расширяющиеся продукты взрыва формируют из колпачка (рис. 2,а) или диска (рис. 2,б) ударник, предназначенный для инициирования основного заряда ВВ. Рассмотрим процесс метания ударника продуктами взрыва заряда ГНС. Для численного моделирования поведения продуктов взрыва использовалось уравнение состояния в форме Джонса – Уилкинса – Ли (JWL) [8, 9]:

$$P = A \left( 1 - \frac{w\eta}{R_1} \right) e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B \left( 1 - \frac{w\eta}{R_2} \right) e^{-\frac{R_2}{\eta}} + w\rho e, \quad \eta = \frac{\rho}{\rho_0}. \quad (4)$$

Для описания поведения конструкционных материалов в условиях ударно-волнового нагружения использовалось УРС в форме Ми – Грюнайзена (1), при этом упругая составляющая давления отождествлялась с давлением Гюгионо. Для определения зависимости скорости полета ударника в слэпперном детонаторе от времени были проведены расчеты по схеме рис. 2. Данные по ударно-волновому нагружению принимались в соответствии с [10].

С целью верификации построенной модели была проведена серия экспериментов, где варьировались различные параметры системы (см. рис. 2): высота втулки  $H$ , масса навески ГНС, а также толщина  $h$ , материал, тип и глубина утопания  $\Delta$  ударника. В табл. 4 приведены экспериментальные параметры системы, определявшие геометрию математической модели.

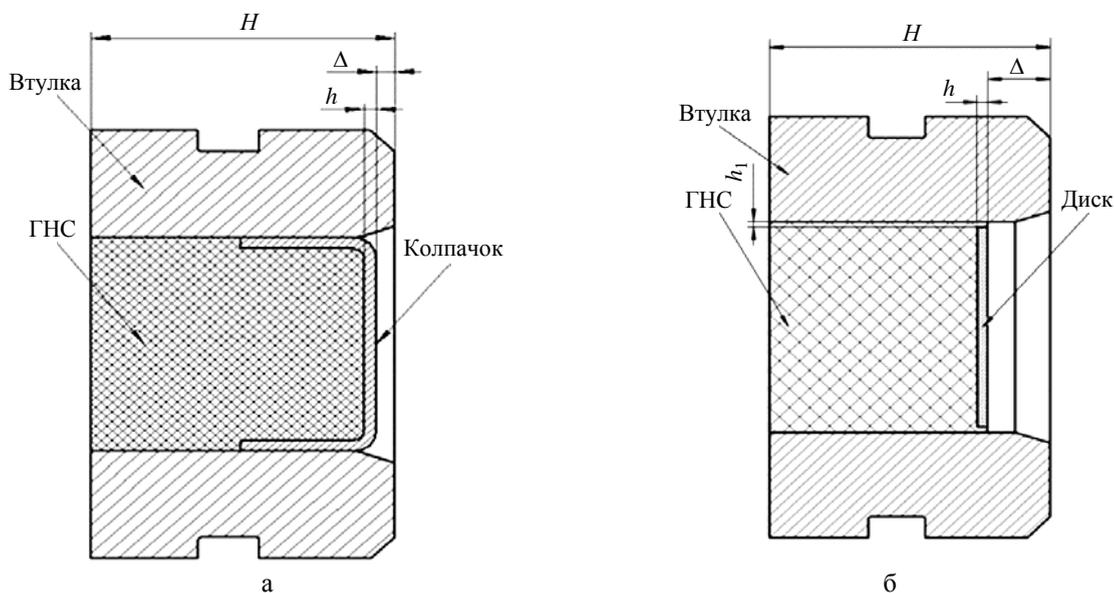


Рис. 2. Втулка слэпперного детонатора, снаряженная ГНС

Таблица 4

Экспериментальные измерения скорости ударника

Масса ГНС, мг	Параметры колпачка			Скорость, м/с
	Материал, тип ударника	$h$ , мкм	$\Delta$ , мм	
10	Ni, колпачок	100	0,05–0,25	1786
				1756
5	Ni, колпачок	100	1,12	1302
				1272
10	Ni, диск	95	0,54	1453
10	Ni, диск	50	0,51	2210

Для сравнения результатов численного моделирования с экспериментом на рис. 3 показаны графики зависимости скорости ударника от времени, полученные с помощью экспериментальной методики PDV и в расчетах.

Изложенная методика позволяет оценить влияние различных факторов на скорость метаевого ударника. В частности, было оценено влияние размера зазора  $h_1$  между ударником типа «диск» и втулкой (см. рис. 2,б). На рис. 4 показана зависимость скорости ударника от размера зазора, полученная на расстоянии 0,3 мм от поверхности ударника.

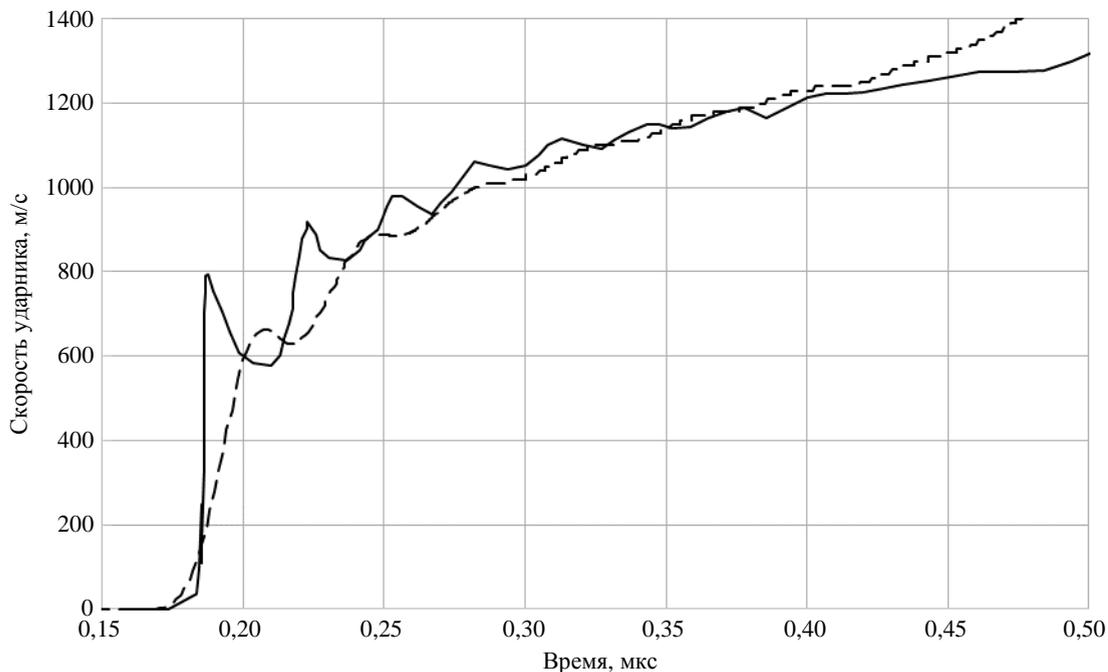


Рис. 3. Результаты измерения скорости ударника экспериментальным методом PDV (—) и расчетные данные (---)

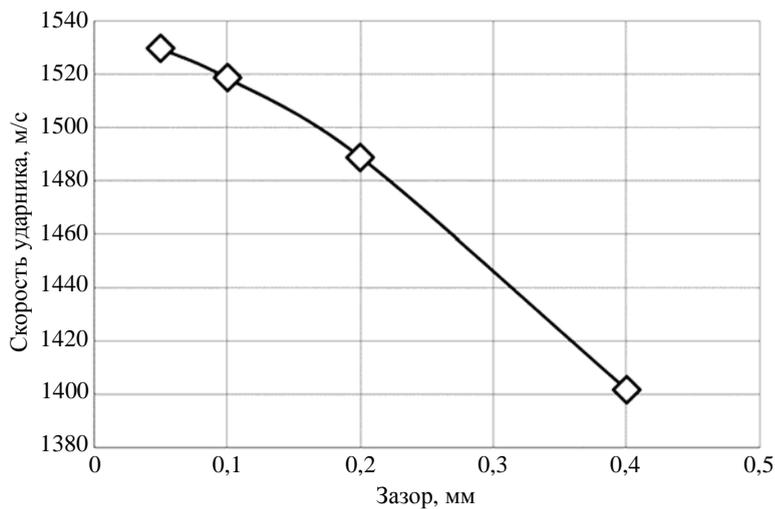


Рис. 4. Зависимость фиксируемой скорости ударника от размера зазора

Видно снижение скорости метания ударника с ростом зазора. Таким же образом могут быть смоделированы различные модификации слэпперного детонатора в условиях изменяющейся конструкции и номенклатуры применяемых конструкционных материалов.

## *Заключение*

Разработана методика численного моделирования ряда процессов, протекающих при срабатывании слэпперного детонатора. В частности, создана численная модель формирования и метания ударника продуктами детонации, проведена верификация модели, сделаны выводы о влиянии некоторых параметров системы на скорость ударника.

Методика позволяет прогнозировать поведение слэпперного детонатора в составе боеприпасов и систем инициирования гражданского назначения и, следовательно, снижать затраты на обработку изделий и обеспечение надежности их срабатывания.

## *Список литературы*

1. Бабкин А. В., Велданов В. А., Грязнов Е. Ф., Имховик Н. А. Средства поражения и боеприпасы. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.
2. Patent US 4788913A (1971). Flying-plate detonator using a high-density high explosive / Ornelas D. L., Stroud J. R.
3. Patent US 5370053A (1993). Slapper detonator / Werling S. V., Williams M. R.
4. Глушак Б. Л. Начала физики взрыва. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011.
5. Wixom R. R. First-principles prediction of equations of state for molecular crystal explosives // Proc. of the Int. Con. Shock Waves in Condensed Matter. – Kiev, 2012. P. 99.
6. Хейес Д., Митчелл Д. Уравнение, описывающее поведение пористого гексанитростильбена в ударных волнах // Детонация и взрывчатые вещества. – М.: Мир, 1981. С. 392.
7. Крючков И. А., Павлов С. В., Руденко В. В. Моделирование физических процессов на гибридных вычислительных системах в рамках программного комплекса Master Professional // Сб. докл. 10-й науч.-техн. конф. «Молодежь в науке». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011.
8. Urtiew P. A., Hayes B. Parametric study of dynamic JWL-EOS for detonation products // Физика горения и взрыва. 1991. № 4. С. 126–127.
9. Finger, Lee. High Explosives Equation of State // LLL Memorandum, 1972.
10. Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.

## **The Numerical Modelling of Exploding Foil Initiator Based on Low-Sensitive Explosive**

A. V. Sklyarov, P. A. Ustimkin, A. A. Selezenev, S. A. Chevtaev, N. A. Abramov

*The results of numerical simulation of processes occurring when the slapper type detonators are triggered are presented. A mathematical model of the loading process of a low-sensitivity explosive hexanitrostilbene by a short-duration pulse has been constructed and verified. The model of throwing a striker formed by explosive detonation products has been verified. Conclusions are drawn about the influence of the detonator design features and the physical properties of the impactor plate material throwable on the speed of its throwing.*