



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 27 за 2011 г.



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

Расчет поведения ударной  
волны в канале переменного  
сечения

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Расчет поведения ударной волны в канале переменного сечения / Ю.Н.Орлов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2011. № 27. 19 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-27>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Ордена Ленина

ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ

им. М.В. Келдыша

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

РАСЧЕТ ПОВЕДЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ  
В КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Москва, 2011

Ю.Н. Орлов<sup>1</sup>, В.О. Соловьев<sup>2</sup>, В.М. Суслин<sup>1</sup>, Н.М. Овчинников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

<sup>2</sup>ИМАШ РАН им. А.Н. Благонравова

Расчет поведения ударной волны в канале переменного сечения

На примере инициирования детонации и распространения ударной волны в конусообразном канале излагается методика расчета параметров ударной волны в каналах переменного сечения. Построен численный алгоритм, реализующий данную методику.

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

The calculation of the shock wave parameters in the channel with various cross-section

The investigation of detonation and the shock wave parameters in the channel of various cross-section is carried out. The calculation method and numerical algorithm, which has been constructed for this purpose, are described.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

При электрическом инициировании промышленных взрывчатых веществ в 95 случаях из 100 применяются низковольтные электрические детонаторы (ЭД), содержащие как первичные, так и вторичные инициирующие взрывчатые вещества (ВВ). Первичные ВВ: гремучая ртуть, азид свинца, ТНРС – делают ЭД чувствительными не только к электрическим импульсам, подаваемых с взрывных машинок, но и к статическому электричеству, блуждающим токам, электромагнитным наводкам. Поэтому к ЭД выдвигаются особо жесткие требования по технике безопасности при производстве, хранении и применении.

По данным Госгортехнадзора на горнодобывающих предприятиях России, прежде всего из-за самопроизвольного подрыва электрических детонаторов, происходит 100-130 несчастных случаев в год, из них 1,3% несчастных случаев со смертельным исходом.

Высоковольтные электрические детонаторы (ЭДВ), в которых используются только вторичные ВВ, являются более безопасными. Однако они не нашли широкого применения, т.к. для их инициирования необходима высокая энергия в виде кратковременного импульса, что приводит к ограничениям по числу одновременно подрываемых детонаторов и по длине монтажных линий от взрывника до заряда из-за больших потерь электроэнергии и технических проблем при работе с высоким напряжением.

Из всего объема используемых детонаторов, 80% применяется для подрыва ВВ в скважинах глубиной 15 метров и выше. Согласно «Единым правилам безопасности при ведении взрывных работ», утвержденных Госгортехнадзором, в скважинный заряд вводится от 2 до 4 ниток детонирующего шнура (ДША, ДШЭ) к которому и крепится на поверхности детонатор. При наличии высоко безопасных детонаторов, без первичных ВВ, использование ДША и ДШЭ исключается, поскольку детонаторы размещаются непосредственно в скважинных зарядах. Кроме того, замена линейного инициирования скважинных зарядов точечным инициированием и повышение точности (разброса) инициирования зарядов обеспечит более эффективное разрушение горных пород и уменьшит выход негабарита разрушенных пород.

Исследования показали, что штатные ЭД не выдерживают динамических нагрузок с энергией более 4 Н\*м. Наиболее чувствительны к ударам и подвержены разрушению электровоспламенители. Бризантные ВВ выдерживают большую ударную нагрузку, которая может достигать 0,65 Н\*м [1].

По ГОСТ 21807-76 ЭД должны выдерживать приложенную к проводам динамическую нагрузку, созданную падением груза массой 3 кг с высоты 0,5 м, а в соответствии с «Перспективными техническими требованиями к системам электровзрывания» частота взрывов ЭД при обрыве или выдергивании проводов

с пластиковой пробкой не должна превышать  $10^{-5}$  при доверительной вероятности 0,9.

Требования к повышению стойкости детонаторов при деформации корпусов и выдергиванию проводов, обусловлены тем, что ЭД, в процессе их эксплуатации могут подвергаться воздействиям:

- при бурении, долблении, разборки и погрузки породы, где они могут оказаться в случае их отказа при взрывании;
- уплотняющего действия взрыва при короткозамедленном взрывании для близко размещенных к зоне взрыва шпуровых зарядов.

Для предотвращения повреждений ЭД от динамических нагрузок «Едиными правилами безопасности при взрывных работах» (§ 243) установлены минимальные расстояния между соседними шпуровыми зарядами, которые приведены в таблице 1.

Табл. 1

Минимальные безопасные расстояния между шпуровыми зарядами

Условия взрывания	Минимально допустимые расстояния (м) между смежными шпуровыми зарядами ВВ класса			
	II	III-IV	V	VI
По углю	0,6	0,6	0,5	0,4
По породе:				
при $f < 7$	0,5	0,45	0,3	0,25
при $f = 7-10$	0,4	0,3	-	-
$f$ - по шкале М.М. Протоdjяконова				

При бурении слишком слабых и крепких углей рекомендуется выдерживать расстояние между шпурами более 0,6 м, что обусловлено низкой динамической надежностью ЭД и допустимым отклонением сверла до 10 см при бурении шпуров глубиной более 2 м. Установлено, что расстояние 0,6 м для слишком слабых и крепких углей не является оптимальным. Увеличение сетки бурения приводит к выходу негабарита, который приходится дополнительно измельчать. Аналогичная ситуация существует и при дроблении горных пород [1] – см. табл. 1.

Еще хуже обстоят дела при проведении работ под водой. Испытания водостойких ЭД на стойкость к деформации при воздействии взрыва от заряда массой 300 г в воде на глубине 2 м показали следующее:

- на расстоянии 0,3 м сработало 100% ЭД;
- на расстоянии 0,5 м сработало 54,2% ЭД, а 7,2% было деформировано, только 38,6% ЭД осталось целыми;
- на расстоянии 1,6 м все ЭД остались целыми.

Таким образом, поскольку технологические нужды и требования по технике безопасности находятся в определенном противоречии – с одной стороны, расстояния между скважинами желательно уменьшить, а с другой

стороны, для предотвращения разрушения детонаторов эти расстояния следует увеличить, то актуальной является задача создания детонаторов, способных обеспечить безопасность работ и одновременно улучшая качество выхода разрушаемой породы. Для этой цели авторами предлагается новая конструкция детонатора, для которого в данной работе проводится аналитическое и численное исследование ударно-волновых процессов, протекающих в каналах детонатора.

## 2. Конструкционные особенности детонаторов

Все промышленные детонаторы состоят из корпуса, инициирующего мостика и ВВ. В традиционных конструкциях используются тонкостенные биметаллические или пластмассовые корпуса (гильзы).

В новых конструкциях детонаторов [2] корпус обладает более высоким пределом прочности к динамическим нагрузкам. Внутренняя поверхность корпуса детонатора представляет последовательный ряд увеличивающихся каналов (рис.1).

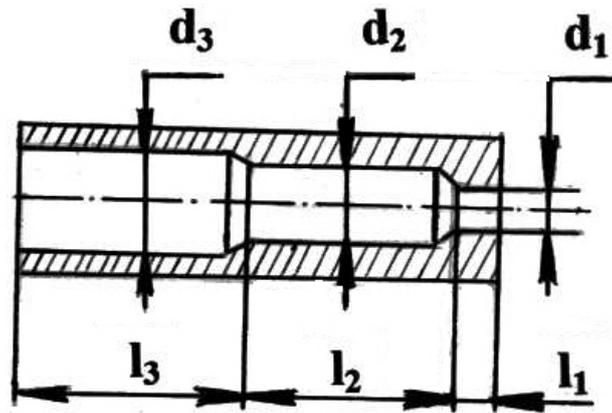


Рис. 1 – Конструкция прочного корпуса детонатора

Размеры наименьшего канала имеют пределы:

$$0,02 \text{ мм} \leq d_1 \leq 2 \text{ мм} \text{ и } 0,1 \text{ мм} \leq l_1 \leq 10 \text{ мм},$$

где:  $d_1$  – диаметр первого канала;  $l_1$  – его длина.

Размеры последующих каналов должны соответствовать условиям:

$$d_i/d_{i-1} \leq 5 \text{ и } l_i/l_{i-1} \leq 5,$$

где  $i \leq 3$  – порядковый номер канала.

Значение  $d_1$  определяется диаметром сечения вводимого в канал электрического мостика. Диаметр второго канала удовлетворяет условию  $d_2 \geq d_{кр}$ , где  $d_{кр}$  – критический диаметр используемого в детонаторе ВВ – ТЭНа. Первый и второй каналы спроектированы таким образом, что заряд ВВ, размещенный во втором канале, не разрушает донную часть детонатора и при инициировании ВВ каналы выполняет функцию отражателя и концентратора выделяемой энергии. Третий канал детонатора является тонкостенным, что обеспечивает фрагментарное разрушение канала при детонации ТЭНа.

Такая конструкция корпуса детонатора обеспечивает:

- минимальные затраты энергии на инициирование ТЭНа в корпусе детонатора и максимальную эффективность при инициировании детонатором заряда промышленного ВВ;
- минимальные размеры детонатора и минимальную массу ВВ, размещенную в его корпусе;
- максимальную защищенность ВВ детонатора от внешних воздействий.

С целью улучшения работы детонатора и повышения его безопасности была предложена новая конструкция [2] электропроводного мостика с температурой плавления меньшей, чем у электрических проводов и ТЭНа. Данная конструкция обеспечивает высокую стойкость детонатора к блуждающим токам и наводкам, а также минимальные затраты электрической энергии затрачиваемой на его возгонку и создание ударной волны для инициирования ТЭНа.

На рис. 2 показана конструкция разработанного электрического детонатора согласно [2].

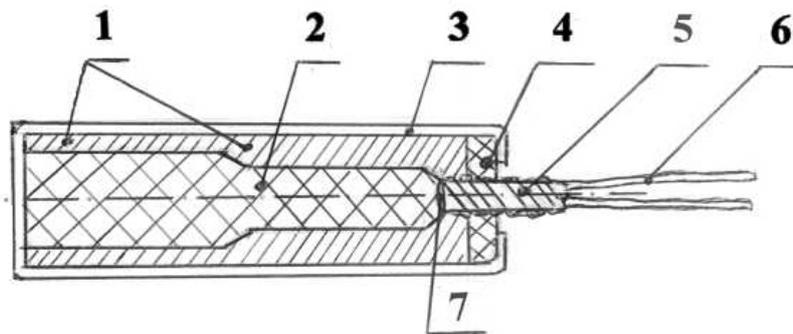


Рис. 2 – Конструкция электрического детонатора:

*1- конструкция прочного корпуса 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*

При отработке и испытаниях разработанных детонаторов были выявлены:

1. Высокая устойчивость к электрическим разрядам и электрическим наводкам.
2. Высокая устойчивость к механическим воздействиям:
  - при подрыве 5 граммового заряда аммонита № 6ЖВ, находящегося в контакте с боковой стенкой детонатора, не было зафиксировано ни одного случая их срабатывания;
  - при испытании наблюдались случаи деформации корпуса детонатора осколками разрушаемых отражателей, поврежденные детонаторы не инициировали;
  - при обрыве электропроводов с нарушением целостности электрического детонатора подрыва не наблюдалось.

3. Высокая устойчивость электрического детонатора с мембранной герметизацией к открытому огню, при температуре до  $2500^{\circ}\text{C}$  наблюдался легкий звуковой хлопок и выгорание ТЭНа, характерных разрушений корпуса детонатора вызываемых детонацией не обнаружено.

4. Высокая функциональность:

- инициирует штатные и промышленные ВВ: октоген, тротил, аммонит скальный № 3, аммонит № 6ЖВ, АС-8 в насыпном и в прессованном виде, а также детонирующий порошок марки «1367Гв.1»;

- пробивает по стандартной пробе свинцовые пластины толщиной 6 мм, образуя отверстия диаметром до 27 мм.

На инициирование разработанного электрического детонатора затрачивается энергия примерно 2,5 Дж. Проведенные исследования показали, что энергию электрического инициирования детонатора возможно уменьшить. Для этого следует провести оптимизацию конструкции внутренних каналов детонатора и начальной энергии для инициирования ВВ. Оптимизация может также показать новые возможности применения детонаторов такой конструкции в иных отраслях народного хозяйства, что позволит отказаться от низковольтных промышленных детонаторов старых конструкций с первичным ВВ.

### 3. Расчетная модель

В упрощенном виде внутренний канал детонатора представляет собой два цилиндра разных диаметров, соединенных между собой усеченным конусом (рис.3). Цилиндр меньшего диаметра закрыт заглушкой, цилиндр большего диаметра свободно сообщается с атмосферой.

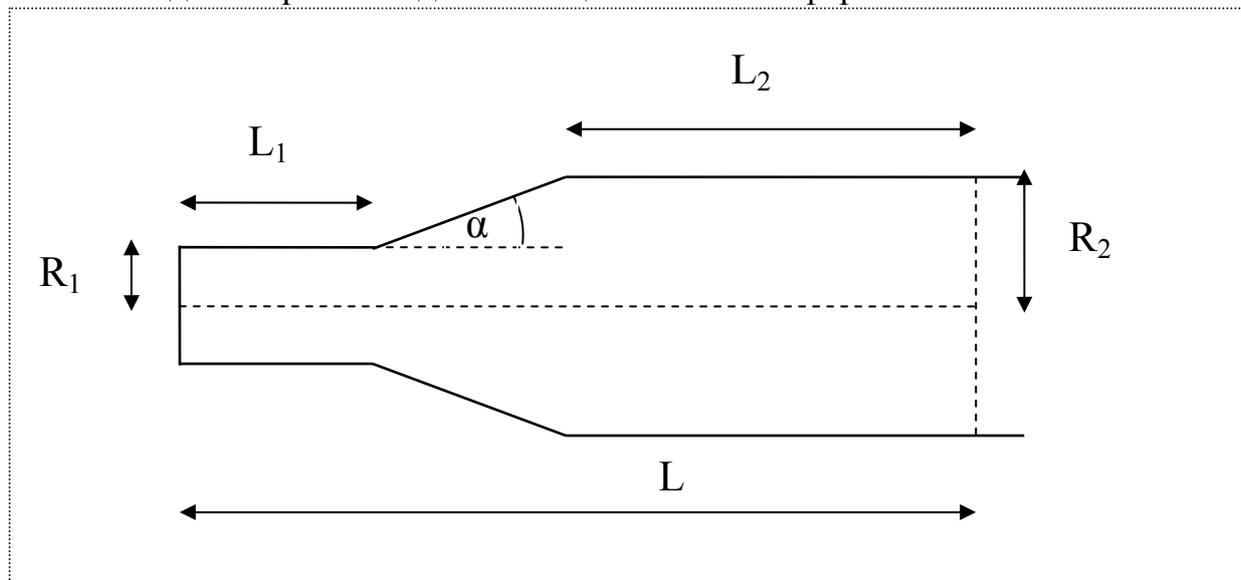


Рис. 3 – Общий вид внутреннего канала детонатора

Величины  $L, L_1, L_2, R_1, R_2$  являются варьируемыми параметрами задачи.

Внутренний канал детонатора заполнен мелкокристаллическим сыпучим взрывчатым веществом (ВВ) тэном. Иницирование тэна осуществляется с левого (узкого) конца детонатора. В зависимости от параметров иницирующего импульса и геометрических характеристик канала ВВ либо горит, либо детонирует.

Для моделирования процесса горения и детонации используются уравнения тепло и гидродинамики, дополненные уравнениями состояния вещества. Из осевой симметричности камеры сгорания следует, что при использовании цилиндрических координат задача является двумерной. Рассмотрим задачу в упрощенной постановке, сведя ее к одномерной. Введем понятие пористости среды. Разобьем корпус детонатора на контрольные 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, осевая скорость и внутренняя энергия. 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

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

Система (3) совпадает с системой непористой гидродинамики за исключением последних членов в каждом из уравнений, которые и учитывают переменность профиля канала.

Молекула тэна  $C[CH_2ONO_2]_4$  разлагается на следующие компоненты  $C[CH_2ONO_2]_4 \rightarrow 4H_2O + 3CO_2 + 2CO + 2N_2$  [3].

Образующиеся компоненты после окончания химической реакции имеют не только высокую температуру, но и плотность, сравнимую по порядку величины с исходной плотностью тэна, то есть являются реальными газами. Существует большой набор уравнений состояний для описания веществ с такими параметрами, в частности основанных на подходе Ми-Грюнайзена. Нас, однако, будут интересовать уравнения состояния, параметры которых достаточно хорошо известны для тэна. Одним из них является уравнение JWL, имеющее вид:

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

Здесь  $\rho_0$  - начальная плотность взрывчатого вещества,  $E = \rho \varepsilon$ .

В [4] для тэна приведены значения входящих в уравнение (5) констант, как для ВВ, так и для продуктов детонации.

Табл. 2

Параметры модели для ВВ

$\rho_0$ , кг м <sup>-3</sup>	A, ГПа	B, ГПа	$C_V$ , МПа/К	$R_1$	$R_2$	$\gamma$
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

$\rho_0$ , кг м <sup>-3</sup>	A, ГПа	B, ГПа	$C_V$ , МПа/К	$R_1$	$R_2$	$\gamma$	Q, ГПа
1000	2372	106.1	1.	5.6	1.8	0.24	5.706
1600	6253	232.9	1.	5.25	1.6	0.28	9.13
1720	6170	169.26	1.	4.4	1.2	0.25	9.815

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

Процесс горения ВВ промоделируем, используя уравнение химической кинетики. Введем концентрацию продуктов детонации согласно формуле

$$\lambda = \frac{m_{ПД}}{m_{ПД} + m_{ВВ}},$$

где  $m_{ПД}$  - масса продуктов детонации,  $m_{ВВ}$  - масса исходного ВВ, находящихся в выделенном объеме. Для фиксированной массы вещества, изменение концентрации согласно [4], описывается двучленным (поджиг-горение) уравнением

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1 - \lambda)^{2/9} \eta^4 + G(1 - \lambda)^{2/9} \lambda^{2/3} p^z, \quad (5)$$

где

$$\eta = \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \geq 0.$$

Для ТЭНа константы принимают следующие значения:

$$I = 2 \times 10^7 \text{ сек}^{-1}, G = 4 \times 10^8 \text{ Мбар}^{-z} \text{ сек}^{-1}, z = 1,4,$$

давление  $p$  измеряется в Мегабарах.

Если ВВ инициируется путем нагрева, то формула (5) не позволяет осуществить поджиг (оба члена равны нулю). В этом случае используем уравнение типа Аррениуса

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

где для ТЭНа, согласно [5],  $J = 6.3 \times (\rho_0/1.778) \times 10^{19} \text{ сек}^{-1}$ ,  $E$ ,  $R$  – энергия и газовая постоянная моля вещества.

Таким образом, процесс детонации, согласно формулам (2, 4, 5), будем описывать следующей системой уравнений.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha\rho)}{\partial t} &= -\frac{\partial(\alpha\rho u)}{\partial z} \\ \frac{\partial(\alpha\lambda\rho)}{\partial t} &= -\frac{\partial(\alpha\lambda\rho u)}{\partial z} + \alpha\rho W \\ \frac{\partial(\alpha\rho u)}{\partial t} &= -\alpha \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial(\alpha\rho u^2)}{\partial z} \\ \frac{\partial[\alpha E]}{\partial t} &= -\frac{\partial(\alpha u E)}{\partial z} - p \frac{\partial(\alpha u)}{\partial z} + \alpha Q + \alpha Q_{in} \\ p &= A \left( 1 - \frac{\gamma\rho}{R_1\rho_0} \right) \exp\left(-R_1 \frac{\rho_0}{\rho}\right) + B \left( 1 - \frac{\gamma\rho}{R_2\rho_0} \right) \exp\left(-R_2 \frac{\rho_0}{\rho}\right) + \gamma E \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь  $Q_{in}(r,t)$  – вводимое в систему количество теплоты, необходимое для инициации горения или детонации,  $W$  – правая часть уравнения (5) или (6).

Граничные условия:

- на левой границе скорость равна нулю (заглушка), на правой границе давление равно атмосферному.

Начальные условия:

- давление равно атмосферному, концентрация ПД равна нулю, внутренняя энергия определяется из уравнения состояния.

#### 4. Верификация модели

Для верификации модели использовался одномерный тест ( $\alpha = 1$ ) с начальной плотностью  $\rho_0 = 1720 \text{ кг м}^{-3}$ . Количество теплоты  $Q_{in}$  вкладывалось только в первую ячейку равномерно по времени в течение  $10^{-11}$  сек, интегральный вклад равен 2.5 Дж.

К моменту времени  $t = 5$  микросекунд установился следующий профиль давления (рис. 4).

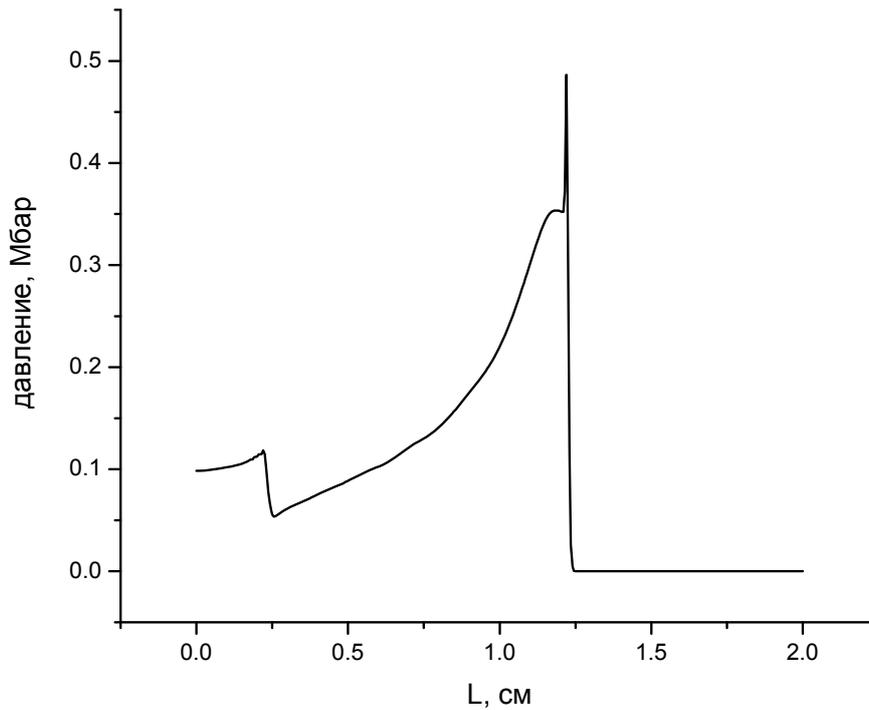


Рис. 4 – Давление в канале детонатора

На этом графике точка Неймана соответствует пику давления, а точка Чепмена-Жуге первой справа, полностью выгоревшей ячейке. В [3, 4] для начальной плотности  $\rho_0 = 1720 \text{ кг/м}^3$  приведены значения основных параметров в этих точках (см. табл. 4, 5).

Табл. 4

Точка Неймана

	$U$ , м сек <sup>-1</sup>	$P$ , Па	$\rho_0 / \rho$	$D$ , м сек <sup>-1</sup>	$E$ , Па
[1, 2]	3188	$4.52 \times 10^{10}$	0.6068	8210	-----
Авторы	2900	$4.86 \times 10^{10}$	0.6659	9200	$1.93 \times 10^{10}$

## Точка Чепмена-Жуге

	U, м сек <sup>-1</sup>	P, Па	$\rho_0 / \rho$	D, м сек <sup>-1</sup>	E, Па
[1, 2]	3188	$4.52 \times 10^{10}$	0.6068		$1.1 \times 10^{10}$
Авторы	2250	$3.72 \times 10^{10}$	0.7069		$1.86 \times 10^{10}$

Таким образом, расчетная модель по порядку величины дает приемлемые значения, и ее можно использовать на этапе качественного анализа процесса детонации в канале.

### 5. Результаты расчетов

Ниже представлены результаты расчетов нескольких вариантов детонатора с варьируемой длиной  $L_1$ .

Начальная плотность ВВ принята равной  $\rho_0 = 1000 \text{ кг м}^{-3}$ . Количество теплоты  $Q_{in} = 2.5$  Дж вкладывалось только в первую ячейку, равномерно по времени в течение  $10^{-11}$  сек.

Для моментов времени 1,2,3,4,5 микросекунд приведены графики концентрации ПД, массовой скорости и давления как функций переменной  $z$ . Пунктирной линией обозначен контур детонатора.

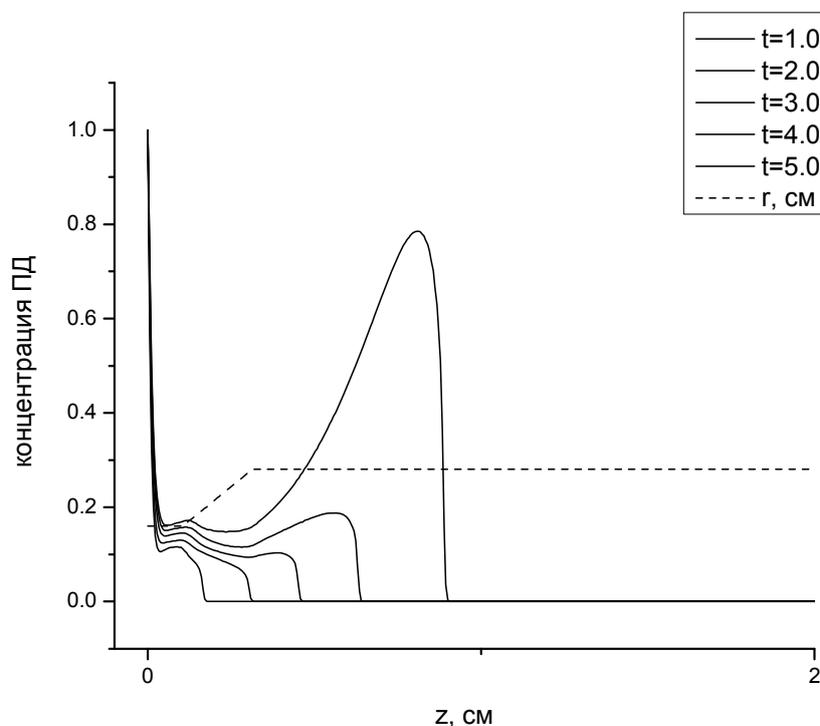
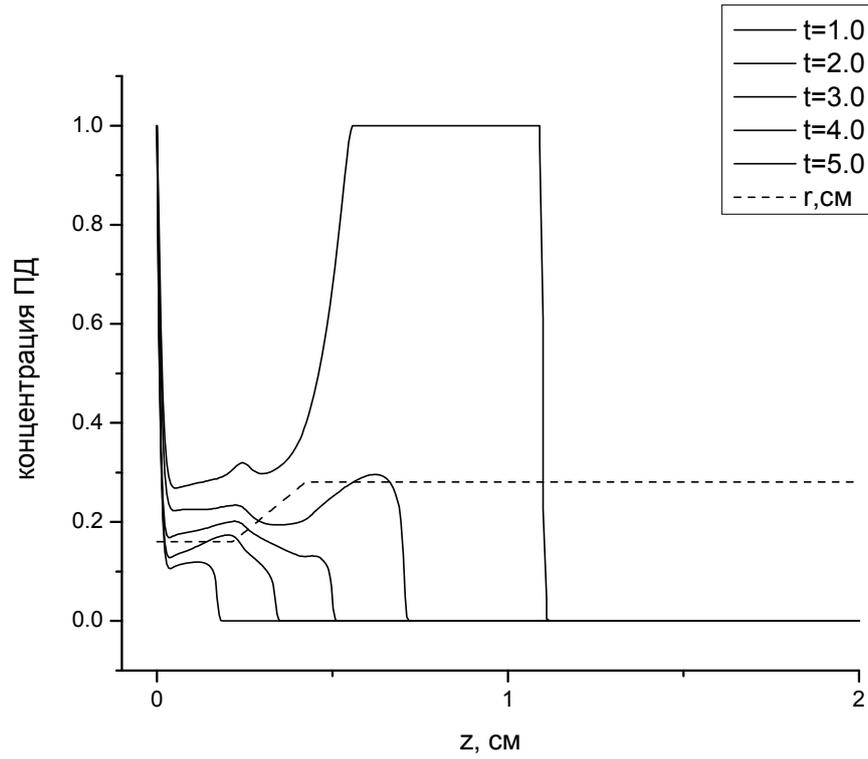
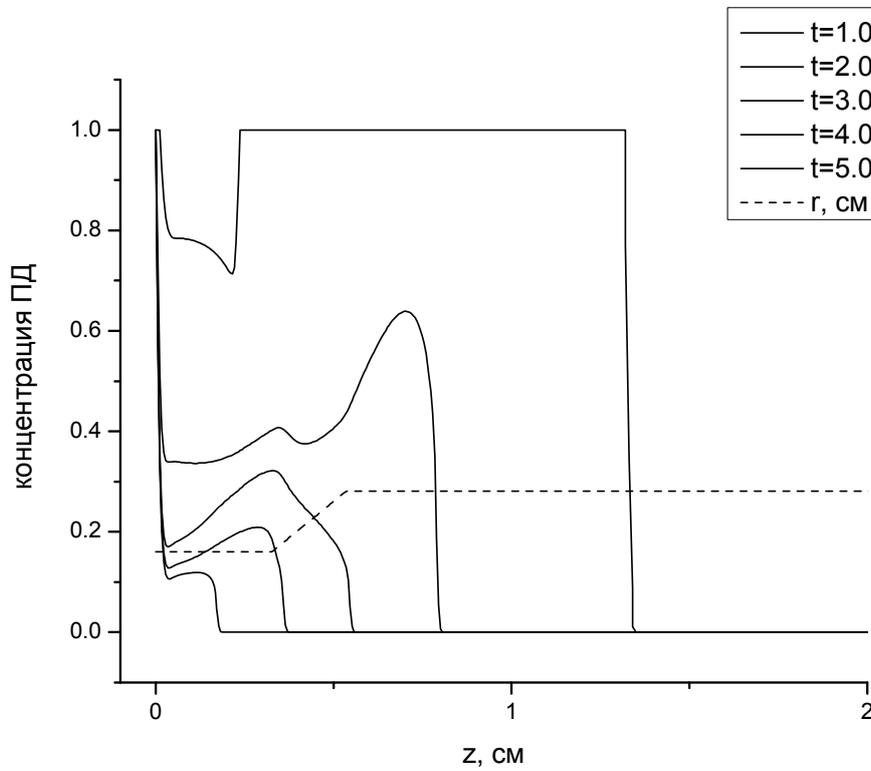
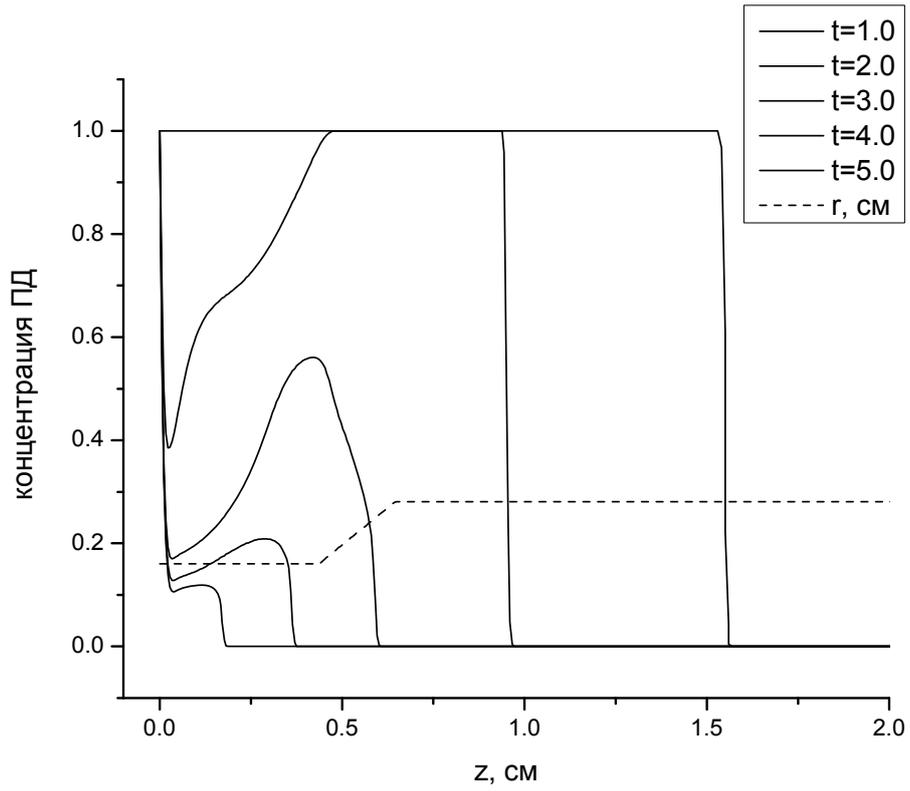
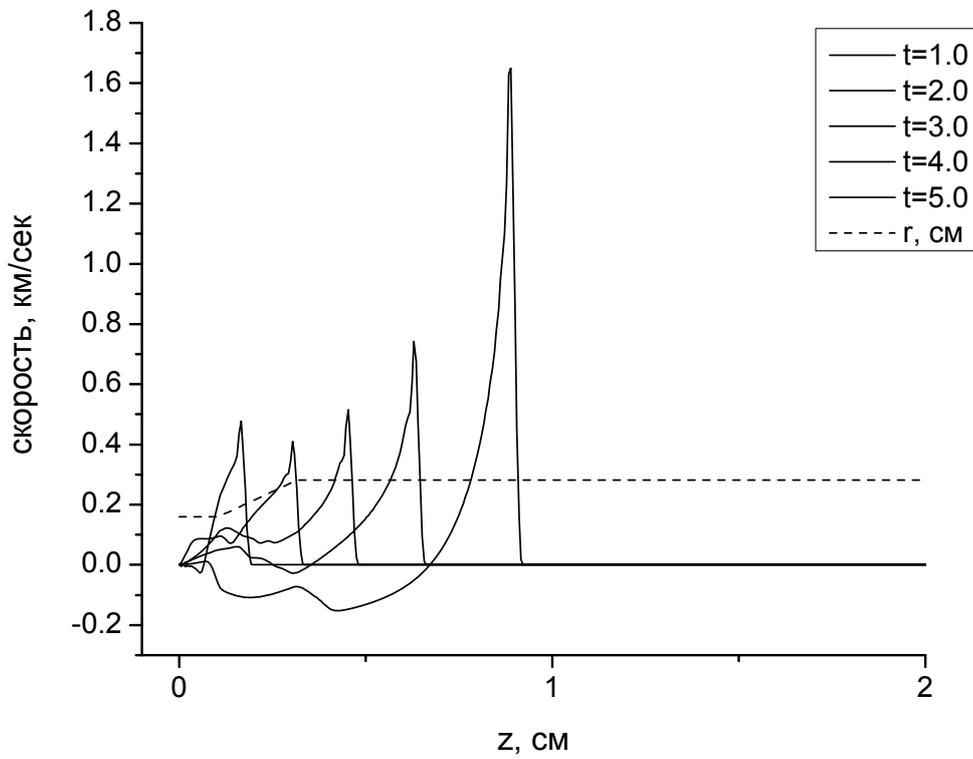
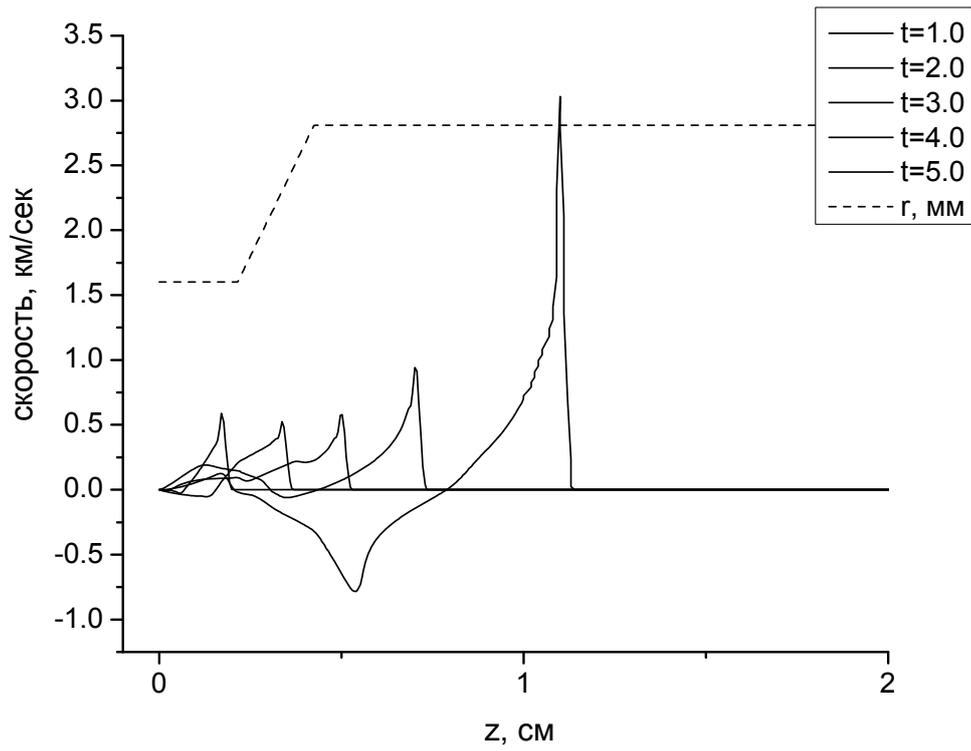
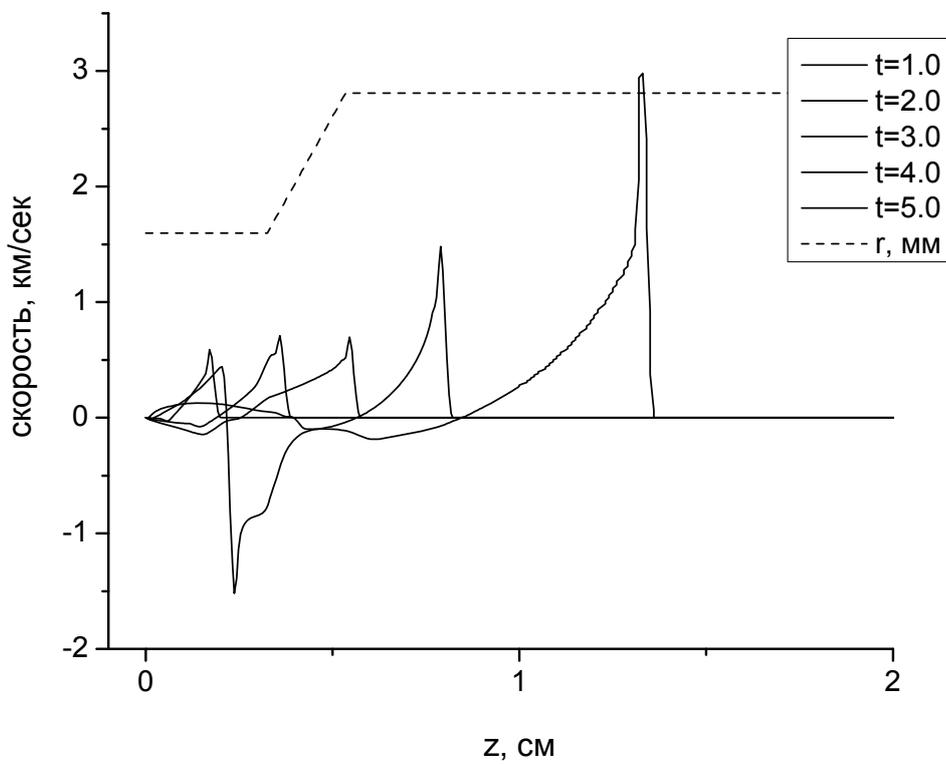
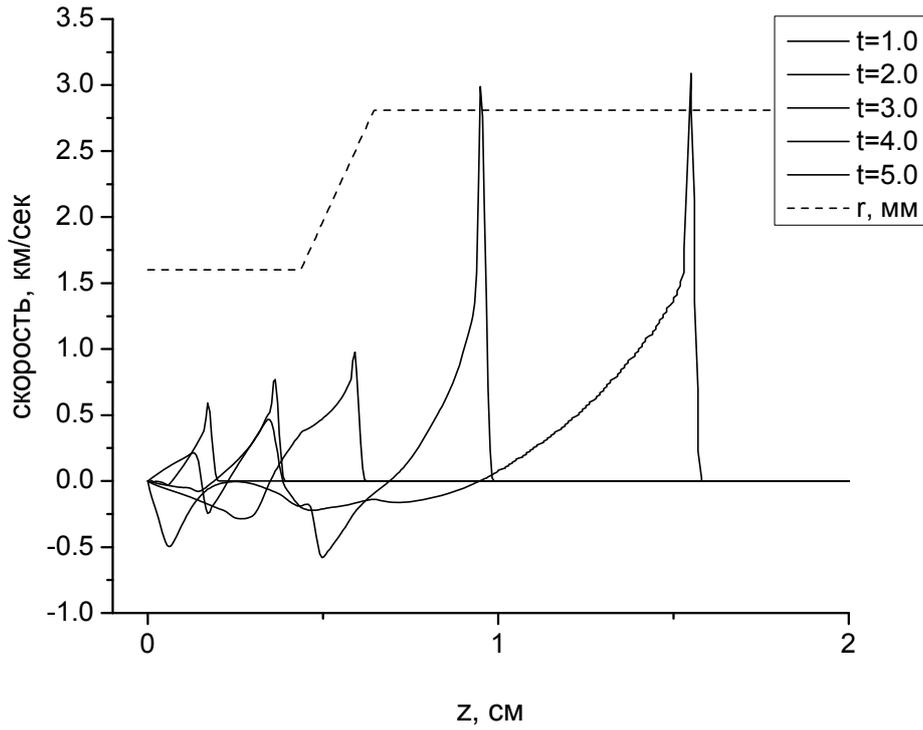
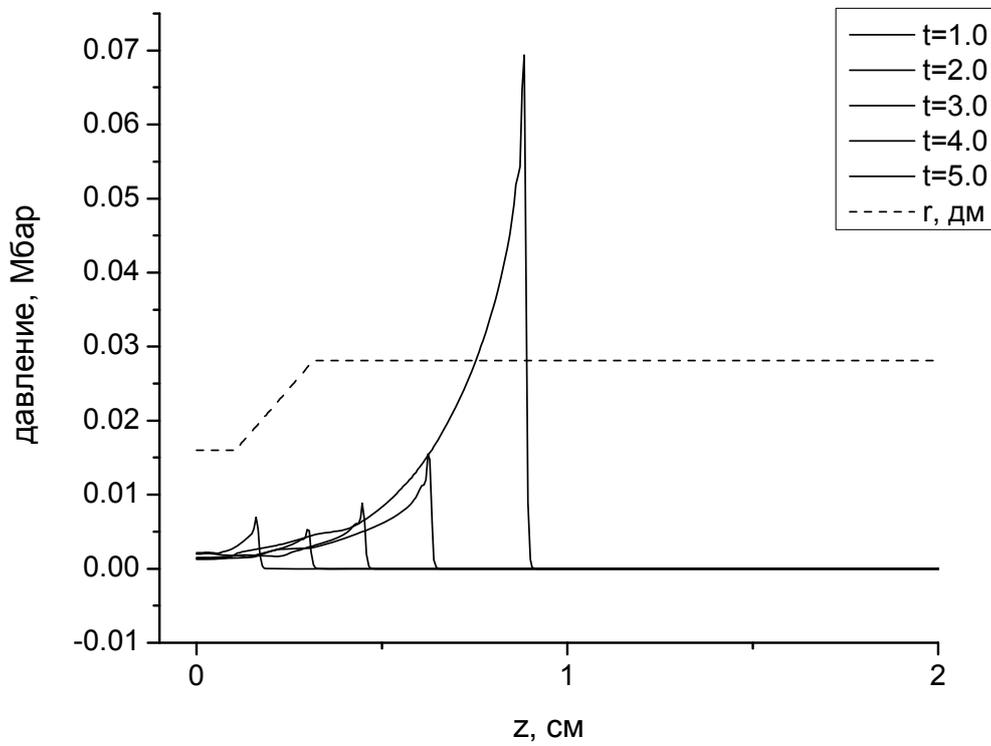


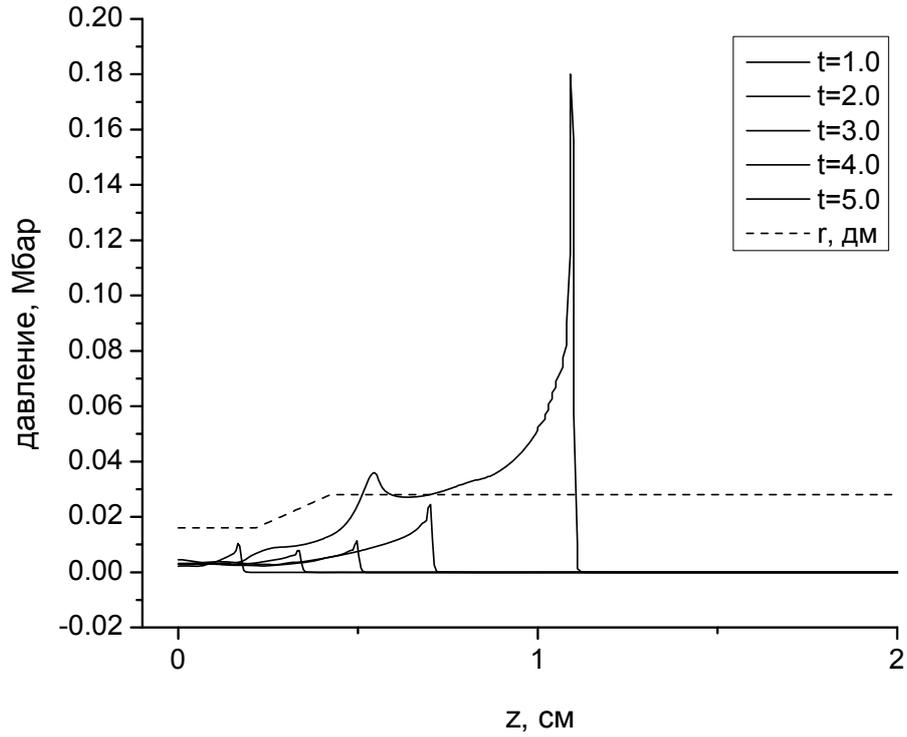
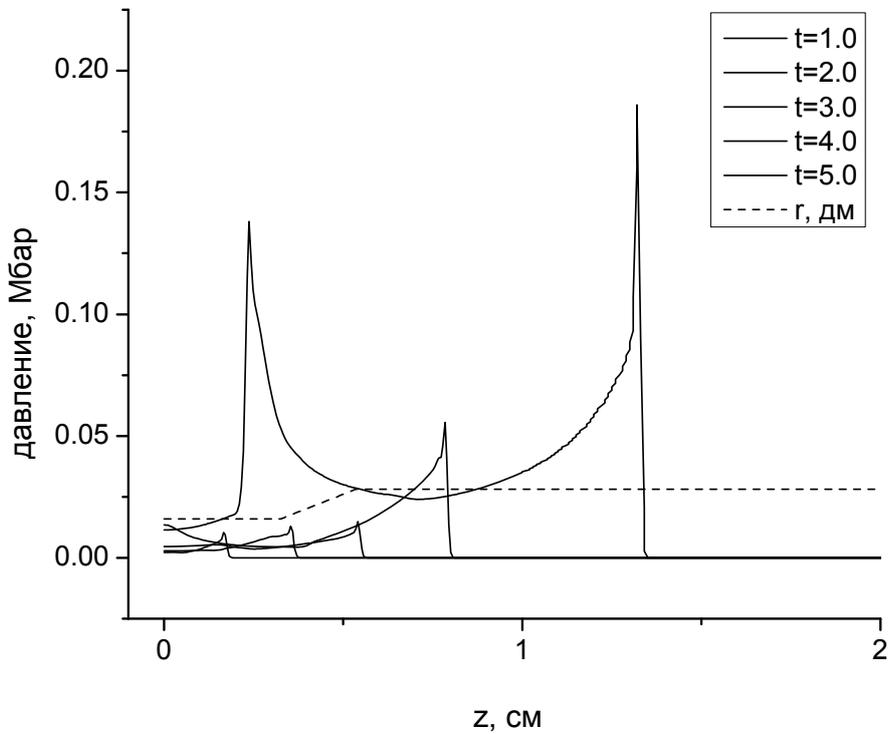
Рис. 5 – Концентрация ПД для  $L_1=0.16$  см

Рис. 6 – Концентрація ПД для  $L_1=0.27$  смРис. 7 – Концентрація ПД для  $L_1=0.38$  см

Рис. 8 – Концентрация ПД для  $L_1=0.49$  смРис. 9 – Скорость ПД для  $L_1=0.16$  см

Рис. 10 – Скорость ПД для  $L_1=0.27$  смРис. 11 – Скорость ПД для  $L_1=0.38$  см

Рис. 12 – Скорость ПД для  $L_1=0.49$  смРис. 13 – Давление ПД для  $L_1=0.16$  см

Рис. 14 – Давление ПД для  $L_1=0.27$  смРис. 15 – Давление ПД для  $L_1=0.38$  см

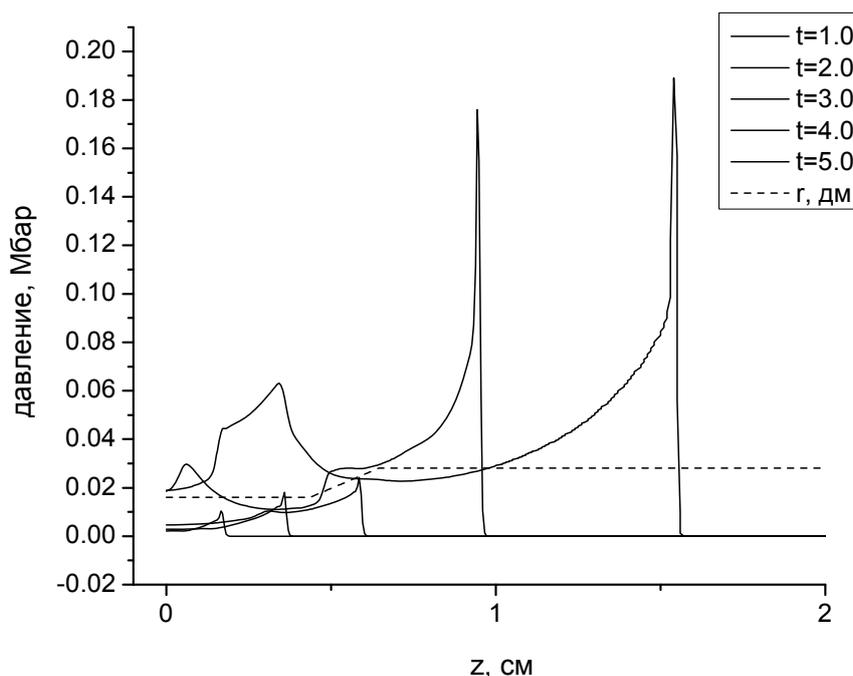


Рис. 16 – Давление ПД для  $L_1=0.49$  см

## 6. Заключение

Построенная модель позволяет проанализировать влияние длины детонатора на эффективность инициирования.

Расчеты показали, что в конусной части детонатора (при движении в положительном направлении) происходит падение плотности, импульса и энергии, то есть, согласно системе (3) эта часть детонатора работает как сток. В случае короткого запала детонационная волна не успевает набрать достаточной энергии и в зоне рассеяния детонация ослабляется, либо вырождается в горение (см. графики концентрации ПД на рис. 5, 6) с последующим возобновлением режима детонации. При этом в режиме горения успевает прореагировать значительная часть ВВ. Массовая скорость (рис. 9, 10) и давление (рис. 13, 14) в этом случае заметно меньше стандартных величин для ТЭНа плотностью  $1000 \text{ кг м}^{-3}$ .

В случае же длинного запала, энергии волны детонации хватает для прохождения зоны разряжения без срыва режима детонации в режим горения. При выходе из конусной части детонационная волна достаточно быстро выходит на стационарный режим (рис. 12, 16) и большая часть ВВ реагирует в стандартном режиме.

В случае короткого запала детонационная волна не успевает набрать достаточной энергии и в зоне рассеяния детонация вырождается в горение (см. график концентрации ПД на рис. 4) с последующим возобновлением режима детонации. В случае же длинного запала энергии волны детонации хватает для прохождения зоны разряжения без срыва режима детонации в режим горения.

## Литература

1. Кушнёров П.И. Безопасность электровзрывания в угольных шахтах. М.: Недра, 1980. 87с.
2. 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.
3. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. Т.1.М.:ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 832с.
4. E.L. Lee, S.M. Tarver, Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives. // Phys. Fluids 23(12), December 1980.
5. J.J. Rimoli, E. Gurses, and M. Ortiz, Shock-induced subgrain microstructures as possible homogenous sources of hot spots and initiation sites in energetic polycrystals. // Phys. Rev. B 81, January 2010.