



Орлов Ю.Н., Соловьев В.О.,
Овчинников Н.М., Пацюк В.В.,
Суслин В.М.

Расчет распространения
ударной волны в канале
детонатора и оптимизация
параметров инициирования
зарядов ВВ

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Расчет распространения ударной волны в канале детонатора и оптимизация параметров инициирования зарядов ВВ / Ю.Н.Орлов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2014. № 105. 21 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-105>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

**Ю.Н. Орлов, В.О. Соловьев, Н.М. Овчинников,
В.В. Пацюк, В.М. Суслин**

**Расчет распространения ударной волны
в канале детонатора и оптимизация
параметров инициирования зарядов ВВ**

Москва — 2014

Орлов Ю.Н., Соловьев В.О., Овчинников Н.М., Пацюк В.В., Суслин В.М.

Расчет распространения ударной волны в канале детонатора и оптимизация параметров инициирования зарядов ВВ

В статье излагается методика оптимизации затрат энергии при инициировании ТЭНа с учетом поведения ударной волны, распространяющейся в двух или трех последовательно увеличивающихся цилиндрических каналах, сопряженных между собой расширяющимися конусами. Численно найдены параметры каналов и минимальные энергии инициирования, при которых детонация в каналах не затухает. Предложенный способ инициирования и методика расчета позволяют разработать новые виды детонаторов без первичных взрывчатых веществ и с малой энергией инициирования, обладающих высокой устойчивостью к динамическим воздействиям, статическому электричеству и блуждающим токам. Практическое использование таких детонаторов позволяет: повысить безопасность при ведении взрывных работ и снизить выход негабарита при добыче полезных ископаемых; создавать малогабаритные блоки электрического инициирования для пульсирующих взрывных устройств различного целевого назначения.

Ключевые слова: инициирование, детонатор, взрывчатое вещество, ударная волна

Orlov Yu.N., Soloviev V.O., Ovchinnikov N.M., Patsyuk V.V., Suslin V.M.

Shock wave propagation in detonator channel and optimization of parameters of initiation of explosion charges

In this paper the method of energy input optimization for the problem of explosion initiation with taking into account the shock wave behaviour is presented. This detonation wave is spread out inside three consequently increasing cylindrical channels, conjugated with each other by means of truncated cones. The optimal channels parameters and minimal initiation energy for detonation development are obtained numerically by the corresponding mathematical model. The manner of initiation and numerical method enable to construct new types of low-voltage detonators without any primary explosive substance, high stability with respect to dynamical actions, static electricity and wandering currents. The practical employment of the new detonators enables to raise the safety of explosive works, reduce the non-sized yield under extraction problems and create the low-size blocks of electric initiation for pulsing explosion engine of various purpose.

Key words: initiation, detonator, explosion material, shock wave

Содержание

Введение	3
1. Основные типы и конструкции детонаторов.....	5
2. Методика расчета распространения ударной волны в канале.....	7
3. Результаты расчетов.....	10
4. Результаты экспериментов	18
5. Заключение.....	19
Литература	21

Введение

В предшествующих работах [1-4] авторского коллектива была сформулирована методика расчета поведения ударной волны в каналах детонаторов различной формы: цилиндрической, в форме усеченного конуса и в форме двух или трех вложенных цилиндров разного диаметра, соединяемых через усеченные конусы. В соответствии с методикой [1, 2] были проведены расчеты по распространению ударной волны в каналах [1, 3], которые затем сравнивались с данными экспериментов [4]. В расчетах анализировались зависимости давления на фронте ударной волны и за ним, скорости распространения ударной волны по каналу, температура сжимаемого вещества и продуктов сгорания как функции от радиальной переменной и времени, а также от параметров задачи – энергии (мощности) инициирования, диаметров каналов и длины переходной части между ними. В настоящей работе проводится систематизация экспериментальных и численных результатов, накопленных за последние три года, призванная уточнить параметры модельных уравнений. Целью исследований является нахождение оптимальных условий для эффективного срабатывания детонаторов в плане минимизации энергии инициирования взрывчатых веществ (ВВ). Рассматриваются электродетонаторы, инициирование в которых происходит посредством подведения электрической энергии. Такие детонаторы используются, например, в различных промышленных устройствах [5] для проведения буровых работ.

Согласно справочнику [6], современные электродетонаторы (ЭД) подразделяются на две основные группы. В первую входят низковольтные ЭД нормальной чувствительности, например, ЭД-8-Ж, ЭДКЗ-ПМ и др. Они надежно срабатывают от батареи постоянного тока с напряжением 4 В. Во вторую группу входят высоковольтные ЭД с пониженной и низкой чувствительностью, например, ЭД-1-8-Т, ЭД-24 и др. Они надежно срабатывают от промышленных взрывных устройств, например, ПИВ-100М, КПМ-3 и аналогичных с напряжением постоянного тока на выходе не менее 600 В. Следует заметить, что ЭД-24 не срабатывает при подключении к источнику постоянного тока напряжением 500 ± 25 В и переменного тока напряжением 380 ± 20 В и частотой 50 ± 5 Гц.

В качестве первичного заряда в большинстве современных ЭД используются инициирующие ВВ (ИВВ), предназначенные для возбуждения взрывчатых превращений во вторичных зарядах ВВ электродетонаторов. К ним следует отнести следующие ИВВ: гремучая ртуть, азид свинца, тринитрорезорцинат свинца (ТНРС), тетразен (или их смеси) и некоторые другие ВВ со скоростью детонации до 5,0 км/с. Отметим, что первичные ИВВ обладают повышенной чувствительностью к простым воздействиям, таким как удар, трение, тряска, накол, луч пламени, электрическая искра и т. д., вследствие чего они крайне опасны в обращении.

Некоторые технические характеристики ЭД приведены в табл. 1 в соответствии с [6].

Табл. 1. Некоторые технические характеристики штатных ЭД

Параметры	Электродетонаторы			
	ЭД-8-Ж	ЭДКЗ-ПМ	ЭД-1-8-Т	ЭД-24
Сопротивление ЭД, Ом	1,8-3,6	1,8-3,6	0,5-1,1	0,65-1,3
Безопасный ток, А	0,20	0,200±0,005	1,0±0,02	0,200±0,005*
Безопасный импульс, А ² ·мс, не менее	0,6	0,6	40	-
Длительный воспламеняющий ток, А	0,3	0,3	-	-
Импульс воспламенения, А ² ·мс, не более	2,0	2,0	88	29-37
Безотказный ток срабатывания групп до 100 последовательно включенных ЭД, А	1,0	1,0	5,0±0,2	3,0±0,1
Пределы времени срабатывания, мс	2-6	4-120, 25-125	3-8, 20-10000	6-8, 20-10000
Стойкость к зарядам статического электричества	Выдерживает разряды статического электричества с энергией, мДж			
	10	10	125	62,5
Вероятность безотказной работы, не менее (при допустимой вероятности)	0,9999 (0,95)	0,9999 (0,95)	0,9998 (0,95)	0,9998 (0,90)

К основным достоинствам рассматриваемых групп ЭД следует отнести их высокую иницирующую способность и надежность, технологичность промышленного изготовления и относительную дешевизну. Детонаторы ЭДКЗ-ПМ, ЭД-1-8-Т и ЭД-24 имеют широкие временные диапазоны срабатывания. Это позволяет использовать различные временные задержки ЭД при подрыве промышленных зарядов ВВ, реализовывать на практике самые разнообразные взрывные схемы и, как следствие, повышать качественные показатели результатов взрывных работ.

В то же время исследования [8] показали, что современные штатные ЭД не выдерживают динамических нагрузок с энергией более 4 Дж. Наиболее чувствительны к ударам электровоспламенители. Необходимость повышения стойкости детонаторов при деформации корпусов и выдергивании проводов обусловлена тем, что ЭД в процессе их эксплуатации могут подвергаться воздействиям при бурении, долблении, разборке и погрузке породы, где они могут оказаться в случае их отказа при взрывании. Кроме того, следует понизить эффект уплотняющего действия взрыва при короткозамедленном взрывании для размещенных близко к зоне взрыва шпуровых зарядов.

Таким образом, основным недостатком всех ЭД, использующих ИВВ, является их высокая чувствительность ко всем видам внешнего воздействия. Замена первичных ИВВ на более мощные и менее чувствительные к внешним воздействиям бризантные ВВ (такие как ТЭН, гексоген со скоростью детонации до 8,5 км/с) позволит успешно разрешить данную проблему.

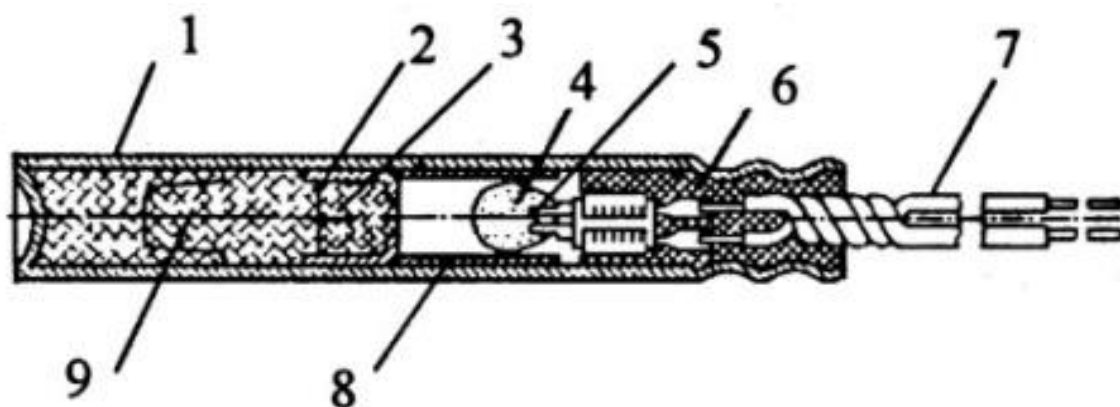
С позиций безопасности, надежности и габаритов лучшими характеристиками в настоящее время обладает отечественный высоковольтный детонатор АТЭД-15, разработанный ВНИИЭФ для проведения специальных работ. Этот детонатор выдерживает энергию удара до 50 Дж без самопроизвольного

подрыва. Однако в связи с высокой энергией инициирования и потребностью использовать специальные взрывные устройства он не имеет перспективы широкого промышленного применения.

Таким образом, актуальной является задача создания высокобезопасного детонатора нового поколения на вторичных ВВ, являющегося базовым для различных модификаций, способных заменить широкую номенклатуру выпускаемых промышленностью детонаторов. Для этой цели в [7] была предложена конструкция специального электродетонатора нового поколения, описываемого ниже в разделе 1.

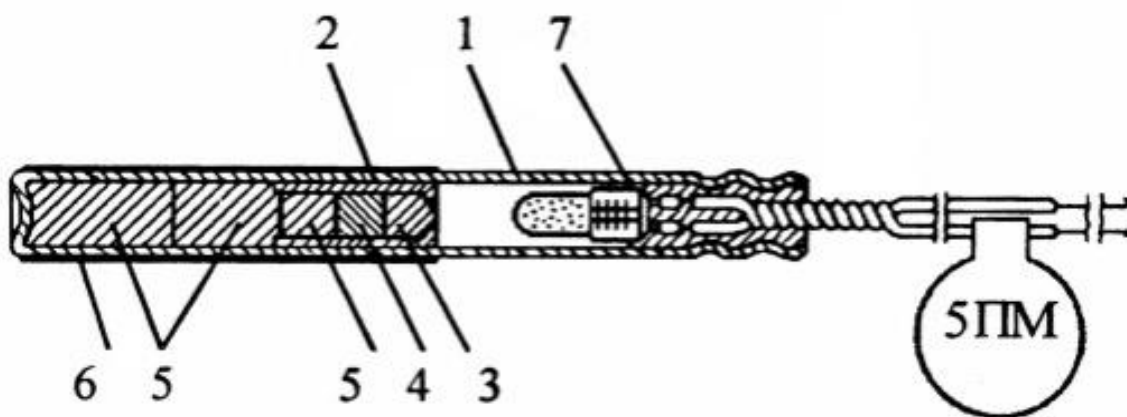
1. Основные типы и конструкции детонаторов

Следуя [6], приведем конструктивные схемы основных современных детонаторов с электрическим инициированием (табл. 1 выше, рис. 1-4).



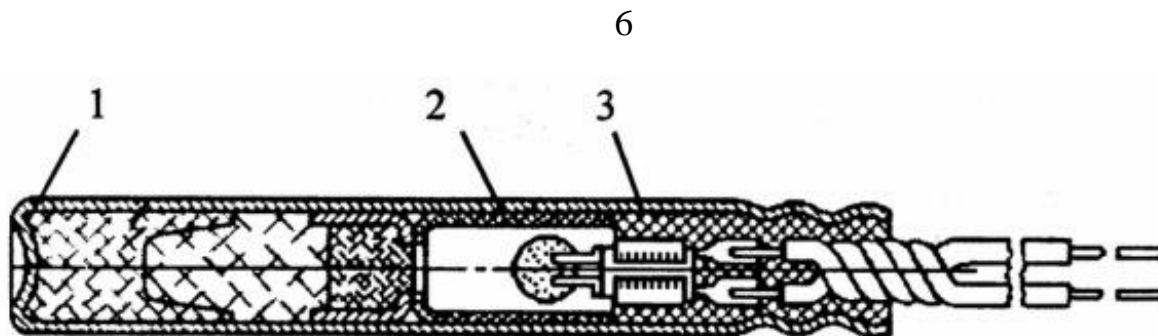
1 – гильза; 2 – чашечка; 3 – первичный заряд; 4 – головка воспламенительная; 5 – мостик; 6 – пробка; 7 – концевые провода; 8 – экран; 9 – вторичный заряд

Рис. 1. Схема детонатора ЭД-8-Ж



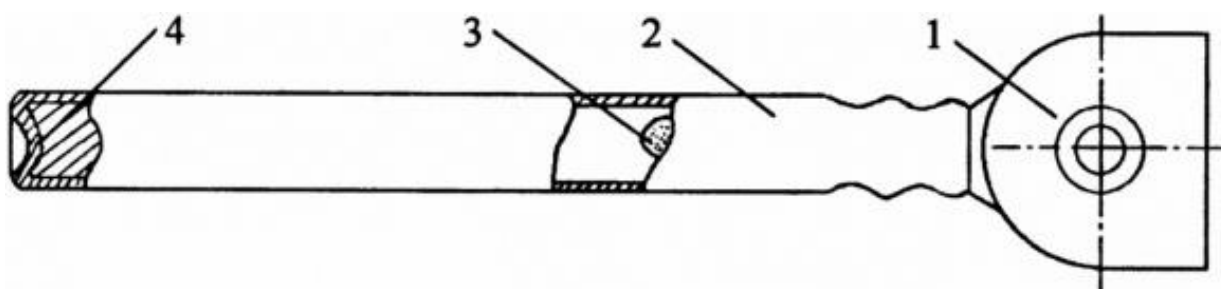
1 – гильза; 2 – чашечка; 3 – замедляющий состав; 4 – первичный заряд; 5 – вторичный заряд; 6 – слой пламегасителя; 7 – электровоспламенитель

Рис. 2. Схема детонатора ЭДКЗ-ПМ



1 – капсуль-детонатор; 2 – экран; 3 – электровоспламенитель

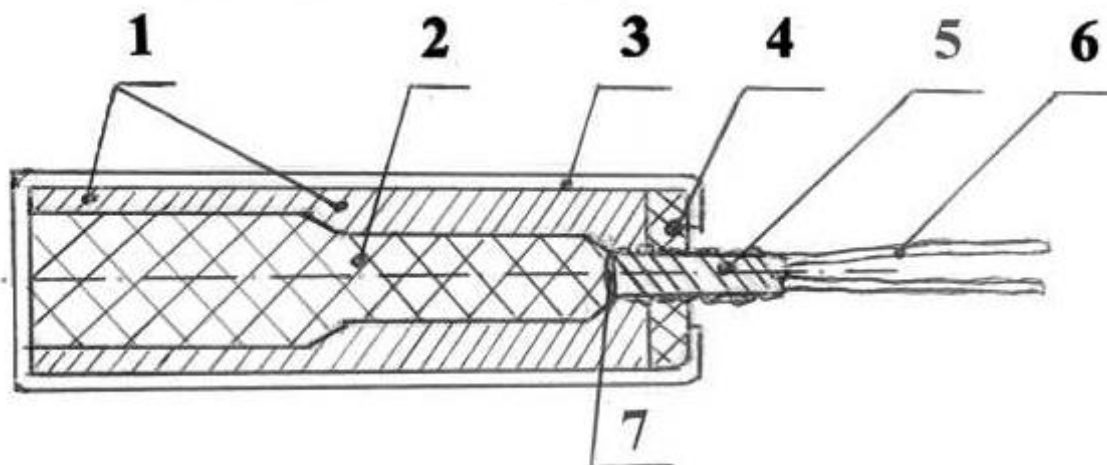
Рис. 3. Схема детонатора ЭД-1-8-Т



1 – пластмассовый корпус трансформатора; 2 – гильза; 3 – электровоспламенитель;
4 – вторичный заряд

Рис. 4. Схема детонатора ЭД-24

Основная идея предлагаемого конструктивного решения специального электрического детонатора (СЭД) нового поколения заключается в том, что внутренняя поверхность корпуса детонатора представляет собой ряд последовательных каналов различного диаметра и длины (рис. 5).



1- внешний корпус детонатора; 2- взрывчатое вещество (ТЭН или гексоген);
3 – тонкостенный герметизирующий корпус; 4 – пробка герметизирующая;
5 – изолирующий крепеж электрических проводов; 6- жила электрического провода;
7 – электропроводный мостик плазменной возгонки

Рис. 5. Схема специального электродетонатора

Схема анализируемого корпуса специального детонатора приведена на рис. 6. Отметим, что в [2] была рассмотрена более простая модель корпуса с двумя, а не тремя цилиндрами.

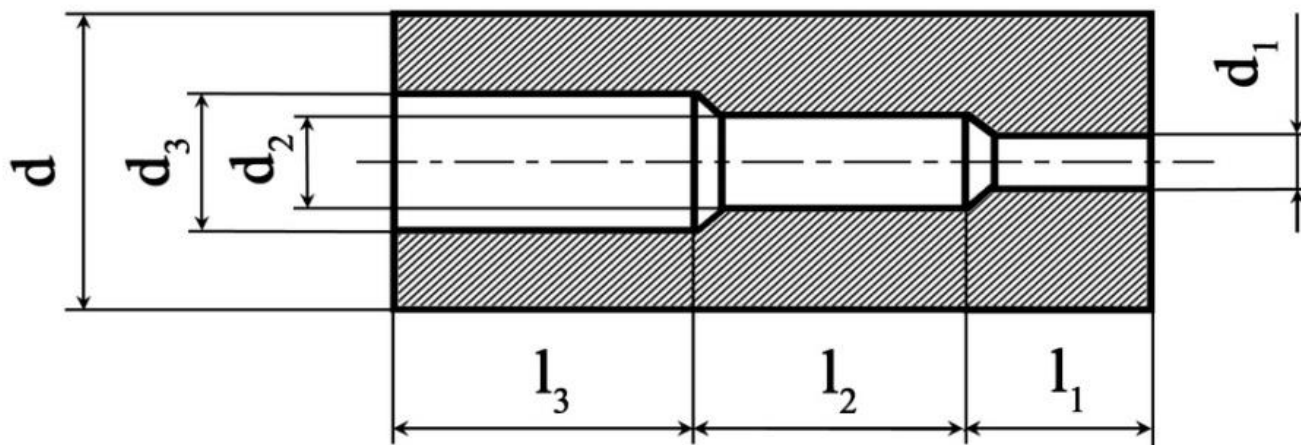


Рис. 6. Схема корпуса специального электродетонатора

Геометрические размеры и энергия инициирования являются параметрами, варьируемыми в расчетах. Диапазон границ оптимизируемых параметров для расчетов распространения ударной волны в [3] были взяты следующими: длина инициирующего канала $l_1 = 1 \div 3$ мм, диаметр $d_1 = 1,8$ мм; длина переходного канала $l_2 = 1 \div 3$ мм, диаметр $d_2 = 3,2$ мм; энергия разряда возгоняемого мостика E_{in} варьировалась от 0,5 Дж до 1 Дж.

Внутренний канал детонатора заполнен мелкокристаллическим сыпучим взрывчатым веществом. Иницирование ВВ осуществляется с узкого конца детонатора. В зависимости от параметров инициирующего импульса и геометрических характеристик канала ВВ либо горит, либо детонирует. Численный анализ этих режимов опирается на методику, кратко описываемую ниже в разделе 2.

2. Методика расчета распространения ударной волны в канале

Методика расчета распространения ударной волны в канале детонатора и численный алгоритм были описаны авторами ранее в [1, 2]. Здесь мы приводим основные положения методики для замкнутости изложения.

Для моделирования процесса горения и детонации используются уравнения тепло и гидродинамики, дополненные уравнениями состояния вещества. Из осевой симметричности канала следует, что при использовании цилиндрических координат задача является двумерной. Далее задача рассматривается в упрощенной одномерной постановке. Для этого вводится понятие пористости среды. Разобьем корпус детонатора на ячейки в виде цилиндров радиуса R_2 и высоты h . Назовем пористостью ячейки отношение объема части канала, принадлежащего ячейке, к объему ячейки. В нашем

случае для ячеек бесконечно малой толщины это отношение сведется к величине

$$\alpha(z) = (r/R_2)^2, \quad (1)$$

где $r(z)$ – радиус канала в точке z .

Пусть

$$\rho(z,t), p(z,t), u(z,t), \varepsilon(z,t)$$

обозначают соответственно плотность, давление, осевую скорость и внутреннюю энергию. Условия задачи позволяют пренебречь вязкостью и теплопроводностью. Тогда одномерные уравнения тепло- и гидродинамики, записанные в дивергентном виде, будут иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha\rho)}{\partial t} &= -\frac{\partial(\alpha\rho u)}{\partial z}, & \frac{\partial(\alpha\rho u)}{\partial t} &= -\alpha\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial(\alpha\rho u^2)}{\partial z}, \\ \frac{\partial[\alpha\rho(u^2/2 + \varepsilon)]}{\partial t} &= -\frac{\partial(\alpha\rho u(u^2/2 + \varepsilon + p/\rho))}{\partial z} + \alpha Q. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $Q(z,t)$ – теплота, выделяемая при детонации.

Систему (2) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho)}{\partial t} &= -\frac{\partial(\rho u)}{\partial z} - \rho u \frac{\partial}{\partial z} \ln \alpha, & \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} &= -\frac{\partial(p)}{\partial z} - \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial z} - \rho u^2 \frac{\partial}{\partial z} \ln \alpha, \\ \frac{\partial[\rho(u^2/2 + \varepsilon)]}{\partial t} &= -\frac{\partial(\rho u(u^2/2 + \varepsilon + p/\rho))}{\partial z} + \\ &+ Q - (\rho u(u^2/2 + \varepsilon + p/\rho)) \frac{\partial}{\partial z} \ln \alpha. \end{aligned} \quad (3)$$

После окончания химической реакции разложения ВВ образующиеся газообразные продукты имеют не только высокую температуру, но и плотность, сравнимую по порядку величины с исходной плотностью ВВ, то есть являются реальными газами. Существует большой набор уравнений состояний для описания веществ с такими параметрами. Одним из них является уравнение JWL, параметры которого хорошо известны для ТЭНа [8]:

$$p = A \left(1 - \frac{\gamma\rho}{R_1\rho_0} \right) \exp(-R_1 \frac{\rho_0}{\rho}) + B \left(1 - \frac{\gamma\rho}{R_2\rho_0} \right) \exp(-R_2 \frac{\rho_0}{\rho}) + \gamma E \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right), \quad (4)$$

где ρ_0 – начальная плотность взрывчатого вещества, $E = \rho_0 \varepsilon$. В [9] для ТЭНа приведены значения констант, входящих в уравнение (4), как для ВВ, так и для продуктов детонации (табл. 2, 3).

Табл. 2. Параметры расчетной модели для ТЭНа

ρ_0 , кг м ⁻³	A, ГПа	B, ГПа	C_V , МПа/К	R_1	R_2	γ
1000	1312	-7.84	1.6766	11.00	5.50	0.02027
1600	2188	-58	2.685	7.8	3.9	0.3468
1720	3466	-330	2.887	10.	5.	0.7556

Табл. 3. Параметры модели для продуктов детонации

ρ_0 , кг м ⁻³	A, ГПа	B, ГПа	C_V , МПа/К	R_1	R_2	γ
1000	2372	106.1	1.	5.6	1.8	0.24
1600	6253	232.9	1.	5.25	1.6	0.28
1720	6170	169.26	1.	4.4	1.2	0.25

Для других значений начальной плотности величины давления, теплоемкости и тепловыделения определяются путем линейной интерполяции.

Процесс инициирования ВВ моделируется в численных расчетах с использованием уравнения химической кинетики. Для этого вводится концентрация продуктов детонации согласно формуле

$$\lambda = \frac{m_1(t)}{m_1(t) + m_0(t)}, \quad (5)$$

где m_1 – масса продуктов детонации, m_0 – масса исходного ВВ, находящихся в выделенном объеме в момент времени t . Для фиксированной массы вещества изменение концентрации описывается уравнением типа Аррениуса [8]

$$\frac{d\lambda}{dt} = J(1 - \lambda) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (6)$$

где для ТЭНа, согласно [8], $J = 6.3 \times (\rho_0/1.778) \times 10^{19}$ сек⁻¹, E , – энергия моля вещества, а R – газовая постоянная.

Таким образом, процесс детонации согласно формулам (2, 4, 6) описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial(\alpha\rho)}{\partial t} = -\frac{\partial(\alpha\rho u)}{\partial z}; \quad \frac{\partial(\alpha\lambda\rho)}{\partial t} = -\frac{\partial(\alpha\lambda\rho u)}{\partial z} + \alpha\rho J(1-\lambda)\exp\left(-\frac{E}{RT}\right);$$

$$\frac{\partial(\alpha\rho u)}{\partial t} = -\alpha\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial(\alpha\rho u^2)}{\partial z}; \quad \frac{\partial[\alpha E]}{\partial t} = -\frac{\partial(\alpha u E)}{\partial z} - p\frac{\partial(\alpha u)}{\partial z} + \alpha Q + \alpha Q_{in}; \quad (7)$$

$$p = A\left(1 - \frac{\gamma\rho}{R_1\rho_0}\right)\exp\left(-R_1\frac{\rho_0}{\rho}\right) + B\left(1 - \frac{\gamma\rho}{R_2\rho_0}\right)\exp\left(-R_2\frac{\rho_0}{\rho}\right) + \gamma E\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right).$$

Здесь $Q_{in} = E_{in} / \Delta t$ – вводимое в единицу времени количество теплоты, необходимое для инициации горения или детонации.

3. Результаты расчетов

Для пяти моментов времени после иницирования с шагом в 1,2 микросекунды на рис. 7-9 приведены графики концентрации продуктов детонации (ПД) как функций переменной z вдоль оси канала для разных вариантов энергии разряда возгоняемого мостика. На рисунках обозначен также контур детонатора, диаметр которого (в сантиметрах) численно равен значениям на вертикальной шкале графиков.

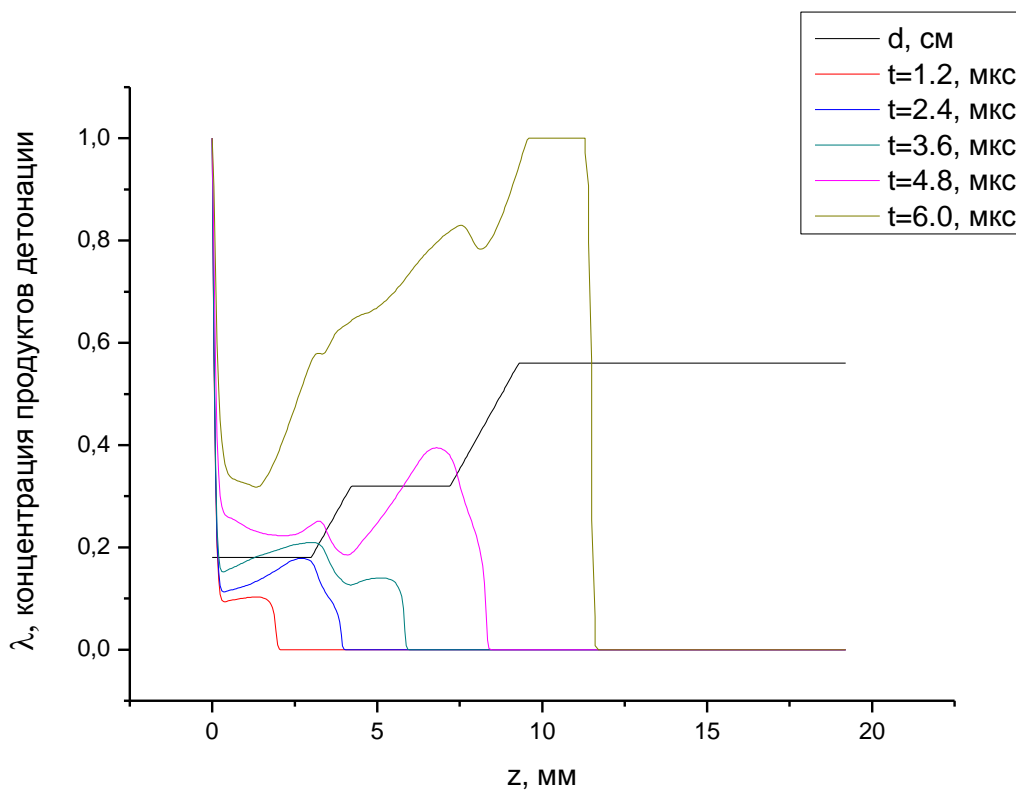


Рис. 7. Концентрация ПД для варианта $l_1 = 3$ мм, $l_2 = 3$ мм, $E_{in} = 0,5$ Дж

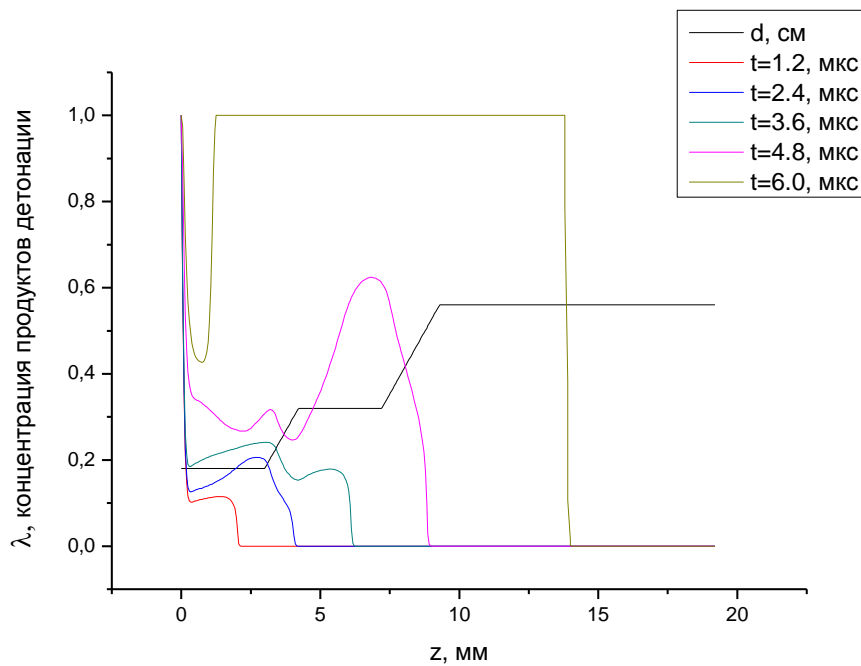


Рис. 8. Концентрация ПД для варианта $l_1 = 3$ мм, $l_2 = 3$ мм, $E_{in} = 0,75$ Дж

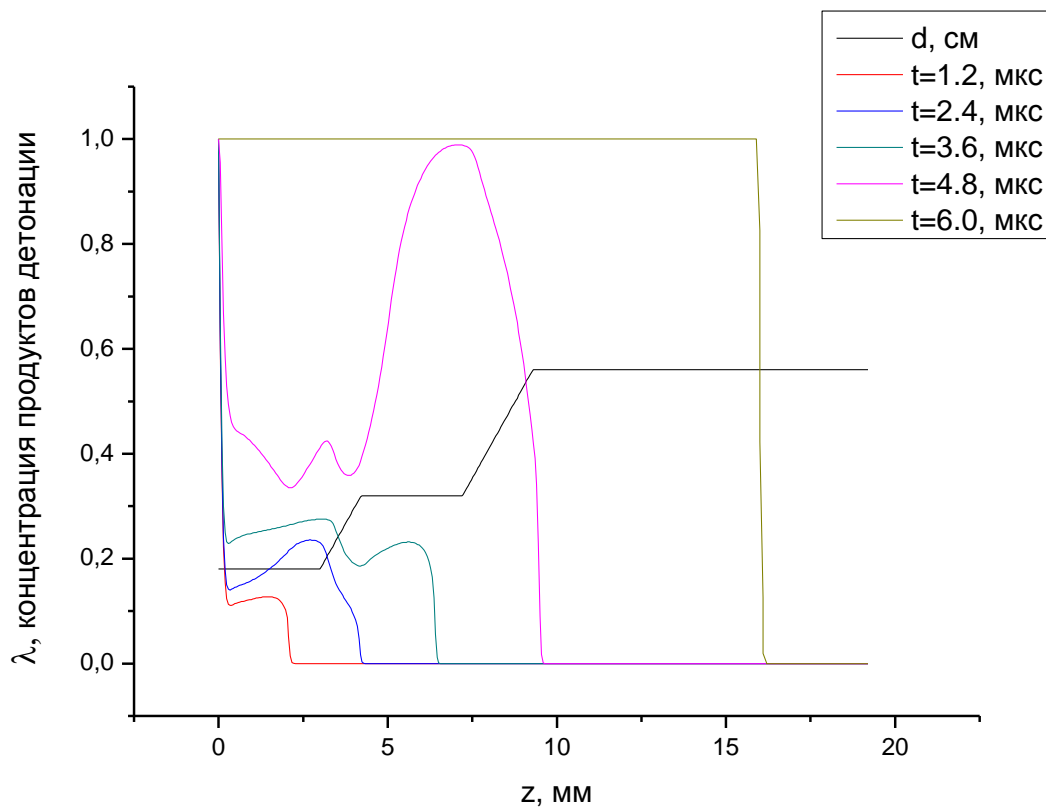


Рис. 9. Концентрация ПД для варианта $l_1 = 3$ мм, $l_2 = 3$ мм, $E_{in} = 1$ Дж

Из приведенных графиков рис. 7-9 видно, что с увеличением энергии электрического разряда увеличивается концентрация ПД к моменту окончания развития процесса, причем даже для минимальной величины 0,5 Дж происходит полная детонация ВВ. Это важное обстоятельство численной минимизации энергии инициирования имеет и экспериментальные подтверждения (см. далее раздел 5).

На рис. 10 приведены концентрации ПД для различных длин и энергий инициирования к моменту 6 мкс. Из него следует, что варианты с длинами L_1 и/или L_2 , меньшими 3 мм, не эффективны, и даже сравнительно большая энергия инициирования не приводит в этих случаях к полноценной детонации. Если же указанные длины равны 3 мм, то даже при энергии разряда возгоняемого мостика 0,5 Дж развивается требуемый режим.

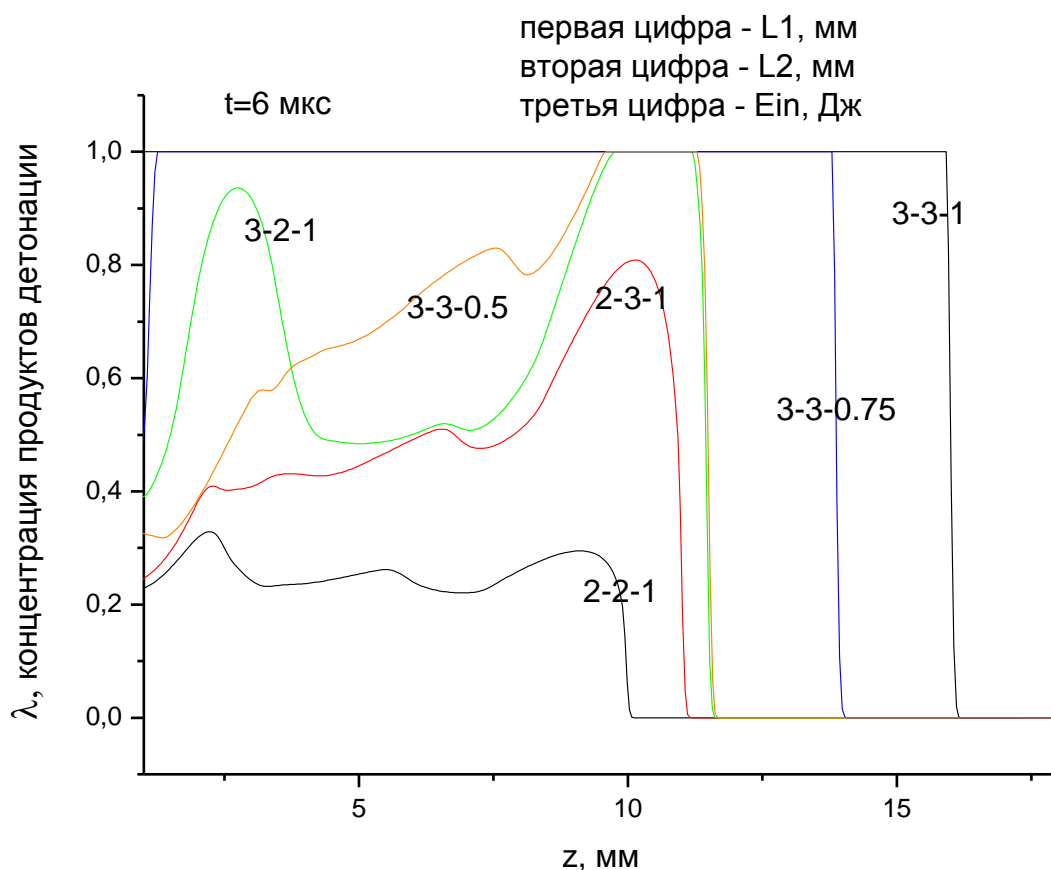


Рис. 10. Концентрация ПД для различных вариантов l_1 , l_2 , E_{in}

На рис. 11-13 приведены графики давления в канале детонатора в различные моменты времени. Расчеты проведены для тех же параметров, что и на рис. 7-9.

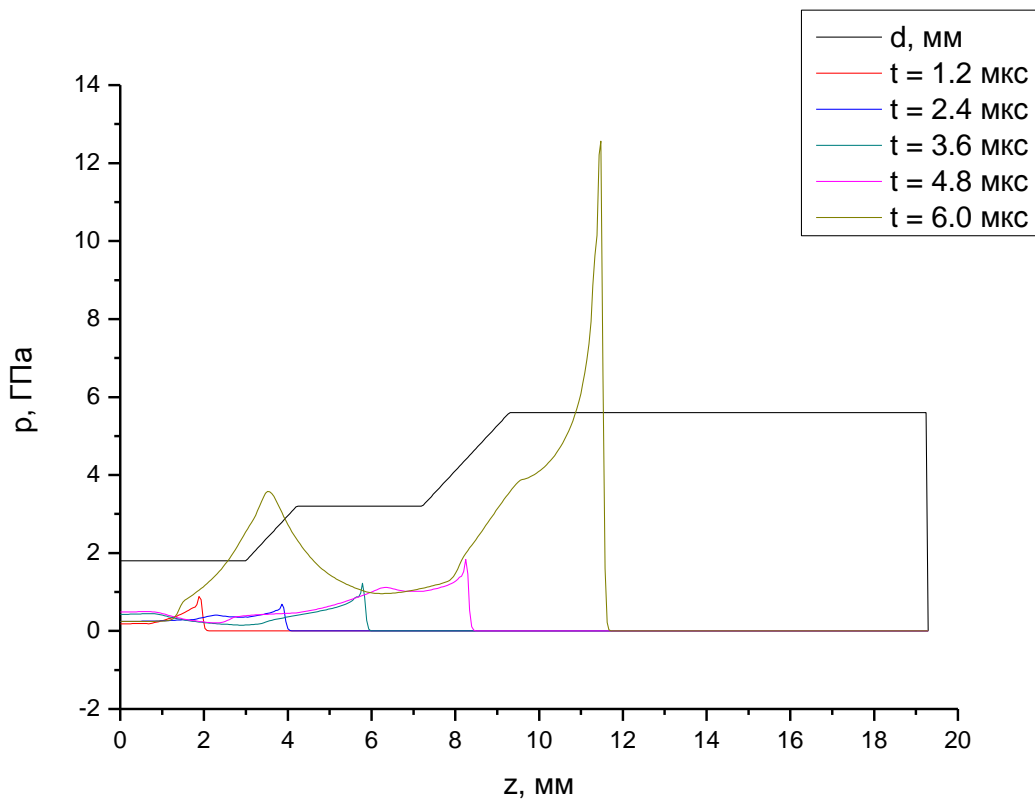


Рис. 11. Давление в канале для варианта $l_1 = 3$ мм, $l_2 = 3$ мм, $E_{in} = 0,5$ Дж

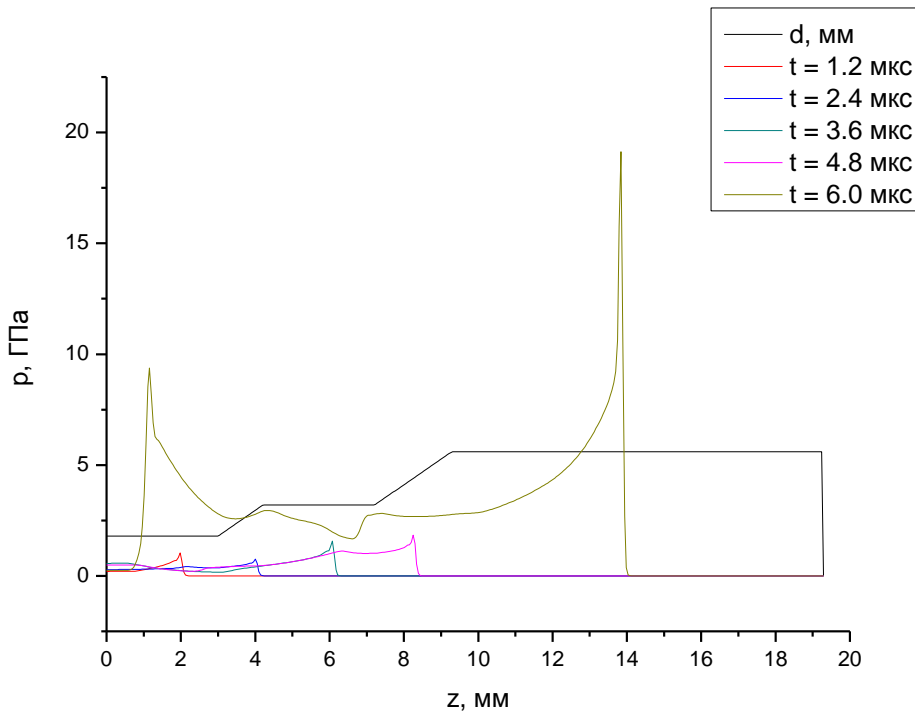


Рис. 12. Давление в канале для варианта $l_1 = 3$ мм, $l_2 = 3$ мм, $E_{in} = 0,75$ Дж

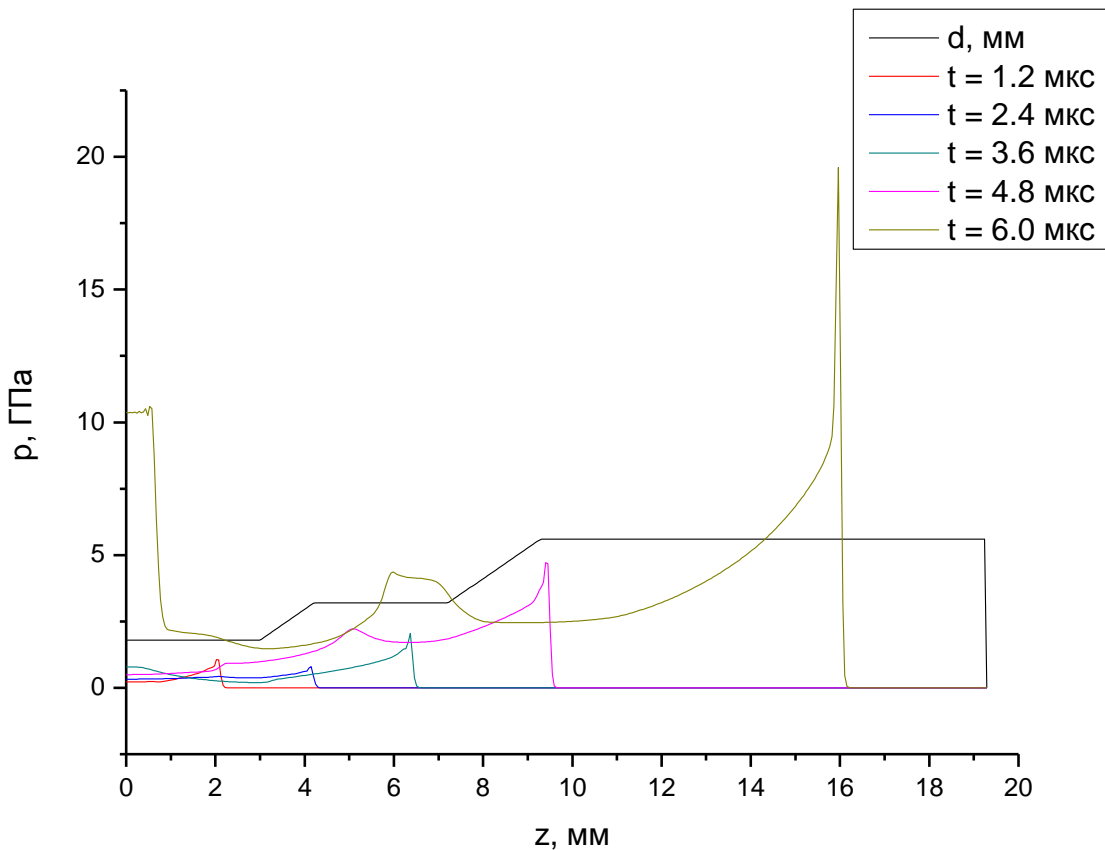


Рис. 13. Давление в канале для варианта $l_1 = 3$ мм, $l_2 = 3$ мм, $E_{in} = 1$ Дж

Из рис. 11-13 видно, что лишь первый вариант, когда разряд возгоняемого мостика имеет наименьшую энергию, отвечает ситуации, когда давление в зоне инициирования не приводит к выбросу ТЭНа из негерметичного корпуса. Этот же вывод можно сделать и из графиков распределения температуры ПД в канале, представленных далее на рис. 14-16. Это объясняется тем, что при высокой энергии, подаваемой на возгоняемый мостик, происходит интенсивный рост давления ПД и их отражение от конусных частей детонатора. Описываемый эффект демонстрируется на графиках распределения скоростей на рис. 17-19.

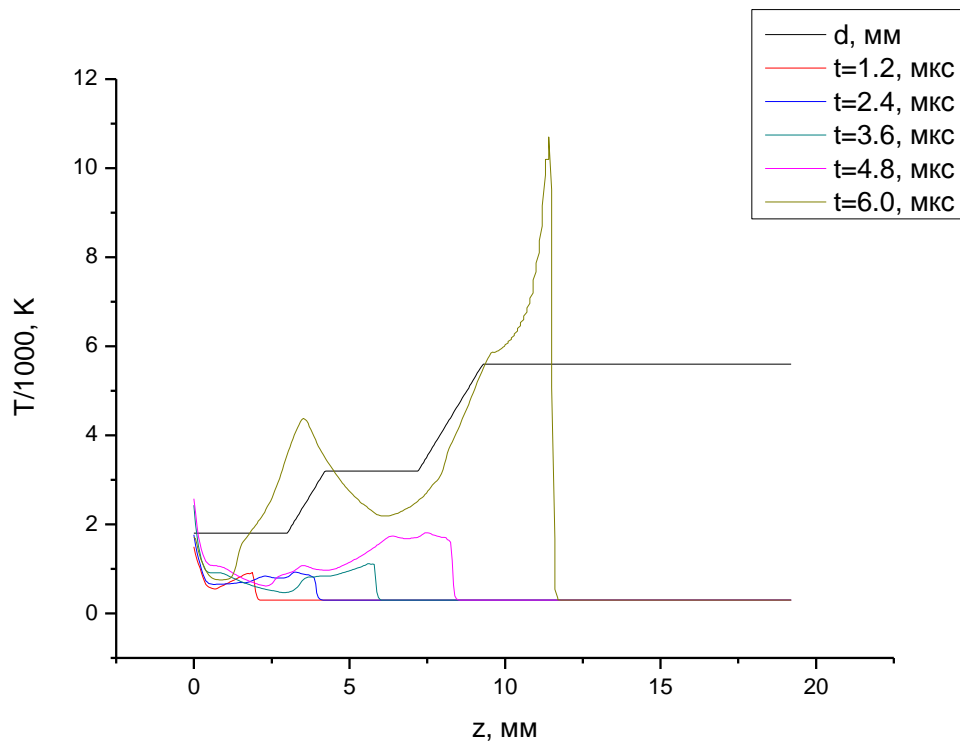


Рис. 14. Температура в канале для варианта $l_1 = 3 \text{ мм}$, $l_2 = 3 \text{ мм}$, $E_{in} = 0,5 \text{ Дж}$

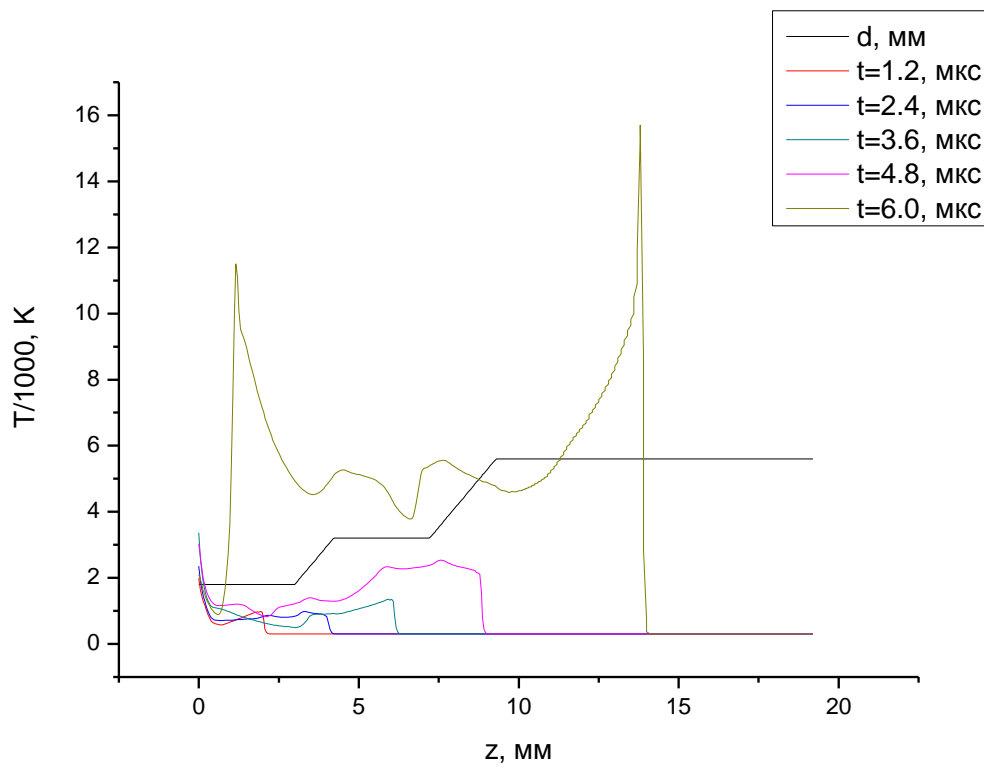


Рис. 15. Температура в канале для варианта $l_1 = 3 \text{ мм}$, $l_2 = 3 \text{ мм}$, $E_{in} = 0,75 \text{ Дж}$

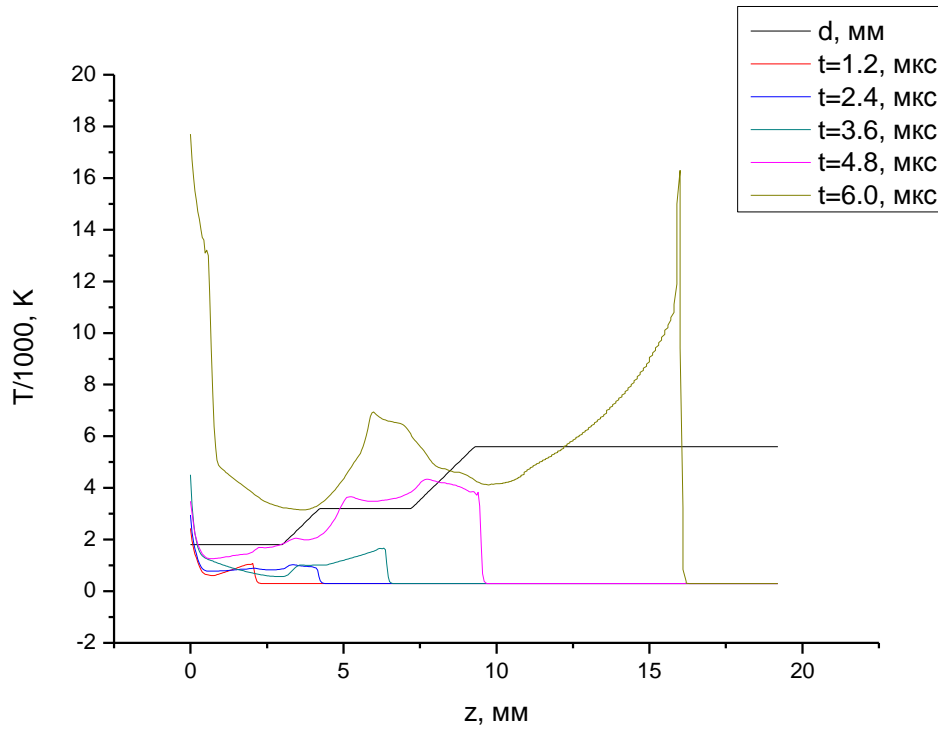


Рис. 16. Температура в канале для варианта $l_1 = 3$ мм, $l_2 = 3$ мм, $E_{in} = 1$ Дж

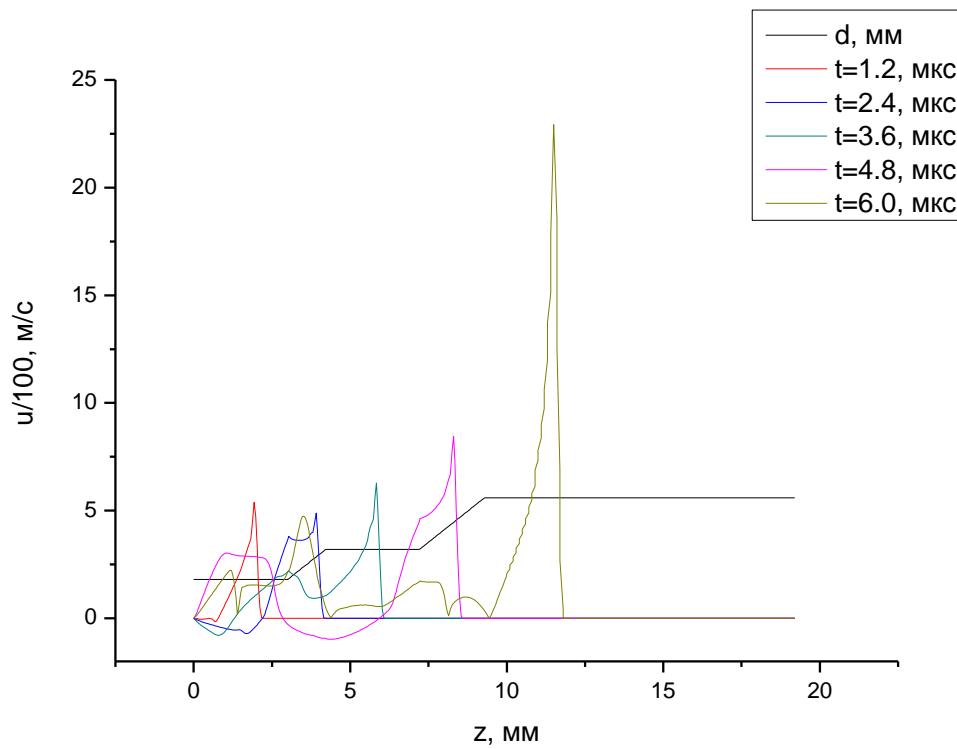


Рис. 17. Распределение скоростей для варианта $l_1 = 3$ мм, $l_2 = 3$ мм, $E_{in} = 0,5$ Дж

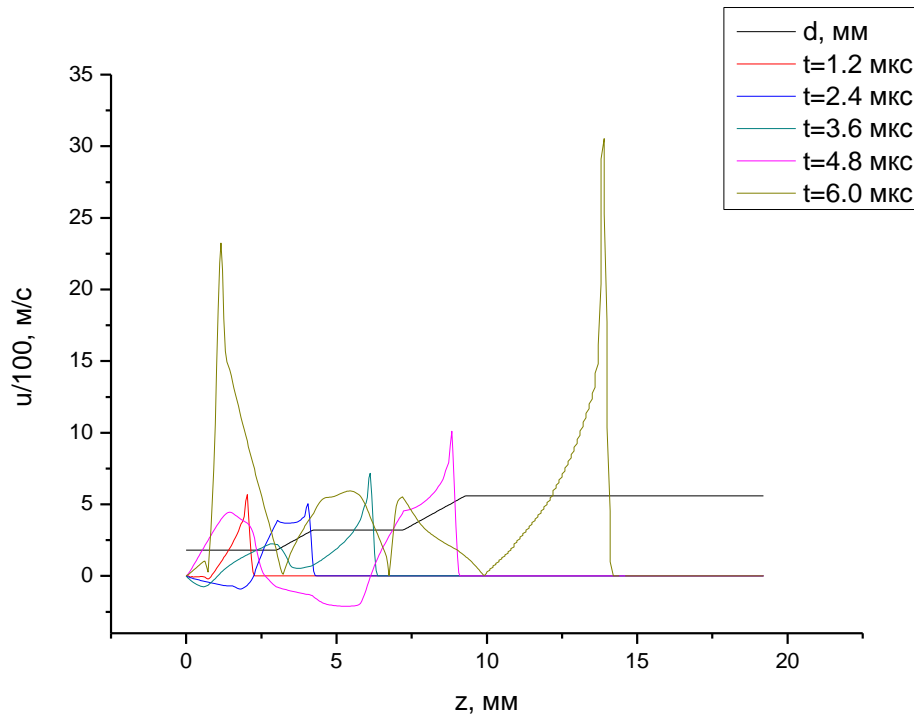


Рис. 18. Распределение скоростей для варианта $l_1 = 3 \text{ мм}$, $l_2 = 3 \text{ мм}$, $E_{in} = 0,75 \text{ Дж}$

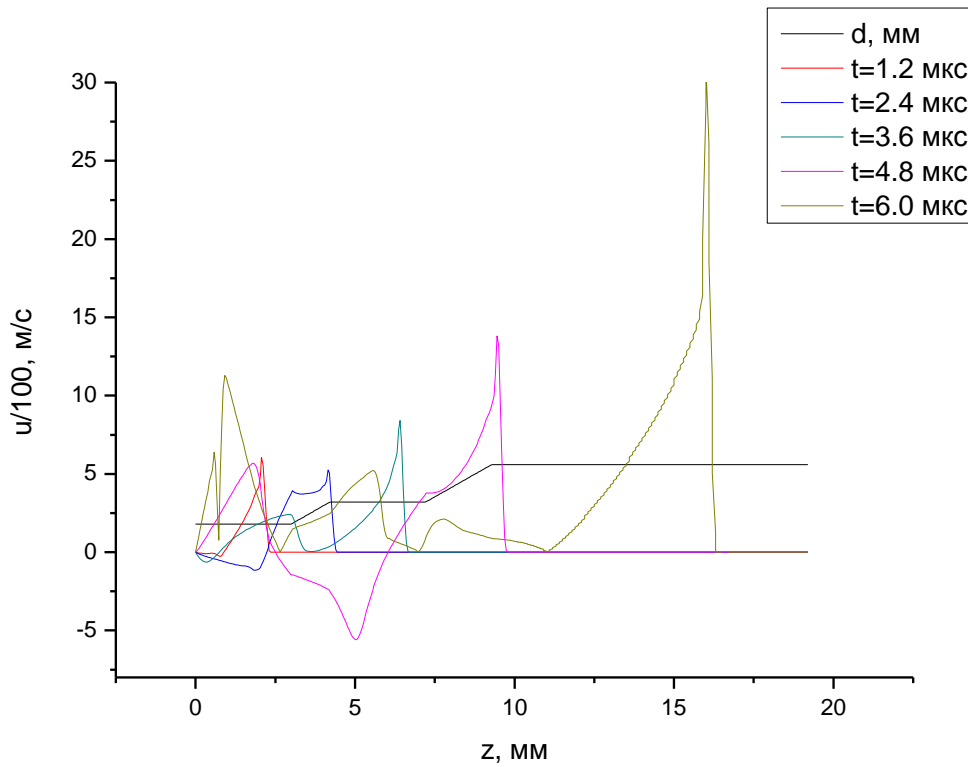


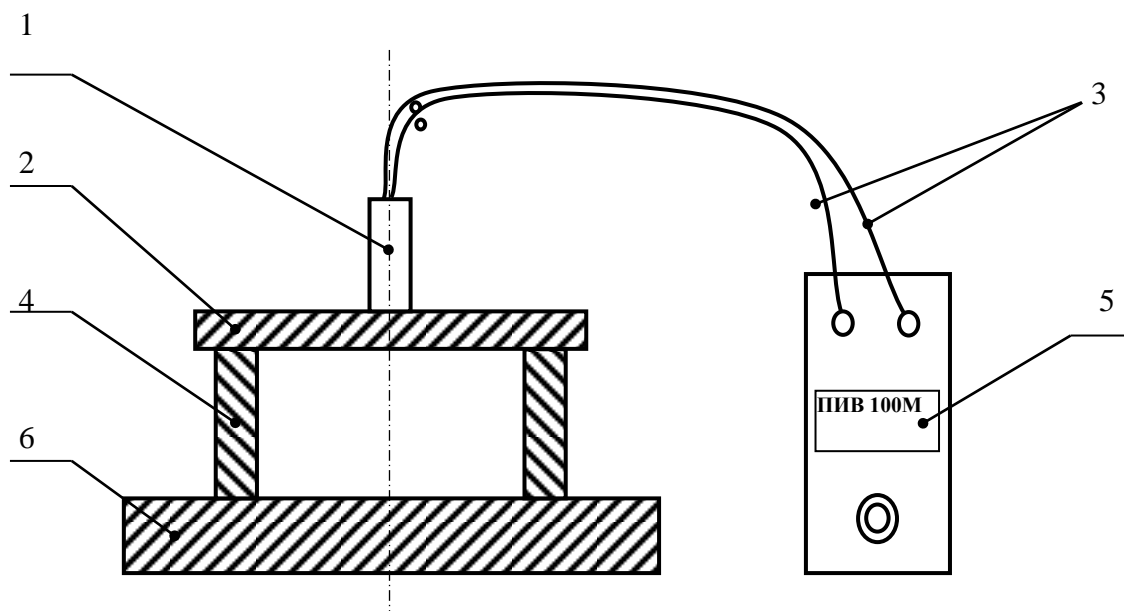
Рис. 19 – Распределение скоростей для варианта $l_1 = 3 \text{ мм}$, $l_2 = 3 \text{ мм}$, $E_{in} = 1 \text{ Дж}$

4. Результаты экспериментов

Авторами настоящей работы – сотрудниками ИМАШ РАН – были проведены исследования по эффективности разрабатываемых детонаторов. На экспериментальной взрывной площадке ИПХФ РАН в Черноголовке была проведена серия полигонных испытаний некоторых модификаций СЭД. Изучалась работоспособность детонаторов по ГОСТ 7399-97, связанная с пробитием свинцовой пластины толщиной $5,0 \div 5,3$ мм.

Формирование заряда в стальном корпусе СЭД производилось с помощью ручного механического пресса. Прессование (уплотнение) ВВ в оболочку СЭД, имеющего по три внутренних цилиндрических канала различного диаметра и высоты, производилось порционно до его полного заполнения ВВ требуемой плотности.

Схема проведения опытов по пробитию СЭД свинцовой пластины представлена на рис. 20.



*1 – специальный электродетонатор (СЭД); 2 – свинцовая пластинка;
3 – соединительный электрокабель; 4 – стальное опорное кольцо;
5 – взрывная машинка; 6 – массивная стальная подложка.*

Рис. 20. Схема проведения опытов по пробитию СЭД свинцовой пластинки

Эксперименты состояли в следующем. На массивную металлическую подложку, представляющую из себя стальную плиту толщиной $30 \div 40$ мм, устанавливалось стальное опорное кольцо диаметром 50 мм и высотой 30 мм, на котором, в свою очередь, располагалась свинцовая пластинка. К свинцовой пластинке с помощью пластилина прикреплялся торцевой снаряженной частью СЭД. Далее, при помощи электрического кабеля длиной 3,0 м СЭД соединялся со стандартным взрывным устройством ПИБ 100М. Эксперименты проводились с тремя модификациями СЭД, имеющими одинаковые внешние

геометрические характеристики и отличающимися друг от друга только геометрией внутренних каналов, в соответствии с расчетными вариантами (рис. 7-9). Внешние габариты СЭД во всех вариантах были одинаковы: это был цилиндр диаметром 8 мм и длиной 15 мм. Результаты проведенных экспериментов по пробитию СЭД свинцовой пластины диаметром 53 мм и толщиной 5,0÷5,3 мм представлены в табл. 4.

Табл. 4. Результаты экспериментов по ГОСТ 7399-97

Номер опыта	Масса СЭД с ВВ, г	Масса ВВ, г	Параметры пробития свинцовой пластинки, $\varnothing_1 \div \varnothing_2$, мм
1	4,56	0,25	12,6÷13,1
2	4,79	0,22	13,1÷13,4
3	4,62	0,28	13,9÷14,2
4	4,34	0,31	8,9÷8,9
5	4,63	0,29	12,8÷13,0
6	4,51	0,27	7,3÷8,3
$\varnothing_1 \div \varnothing_2$ – диаметральные размеры отверстия, мм			

Эксперименты показали, что пробитие пластинки реализовывалось при значениях параметров, близких к расчетным. Тем самым проведены натурные испытания разработанного малогабаритного СЭД, который удовлетворяет требованиям ГОСТа, обладает высокой безопасностью и высокой стойкостью к внешним динамическим воздействиям и потребляет небольшую энергию для инициирования.

5. Заключение

Построенная модель распространения ударной волны в канале детонатора позволила проанализировать влияние длины детонатора на эффективность инициирования. Расчеты показали, что в конусной части детонатора при движении в зоне расширения происходит падение плотности, импульса и энергии, то есть эта часть детонатора работает как сток. В случае недостаточной длины иницирующего канала детонационная волна не успевает набрать достаточной энергии, и в зоне расширения канала детонационная волна теряет плотность энергии ниже критической и ее параметры падают либо вырождаются в горение с последующим возобновлением режима детонации. При этом в режиме горения успевает прореагировать значительная часть ВВ. Массовая скорость и давление в этом случае заметно меньше стандартных

величин для ТЭНа.

В случае достаточной длины инициирующего канала плотности энергии волны детонации хватает для прохождения зоны расширения канала (разряджения) без срыва режима детонации в режим горения. При выходе из конусной части детонационная волна достаточно быстро выходит на стационарный режим и большая часть ВВ детонирует в стандартном режиме.

Экспериментально доказана возможность создания электрического детонатора без первичных ВВ с энергией инициирования $E_{in} = 0,5$ Дж при размерах каналов $l_1 \geq 3$ мм и $l_2 \geq 3$ мм.

Таким образом, авторами разработан высокобезопасный многоцелевой малогабаритный электродетонатор, превосходящий по своим техническим характеристикам отечественные и зарубежные образцы.

По сравнению с лучшим аналогом АТЭД-15, разработанный детонатор обладает:

- в 1,6 раз меньшей массой ВВ в детонаторе;
- более чем на порядок меньшей энергией инициирования детонатора;
- большей устойчивостью к динамическим воздействиям.

Разработанный СЭД обладает следующими характеристиками и достоинствами:

- высокая безопасность вследствие использования только вторичного ВВ;
- общая масса используемого ВВ – 0,25 г ТЭНа;
- габариты корпуса детонатора – диаметр 8 мм, длина 15 мм;
- масса в снаряженном состоянии – 4,5 г;
- энергия подрыва детонатора – 1,5 Дж (возможно снижение до 0,5 Дж);
- устойчивость к динамическому воздействию – не менее 400 Дж;
- водостойкость, сейсмостойкость, термостойкость;
- устойчивость к наводкам от блуждающих токов;
- возможность снаряжения изделий детонаторами (СЭД) на стадии заводской сборки с последующей безопасной транспортировкой в снаряженном виде.

Технологическая простота, низкая себестоимость, высокая надежность и безопасность позволяют надеяться, что разработанный СЭД может явиться базовым для создания на его основе различных модификаций, способных заменить широкий ассортимент выпускаемых промышленностью детонаторов, имеющих различную конструкцию.

Все вышесказанное позволяет надеяться на высокую востребованность СЭД нового поколения и их широкого применения в промышленности.

Литература

1. Орлов Ю.Н., Овчинников Н.М., Соловьев В.О., Суслин В.М. Расчет поведения ударной волны в канале переменного сечения // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2011. № 27. 19 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-27>
2. Орлов Ю.Н., Соловьёв В.О., Суслин В.М. Расчет поведения ударных волн в каналах детонатора // Проблемы машиностроения и автоматизации. Международный журнал. № 4, 2011, С.112-117.
3. Орлов Ю.Н., Соловьёв В.О., Суслин В.М. Оптимизация режима инициирования детонации в каналах переменного сечения. // Проблемы машиностроения и автоматизации. Международный журнал. № 4, 2012, С.69-74.
4. Соловьев В.О., Пацюк В.В. Экспериментальные исследования выбора оптимального режима разрушения отражателя микровзрывного устройства при направленном энерговыделении продуктов детонации // В сб.: «Сборник научных докладов II Международного совещания по использованию энергоаккумулирующих веществ (ЭАВ) в экологии, машиностроении, энергетике, транспорте и в космосе» под ред. академика РАН В.И. Субботина, М.: ИМАШ РАН, 2001, С. 175-185.
5. Фролов К.В., Соловьев В.О., Пацюк В.В., Анализ преимуществ взрывореактивных комплексов малого класса для проведения буровых работ в сложных и экстремальных условиях // Проблемы машиностроения и автоматизации. Международный журнал. № 2, 2001, С. 3-9.
6. Граевский М.М., Справочник по электрическому взрыванию зарядов ВВ. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Рандеву-АМ, 2000, 448 с.
7. Соловьёв В.О., Думенко В.И. Электродетонатор и электровоспламенитель для него // МКИ: 6 F 42 В 3/13, Патент № 2056034, РФ, приоритет от 30.03.1992г. Опубликовано в Официальном бюллетене. «Изобретения. Полезные модели» № 7 от 10.03.1996г., ФИПС РОСПАТЕНТ.
8. Rimoli J.J., Gurses E. and Ortiz M. Shock-induced subgrain microstructures as possible homogenous sources of hot spots and initiation sites in energetic polycrystals // Phys. Rev. B 81, January, 2010.
9. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. Т.1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 832 с.