

Physico-Mathematical Model of Laser Detonator

Kuratov S., Serezhkin A., Chesnokov A.

All-Russian Reseach Institute of Automatics (VNIIA)
syfeer@gmail.com

Abstract

This work presents method of calculation of the physical processes in optical detonator. 2D mathematical modeling in program "TIS" of optical detonator explosive channel was done. The model of powder deflagration was used to describe kinetics of PETN. Numerical results were compared with experimental data.

Keywords: optical detonator, detonation, multiphase dynamics, PETN

УДК 544.032.65

Физико-математическая модель лазерного детонатора

С.Е. Куратов, А.А. Серёжкин, А.А. Чесноков

ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва

syfeer@gmail.com

Аннотация

В работе представлена методика расчёта физических процессов, протекающих при работе лазерного детонатора. Проведены двухмерные расчёты в комплексе "ГИС" зарядового канала лазерного детонатора. Для описания кинетики горения пористого ТЭНа предлагается модель горения пороха. Полученные результаты сопоставляются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: лазерный детонатор, детонация, многофазовая динамика, ТЭН

1. Введение

В настоящее время существует множество работ [1]-[8], посвящённых разработке и модификации лазерного детонатора, и большинство технических решений было сделано в результате экспериментальных исследований, однако имеется существенный пробел в теоретических исследованиях по данному направлению, что приостанавливает дальнейшее развитие лазерных систем подрыва (ЛСП).

Основной сложностью теоретического исследования и построения физико-математической модели лазерного детонатора является наличие отдельных самостоятельных физических проблем. К таким задачам относятся исследование оптических процессов происходящих при взаимодействии лазерного излучения с взрывчатыми веществами (ВВ), кинетика горения и детонации пористого и сплошного ВВ, и другие. В связи с этим для создания модели лазерного детонатора необходимо последовательно решить соответствующие задачи.

2. Лазерный детонатор

Детонатор представляет собой конструкцию, состоящую из трёх основных частей: лазерного канала, оптической системы и зарядового канала. Принципиальная схема лазерного детонатора изображена на рисунке 1.

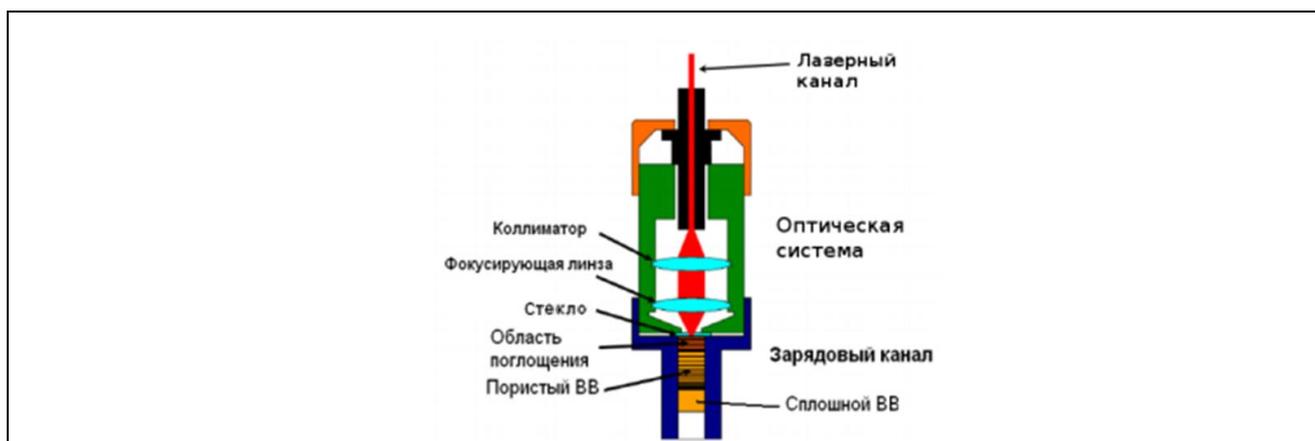


Рис. 1. Схема лазерного детонатора

Лазерный импульс, распространяясь по оптоволокну, попадает в оптическую систему, откуда луч направляют на ВВ. При облучении ВВ импульсом достаточной мощности происходит зажигание, горение и детонация. Окно необходимо для удержания давления в системе до начала самоподдерживающихся процессов.

В большинстве экспериментов используется лазер на неодимовом стекле с длиной волны излучения 1,06 мкм, шириной импульса 10-40 нс и плотностями энергии 10-50 Дж/см.

В данной работе исследуется и моделируется зарядовый канал лазерного детонатора. Зарядовый канал представляет собой систему, состоящую из наружной оболочки, удерживающего окна и заряда ВВ, состоящего из пористого и сплошного пентаэритриттетранитрата (ТЭН). Для разработки и модификации конструкции лазерного детонатора было проведено множество экспериментов по воздействию лазерного излучения на ВВ (ТЭН, гексоген, тротил) [9], [10]

3. Взаимодействие лазерного излучения с ВВ

Основным элементом при построении модели зарядового канала лазерного детонатора, является понимание процессов, происходящих при взаимодействии лазерного излучения с взрывчатым веществом.

В работе [10] были получены экспериментальные и полуэмпирические зависимости коэффициентов пропускания, поглощения и отражения от толщины образца при слабых потоках излучения. Однако эти результаты представляют интерес только на начальном этапе воздействия лазерного импульса, когда взаимодействие с ВВ можно описать линейными законами. При достижении некоторого энергетического порога происходит изменение свойств ВВ. Это существенно влияет на характеристики поглощения, отражения и пропускания вещества. Так коэффициент отражения изменяется с 0.95 [10] до 0.5 [9]. Авторы работ [9], [11] указывают на различные механизмы изменения оптических характеристик, а, следовательно, и процессы инициирования ВВ.

4. Кинетика ВВ

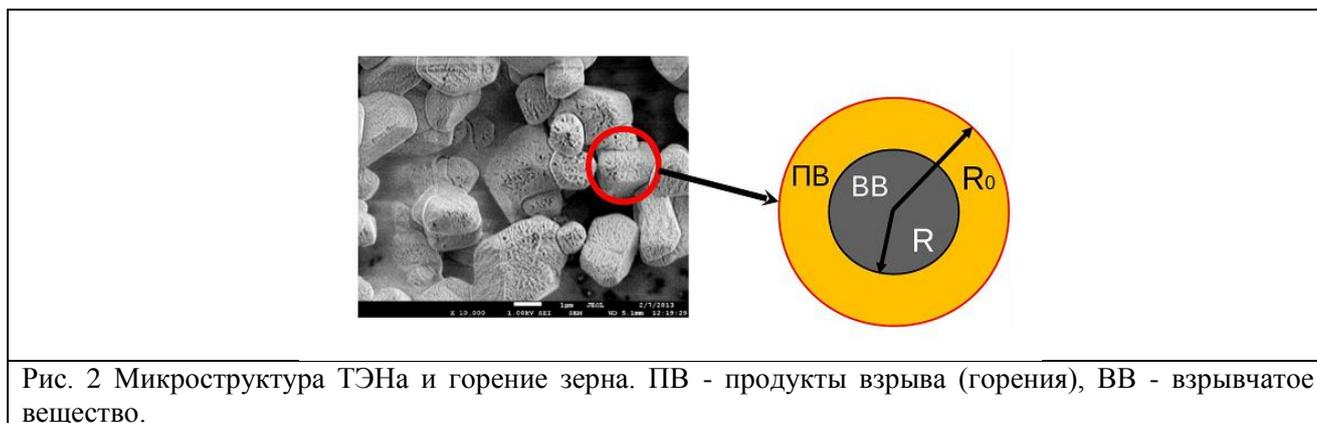
Главная проблема в моделировании горения и детонации ВВ - это математическое описание кинетики. Существует множество подходов и моделей к расчёту горения и детонации ВВ: кинетика горения Аррениуса и её производные, модель Копышева и т.д. [12]. Так для описания кинетики сплошного ТЭНа используется модель Ли-Тарвера [13]:

$$\dot{\lambda} = I(1 - \lambda)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^\chi + G_1(1 - \lambda)^l \lambda^d P^\psi + G_2(1 - \lambda)^l \lambda^g P^\zeta \quad (1)$$

Значения констант для сплошного ТЭНа:

$$I = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с}; b = 0.222; l = 0.222; d = 0; g = 0.666; \chi = 4; \psi = 0; \zeta = 1.4; G_1 = 0; G_2 = 400.$$

В настоящее время отсутствуют кинетики адекватно описывающие сильнопористый ТЭН. Однако, толщина пористого слоя ВВ в зарядовом канале лазерного детонатора равна 1 мм, что сопоставимо с критическим диаметром ТЭНа (1,0-1,5 мм) [14], следовательно, маловероятен процесс формирования детонации в пористом слое, а значит происходит процесс горения, и могут быть применимы модели горения ВВ. В связи с этим, в настоящей работе предлагается использовать модель горения порохов для описания поведения пористого ТЭНа.



Выведем кинетику, исходя из простых аналитических соображений.

На рисунке 2 (слева) изображена микроструктура пористого ТЭНа. Видно, что ВВ представляет собой обособленные кристаллы размером около 4 мкм. Исходя из этого рассмотрим модель ВВ как систему, состоящую из сферически симметричных зёрен (кристаллов) диаметром равным характерному размеру реального кристалла (рис. 2 справа).

Рассмотрим горение одного зерна ВВ массой M и радиусом R_0 . Закон изменения радиуса зерна ВВ на некоторый момент времени определяется как $R = R_0 - Ut$, где R – текущий радиус, а U – скорость горения зерна.

Массовую концентрацию ВВ можно определить следующим образом (M_{vv} – текущее значение массы ВВ):

$$\varphi = \frac{M_{vv}}{M}; M = \rho \frac{4}{3} \pi R^3; \varphi = \frac{R^3}{R_0^3}. \quad (2)$$

Скорость изменения концентрации ВВ:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{3R^2}{R_0^3} \frac{dR}{dt}; \frac{dR}{dt} = -U. \quad (3)$$

Основываясь на модели горения порохов [15], скорость горения элемента пороха зависит от внешнего давления:

$$U = U_0 P^\nu \quad (4)$$

где U_0, ν – некоторые константы. Следовательно, кинетика горения ВВ:

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{3\varphi^{\frac{2}{3}}}{R_0} U_0 P^\nu \quad (5)$$

Данная формула обладает рядом недостатков, однако вполне применима в рамках рассматриваемой задачи.

5. Математическая формулировка

Рассмотрим ВВ как сплошную упругопластическую однокомпонентную среду, которая под действием физических факторов может переходить в двухфазное состояние (ВВ+ПВ), вторая фаза (ПВ) является газообразной. Для описания смеси будем пользоваться односкоростным приближением, то есть, в рассматриваемой точке среды давление и скорости каждой фазы совпадают. Внутренняя энергия смеси будет равна сумме значений внутренней энергии каждой фазы с коэффициентом массовой концентрации λ . Общая плотность будет складываться из истинной плотности каждой фазы, взятой с соответствующим коэффициентом объемной концентрации:

$$e = (1 - \lambda)e_{BB}(\rho_{BB}, P) + \lambda e_{PB}(\rho_{PB}, P) \quad (6)$$

$$\rho = \beta\rho_{BB} + (1 - \beta)\rho_{PB} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{(1 - \lambda)\rho}{\rho_{BB}} \quad (8)$$

где β – объёмная доля вещества ВВ, λ – массовая доля вещества ПВ, ρ – плотность, e – внутренняя энергия.

Состояние каждой фазы описывается соответствующим уравнением $e_{BB} = e_{BB}(\rho_{BB}, P)$, $e_{PB} = e_{PB}(\rho_{PB}, P)$, внутренняя энергия фазы зависит от давления и истинной плотности фазы. При описании состояния смеси будем пользоваться единым уравнением состояния (УРС) $e = e(\rho, P)$, $P = P(\rho, e)$, которое строится следующим образом. Если в расчетной ячейке присутствует только одна фаза (чистое ВВ, или ПВ), то в качестве единого УРС используется УРС соответствующей фазы без изменения. Если же в расчетной ячейке присутствуют обе фазы ($0 < \lambda < 1$), это означает, что в ячейке идет процесс превращения ВВ в ПВ. Положим, что этот процесс протекает быстро, поэтому пренебрежем изменением плотности ВВ в данной лагранжевой точке. То есть, при $0 < \lambda < 1$, $\rho_{BB} = const$. Это позволяет определить истинные плотности фаз, значение истинной плотности продуктов взрыва будет равно

$$\rho_{PB} = \frac{\rho - \beta\rho_{BB}}{1 - \beta} \quad (9)$$

Для описания состояния ВВ используется УРС Ми-Грюнайзена:

$$P_{BB_{хол}} = \frac{\rho_0 c_0^2}{n} (\delta_{BB}^n - 1); e_{BB_{хол}} = \frac{c_0^2}{n} \left(\frac{\delta_{BB}^{n-1} - 1}{n-1} + \frac{1}{\delta_{BB}} - 1 \right) \quad (10)$$

$$P = P_{BB_{хол}} + \Gamma\rho(e - e_{хол})$$

где Γ – константа Грюнайзена, c_0 – скорость звука, δ – сжатие, n – константа. Для описания состояния ПВ используется УРС JWL:

$$P = P_{PB_{хол}} + \omega e \rho_{0PB}$$

$$P_{PB_{хол}} = A \left(1 - \frac{\omega \delta_{PB}}{R_1} \right) \exp\left(-\frac{R_1}{\delta_{PB}} \right) + B \left(1 - \frac{\omega \delta_{PB}}{R_2} \right) \exp\left(-\frac{R_2}{\delta_{PB}} \right) \quad (11)$$

где A, B, R_1, R_2, ω – константы.

Отметим, что $\rho_{0BB} = \rho_{0PB} = \rho_0$.

Таким образом, вид единого уравнения состояния будет следующим:

$$e = (1 - \lambda) \frac{P - P_{BB_{хол}} + \Gamma\rho_{BB} e_{BB_{хол}}}{\Gamma\rho_{BB}} + \lambda \frac{P - P_{PB_{хол}}}{\omega\rho_0} \quad (12)$$

или

$$P = \frac{e + \frac{(1 - \lambda)P_{BB_{хол}}}{\Gamma\rho_{BB}} - (1 - \lambda)e_{BB_{хол}} + \lambda \frac{P_{PB_{хол}}}{\omega\rho_0}}{\frac{(1 - \lambda)}{\Gamma\rho_{BB}} + \frac{\lambda}{\omega\rho_0}} \quad (13)$$

Значения констант уравнений состояния для ТЭНа:

$$\rho_0 = 1.75 \text{ г/см}^3; c_0 = 4.8778 \text{ км/с}; n = 3; \Gamma = 0.6667;$$

$$A = 589.2 \text{ ГПа}; B = 16.926 \text{ ГПа}; R_1 = 4.4; R_2 = 1.2; \omega = 0.25$$

Система определяющих соотношений, моделирующая поведение сплошного ТЭНа, записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + P - S_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv - S_{xy})}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv - S_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2 + P - S_{yy})}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial(\rho Eu + Pu - S_{xx}u - S_{xy}v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho Ev + Pv - S_{yy}v - S_{xy}u)}{\partial y} &= \rho Q \dot{\lambda} \\ \frac{\partial \rho S_{xx}}{\partial t} + \frac{\partial(\rho S_{xx}u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho S_{xx}v)}{\partial y} + \rho \left(-S_{xy} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \rho S_{xx} &= 0 \\ \frac{\partial \rho S_{xy}}{\partial t} + \frac{\partial(\rho S_{xy}u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho S_{xy}v)}{\partial y} + \rho \left(-\frac{S_{xx} - S_{yy}}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) - \rho S_{xy} &= 0 \\ \frac{\partial \rho S_{yy}}{\partial t} + \frac{\partial(\rho S_{yy}u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho S_{yy}v)}{\partial y} + \rho \left(-S_{xy} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{v}{y} \right) - 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \rho S_{yy} &= 0 \\ \frac{\partial \rho \lambda}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \lambda u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \lambda v)}{\partial y} &= \rho \dot{\lambda} \end{aligned} \tag{14}$$

где S – девиатор, E – полная энергия, Q – калорийность ВВ. Здесь

$$\mu = \mu_0(1 - \lambda), \mu_0 = 4.7 \text{ ГПа}, - \text{ модуль сдвига}, \rho = \begin{cases} \frac{3\mu S_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}{2Y^2}, & S_{ij} S_{ij} = \frac{2Y^2}{3} \\ 0, & S_{ij} S_{ij} < \frac{2Y^2}{3} \end{cases} - \text{ коэффициент}$$

приведения на поверхность текучести ($\dot{\epsilon}_{ij}$ – компоненты тензора скоростей деформации), в качестве критерия пластичности выбран критерий Мизеса со значением предела текучести $Y = Y_0(1 - \lambda)$, $Y_0 = 0.2 \text{ ГПа}$. Заметим, что значения констант упругопластической модели зависят от массовой концентрации ПВ (поскольку ПВ – газообразная среда), данная зависимость может быть более сложной, однако в первом приближении воспользуемся обозначенной линейной зависимостью.

Для системы уравнений, описывающей поведение пористого ВВ, методика численного расчета будет строиться аналогично. На первом этапе будет производиться расчет уравнений законов сохранения (значения девиаторов равны нулю, поскольку система рассматривается в гидродинамическом приближении), второй этап фактически отсутствует, а третий этап аналогичен решению для сплошного ВВ.

6. Численное моделирование зарядового канала лазерного детонатора

Область моделирования лазерного детонатора представлена на рисунке 3. Здесь охватывается вся область зарядового канала, включая удерживающее окно, что позволяет проследить сразу весь ход физических событий в канале.

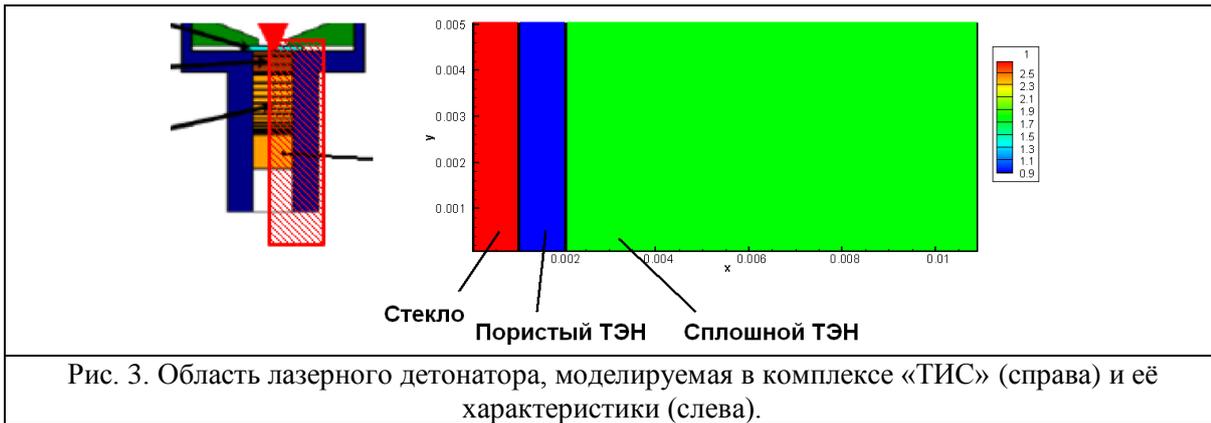


Рис. 3. Область лазерного детонатора, моделируемая в комплексе «ТИС» (справа) и её характеристики (слева).

Моделирование системы проводилось в программном комплексе «ТИС» [12], который предназначен для расчётов механики сплошных сред.

В данный комплекс, для описания разложения пористого ТЭНа, была внедрена полученная кинетика горения пористого ВВ. Константы (U_0, ν) берутся из молекулярно-динамических расчётов [16]. Сплошной ТЭНа описывается моделью Ли-Тарвера.

Для моделирования воздействия лазерного импульса, в область пористого ВВ вводится источник со следующими характеристиками [17], [18]:

$$Q = J \frac{(1 - R)}{\sqrt{\pi} \delta \tau} e^{-(t/\tau)^2} e^{-(a/R_0)^2} e^{-(z/\delta)} \quad (15)$$

где J, R, τ, δ, R – плотность энергии, коэффициент отражения, ширина импульса, глубина проникновения излучения и радиус пучка.

Для проверки работоспособности методики, была проведена валидация расчётной методики с экспериментальными результатами работы [9]. Принципиальная разница между взрывными сборками из [9] и конструкцией детонатора заключается в том, что во взрывных сборках сплошной ТЭНа заменен на 1 см пористого ТЭНа.

Чтобы сопоставить результаты моделирования с экспериментальными результатами, в расчётах проводилось варьирование диаметра пучка, мощности падающего излучения, пористости и плотности ВВ.

На рисунках 4 представлено изменение давления и концентрации ПВ во взрывных сборках в канале на различные моменты времени, в случае зажигания пористого ТЭНа.

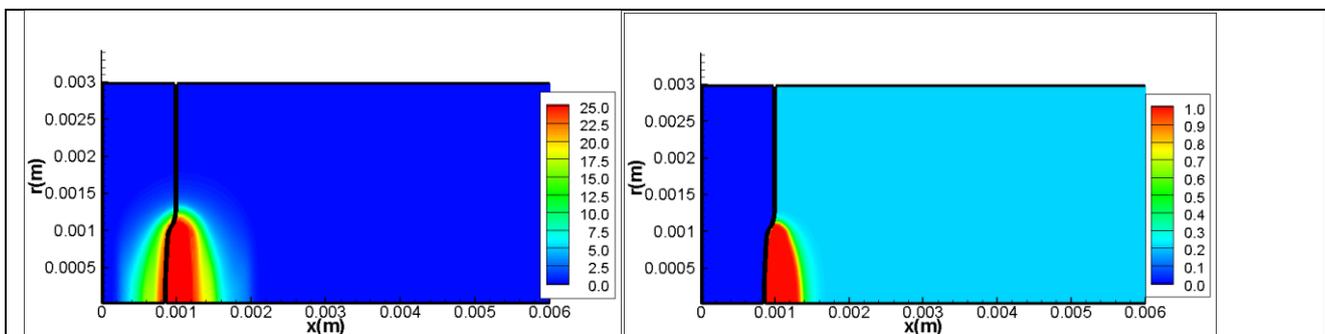


Рисунок 4. Распределение давления (слева) и концентрации продуктов горения (справа) на различные моменты времени при зажигании пористого слоя ВВ и с последующим процессом формирования детонационной волны в сплошном ТЭНе.

На рисунке 5 представлен график зависимости пороговой плотности энергии падающего излучения от плотности пористого ВВ. Результаты моделирования достаточно хорошо

описывают пороговую плотность энергии и область низких плотностей пористого ВВ. Однако следует отметить существенный недостаток, а именно, невозможность описания, в рамках использованной модели, области, где плотность ВВ приближается к гравиметрической. Это, в свою очередь, связано с изменением кинетики в этой области и отсутствием учёта межфазового взаимодействия ВВ и ПВ.

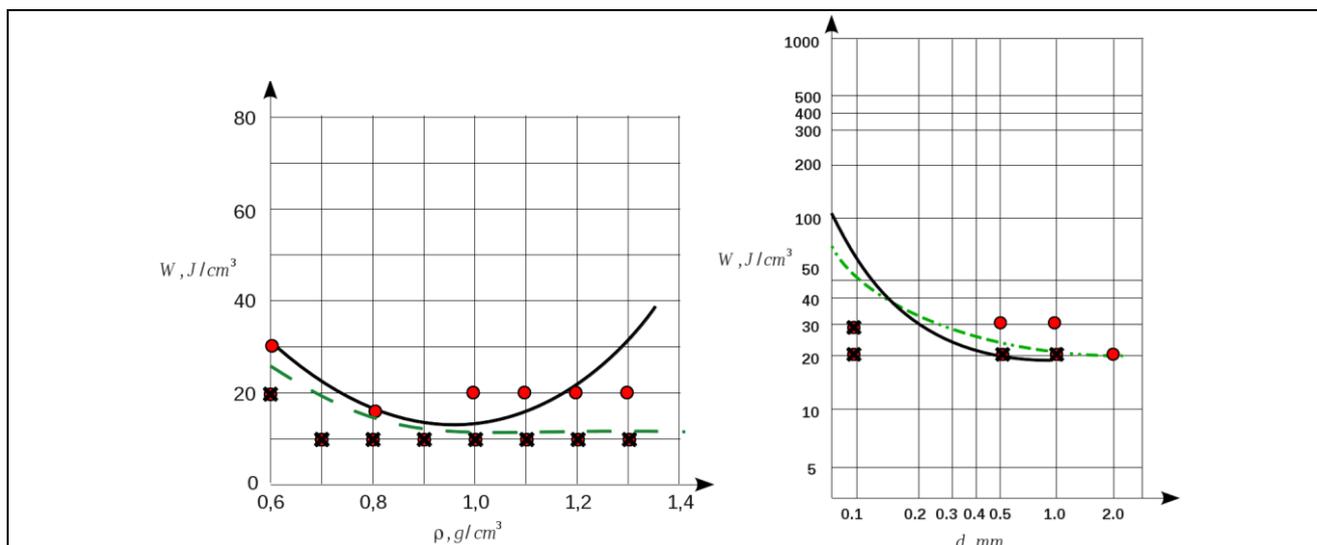


Рис. 5. График пороговой плотности энергии падающего излучения в зависимости от плотности ТЭНа (слева) и диаметра пучка (справа). Красные точки - численный расчёт. (Цельные- произошло зажигание, перечёркнутые - нет). Сплошная кривая - эксперимент [2], штриховая - модельная кривая

Полное моделирование взрывного канала представлено на рисунке 6 для случая срабатывания детонатора. На изображениях видно как процессы горения в пористом ТЭНе зажигают процесс детонации в сплошном ТЭНе.

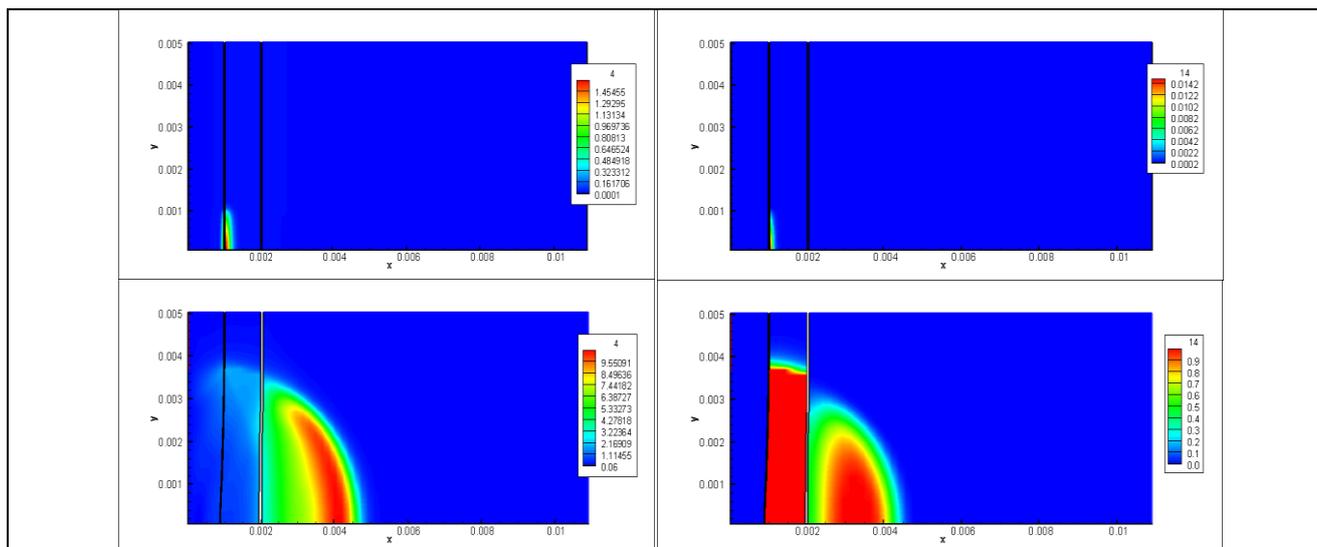


Рисунок 6. Распределение давления (слева) и концентрации продуктов горения (справа) на различные моменты времени при зажигании пористого слоя ВВ и с последующим процессом формирования детонационной волны в сплошном ТЭНе.

7. Заключение

Предложенная в работе методика моделирования позволяет проводить полный расчёт зарядового канала лазерного детонатора.

Валидация модели с экспериментальными результатами по взрывным сборкам даёт хорошее согласование (в рамках модели кинетики и односкоростной гидродинамики).

Для более качественного и количественного описания процессов в зарядовом канале, в дальнейшем планируется использование двухскоростной модели горения ВВ, с учётом межфазового взаимодействия, что, в принципе, должно устранить недостатки использованной модели в настоящей работе.

Литература

1. A. A. Brish, I.A. Galeev, B.N. Zaitsev, E.A. Sbitnev, and L.V. Tatarintsev, "Laser-excited detonation of condensed explosives," *Fizika Goreniya i Vzryva* 2, 132-133 (1966).
2. A.I. Bykhalo, E.V. Zhuzhukalo, N.G. Koval'skii, A.N. Kolomiiskii, V.V. Korobov, A.D. Rozhkov, and A. Yudin, "Initiation of PETN by high-power laser radiation," *Fizika Goreniya i Vzryva* 21, 110-113 (1985).
3. A.M. Renlund, P.L. Stanton, and W.M. Trott, "Laser initiation of secondary explosives," (Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, 1988).
4. S. Chengwei, "Laser initiation of explosives and its applications," in 17th International Pyrotechnics Seminar, (1991), pp. 836-843.
5. M.J. Landry, "Laser used as optical sources for initiating explosives," in 16th International Pyrotechnics Seminar, (1991), pp. 625-641.
6. V.G. Grishina, D.D. Malyuta, V. S. Mezhevov, and V.V. Semak, "Dependence of the dynamics and threshold of laser supported detonation wave on pressure of surrounding gas, intensity distribution and radius of pulsed CO₂ laser beam," *Laser Physics* 1, 196-203 (1991).
7. K. Hasue, H. Khono, M. Shubuya, H. Sato, and S. Nakahara, "Initiation of some explosives by irradiation of CO₂ laser," *Kogyo Kagaku* 54, 178-188 (1993).
8. K. Hasue, and A. Iwama, "Direct initiation of some secondary explosives by means of CO₂ laser irradiation," in 20th International Pyrotechnics Seminar, (1994), pp. 367-380.
9. Таржанов В.И., Зинченко А.Д., Сдобов В.И. и др. Лазерное инициирование тэна. ФГВ, 1996 г., Т.32, н.4.
10. Зинченко А.Д., Таржанов В.И., А.И. Погребов и др. Оптические характеристики некоторых порошкообразных ВВ. ФГВ 1992 г. т.28, н. 5.
11. Бриш А.А. Галеев И.А., Зайцев Б.Н. Сбитнев Е.А., Татаренцев Л.В. О механизме инициирования конденсированных ВВ излучением ОКГ. Физика взрыва и горения, 1969 т. 5 № 4 с. 475.
12. Меньшов И.С., Мищенко А.В., Серёжкин А.А. Численное моделирование упругопластических течений методом Годунова на подвижных эйлеровых сетках. Математическое моделирование. 2013. Т. 25 89-108.
13. E. L. Lee, C.M. Tarver, Phenomenological Model of Shock Initiation in Heterogeneous Explosives/ *Physics of Fluids*, 23, 12, pp 2362-2372, 1980.
14. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. "Наука", 1975 г.
15. М. Е. Серебряков. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М.1962 г.
16. О.В. Сергеев, А.В. Янилкин. Молекулярно-динамическое моделирование движения фронта горения в монокристалле ТЭНа. ФГВ, 2014, т. 50, ном. 3.
17. Nail A. Inogamov, Viktor A. Khokhlov and other. Ultrashort elastic and plastic shock waves in aluminium. *Shock Compression of Condensed Matter -2011*.
18. Н.И. Коротеев, И.Л. Шумай. Физика мощного лазерного излучения. "Наука", 1991 г.

Статья поступила в редакцию 13 февраля 2015 г.