



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

Препринты ИПМ • Препринт № 72 за 2017 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Забродина Е.А., Орлов Ю.Н.,
Соловьев В.О., Овчинников Н.М.,
Кельнер М.С.

Модель
электроиницирования
ТЭНа в канале детонатора

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Модель электроиницирования ТЭНа в канале детонатора / Е.А.Забродина [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2017. № 72. 17 с. doi:[10.20948/prepr-2017-72](https://doi.org/10.20948/prepr-2017-72)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-72>

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

**Е.А. Забродина, Ю.Н. Орлов,
В.О. Соловьев, Н.М. Овчинников, М.С. Кельнер**

**Модель электроинициирования ТЭНа
в канале детонатора**

Москва — 2017

Забродина Е.А., Орлов Ю.Н., Соловьев В.О., Овчинников Н.М., Кельнер М.С.

Модель электроинициирования ТЭНа в канале детонатора

В работе описывается математическая модель инициирования детонации посредством электрического импульса, и приводятся результаты расчетов по двумерной газодинамической программе НЗТ применительно к задаче развития детонации в конечном прямом цилиндрическом канале переменного сечения. Исследовались режимы распространения детонационной волны в зависимости от энергии инициирования и плотности ТЭНа. Результаты численного моделирования сравнивались с экспериментальными данными.

Ключевые слова: математическое моделирование, инициирование взрывчатых веществ, модель Тарвера, детонация в цилиндрическом канале

Zabrodina E.A., Orlov Yu.N., Soloviev V.O., Ovchinnikov N.M., Kelner M.S.

The model of electric initiation of detonation in a detonator channel

In this paper the mathematical model of initiation of detonation by the use of electric charge is described. The numerical results of detonation modeling in a cylindrical channel, obtaining with the use of 2D gas dynamic numerical program НЗТ, are investigated. The various regimes of detonation are compared for various initial conditions and densities. The numerical simulation results are compared with experimental data.

Key words: mathematical modeling, explosion initiation, Tarver model, detonation in a cylinder

Содержание

Введение	3
1. Математическая модель инициирования и развития детонации	7
2. Результаты расчетов распространения детонации	10
3. Анализ зависимости детонации от энергии инициирования.....	14
Литература	16

Введение

В предшествующих работах авторов [1-2] были представлены результаты численного моделирования развития детонации в цилиндрическом канале, а также в каналах в форме усеченного конуса и нескольких вложенных цилиндров разного диаметра [3-4], соединяемых через усеченные конусы. Анализировались режимы инициирования, при которых во взрывчатом веществе (ВВ) развивалась детонация. В настоящей работе формулируется модель электрического инициирования пентаэритриттетранитрата (ТЭН) в канале детонатора, проводится анализ развития детонации для разных плотностей ВВ и для разных энергий инициирования на основе численного моделирования распространения ударной волны в цилиндрическом канале по двумерной газодинамической программе НЗТ [5]. Целью проводимого анализа является сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными, полученными в ИМАШ РАН. Проводимые эксперименты были направлены на уменьшение размеров детонаторов и на повышение надежности и эффективности их срабатывания.

Задача минимизации габаритов многочастотных пульсирующих взрывных устройств и средств инициирования имеет большое практическое значение как с точки зрения массово-габаритных характеристик изделия в целом, так и стоимости. Оптимизация указанных характеристик необходима, например, при проектировании твердотопливных ракетных детонационных двигателей, а также переносных взрывных устройств, применяемых для разрушения горных пород различной категории крепости. В работе [6] были проанализированы зависимости объемов электролитических конденсаторов различных типов, используемых для электроинициирования, от подводимой энергии. Эти зависимости приведены на рис. 1. Из них следует, что объем растет линейно с увеличением энергии. Желательно, чтобы объем конденсатора находился в пределах до 10 см^3 , что накладывает ограничения на энергию инициирования. Однако сама энергия нелинейно зависит от диаметра заряда ТЭНа (рис. 2).

Детонаторы с малой энергией инициирования были предложены одним из авторов данной работы в [7-9]. Различные режимы распространения волны детонации в таких детонаторах изучались в рамках разных математических моделей в [10-13] для плотности ТЭНа 1000 кг/м^3 . Было выяснено, что результаты численного моделирования не являются устойчивыми при вариации моделей разложения ТЭНа. Кроме того, необходимо уточнить и эмпирическое уравнение состояния (УРС) ТЭНа применительно к инициированию в малом объеме.

В настоящей работе мы будем использовать одночленную модель Тарвера [14] для описания ударно-волнового разложения ТЭНа плотностью 1600 кг/м^3 в канале детонатора. Эта плотность близка к той, с которой проводились эксперименты в ИМАШ.

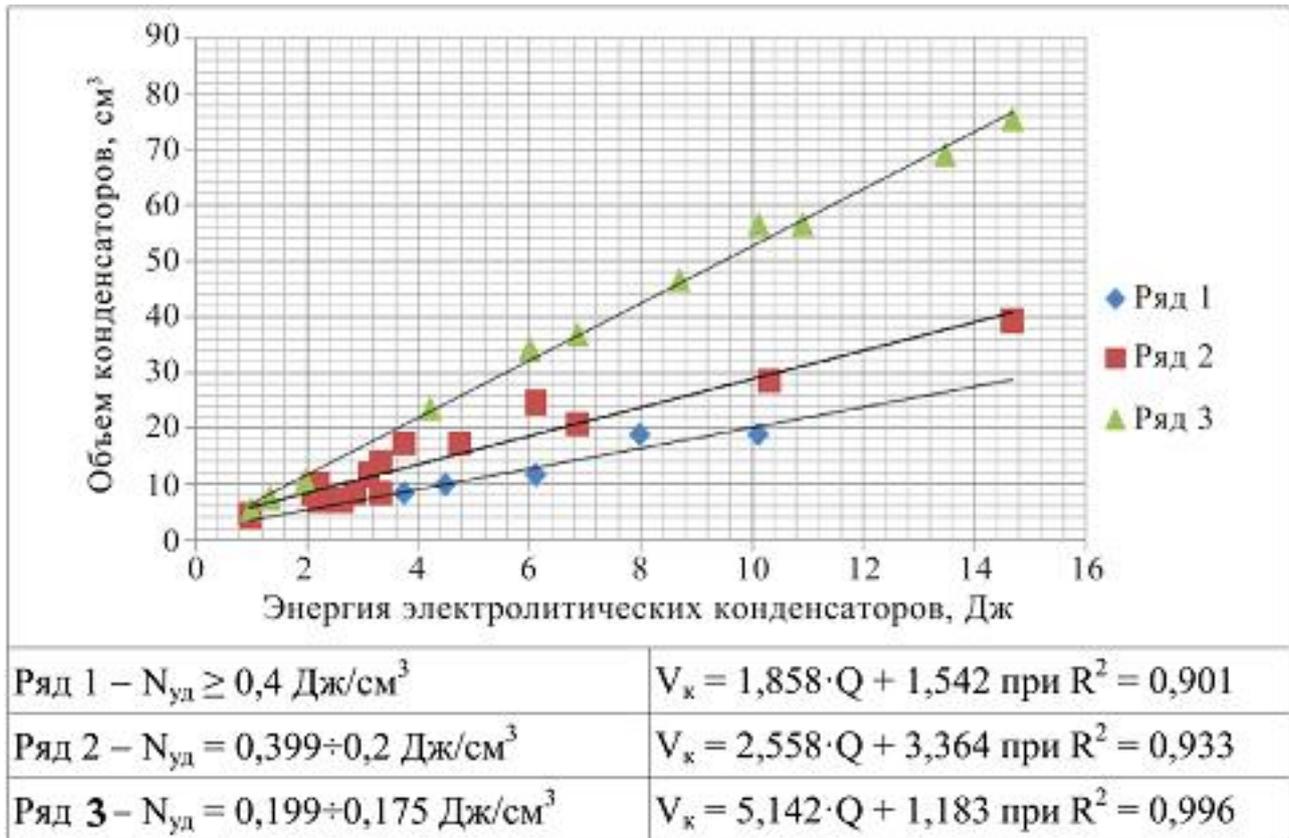


Рис. 1. Экспериментальная зависимость объема конденсаторов от их энергии

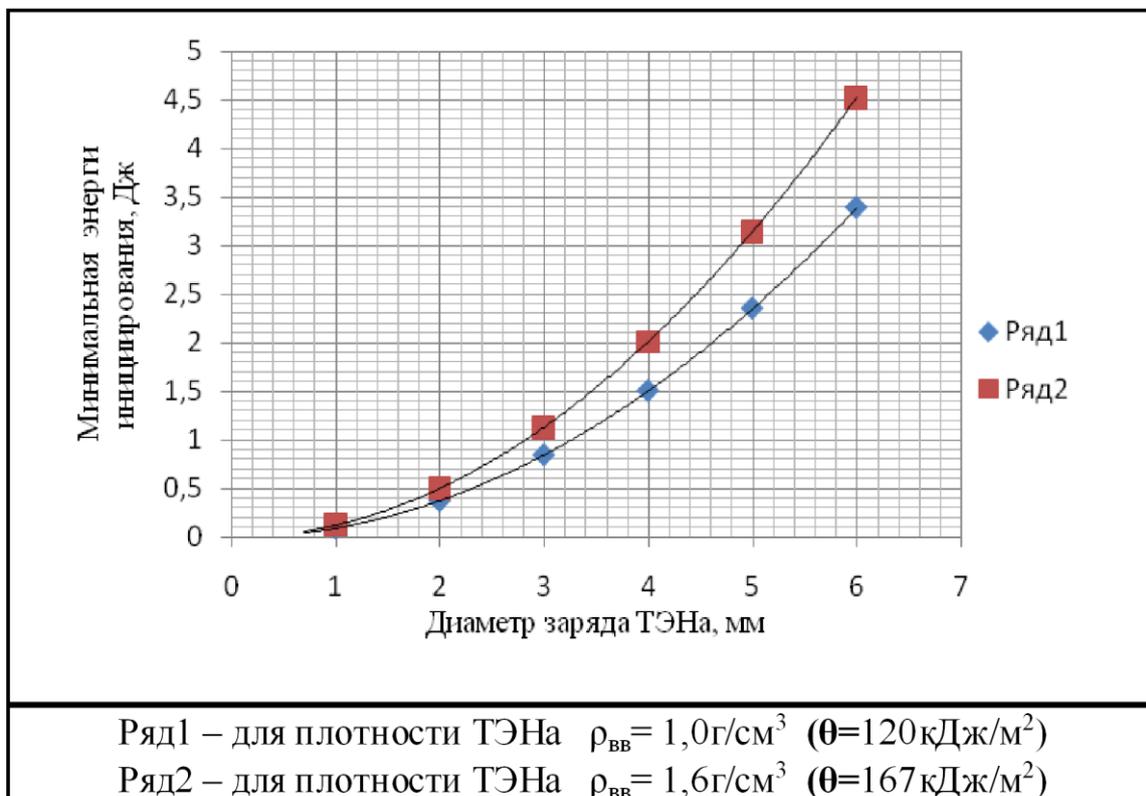


Рис. 2. Экспериментальная зависимость минимальной энергии иницирования от диаметра заряда

На рис. 3 (а, б) показаны изучаемые детонаторы и начальное положение специального электродетонатора [7] в эксперименте по инициированию ТЭНа.

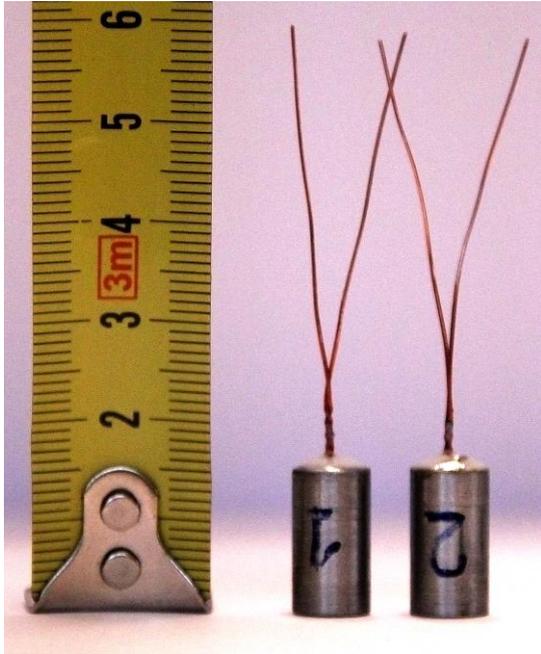


Рис. 3-а. Экспериментальные образцы электродетонаторов

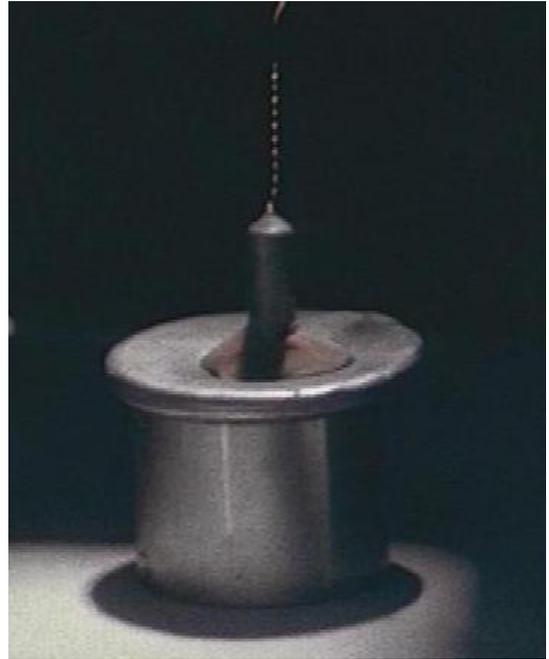


Рис. 3-б. Электродетонатор в начальный момент перед инициированием

На рис. 4 показан момент подрыва детонатора. Съемка сделана рентгеновской камерой.



Рис. 4. Момент электроиницирования работы детонатора

На рис. 5 (а, б) показано начало деформации детонатора при прохождении детонационной волны и конечное состояние разрушенного корпуса.

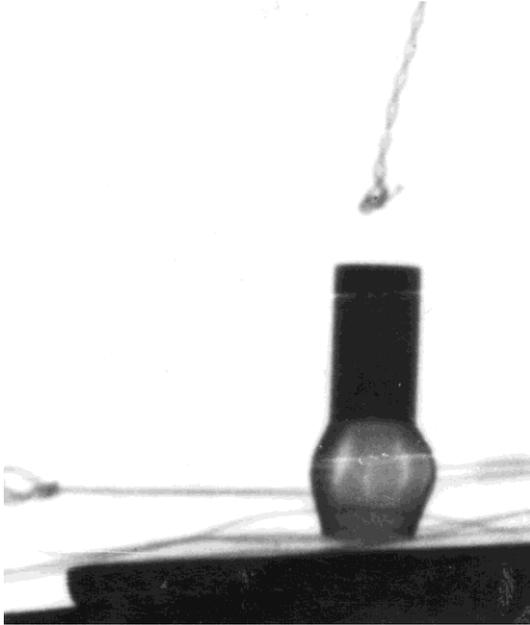


Рис. 5-а. Раздутие корпуса детонатора



Рис. 5-б. Фрагменты разрушенных корпусов детонаторов

Для разных марок стали наблюдались разрушения корпуса различной фрагментарности. Исследование степени разрушения детонатора в зависимости от материала корпуса основывается на данных о пределах прочности марок сталей и сплавов на растяжение, приведенных в табл. 1.

Табл. 1.

Материал	σ , МПа
Сталь 3	447,7
Сталь 20	518,7
Бронза	519,0
Сталь 45	722,3
Сталь 65 Г	730,0
30 ХГСА	762,0
Ст 65Г+ТО	1155,7
30 ХГСА+ТО	2058,3

Представляет интерес определение момента времени, когда давление в определенных внутренних точках поверхности цилиндра превысит предел прочности, что приводит к разрушению детонатора. Отметим, что разрушение корпуса детонатора допускается, если детонационная волна успевает дойти до конца цилиндра без перехода в режим простого горения.

Численные эксперименты [2] показали, что для сталей СЗ-С65 и плотности ТЭНа 1000 кг/м^3 существуют режимы инициирования, при которых развивается детонация, причем разрушение конструкции происходит позже выхода ударной волны на свободную границу. В настоящей работе аналогичный вывод для плотности ТЭНа 1600 кг/м^3 получается только для сталей Cr65Г+ТО и 30ХГСА+ТО.

1. Математическая модель инициирования и развития детонации

Иницирование ТЭНа в описываемом эксперименте происходит посредством пропускания электрического тока через расплавляемый внутри области инициирования ВВ участок электрической цепи. Разряд происходит при замыкании обкладок конденсатора. Индуктивностью проводов пренебрегаем. Меняя напряжение на обкладках конденсатора, можно менять энергию инициирования, что влияет на режим прохождения ударной волны.

Параметры электрической схемы инициирования следующие.

Емкость $C = 100 \text{ мкФ}$;

Напряжение $U = 100 \div 300 \text{ В}$;

Сопротивление цепи $r = 0,05 \text{ Ом}$.

При замыкании цепи сила тока меняется во времени по закону

$$I(t) = \frac{U}{R} e^{-t/(rC)}. \quad (1)$$

Полная выделившаяся энергия определяется формулой

$$W = \int_0^{\infty} I^2(t) r dt = \frac{1}{2} U^2 C, \quad (2)$$

что совпадает, естественно, с энергией конденсатора, меняющейся в пределах от 0,5 до 4,5 Дж. Для удобства численного моделирования считаем, что мощность энерговыделения постоянна в течение характерного времени $\tau = RC/2 = 5 \text{ мкс}$, после чего обращается в нуль.

Фактически не вся мощность U^2/r идет на нагревание ВВ, но на данном этапе у нас нет достоверных данных о доле энергии, идущей на инициирование. Поэтому считаем, что именно этой мощностью со ступенчатым временным профилем и происходит нагревание ТЭНа. В зоне инициирования, т.е. там, где ВВ непосредственно окружает проволочку (это центральная часть дна цилиндра), локальная температура меняется по закону

$$\rho V C_V (T - T_0) = \frac{U^2}{r} t, \quad 0 \leq t \leq \tau. \quad (3)$$

Плотность ТЭНа приведена в табл. 2. Начальная температура $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$. Удельная теплоемкость принята равной $C_V = 1$ Дж/(кг*град). Область инициирования представляет собой цилиндр с центром в начале координат, ось которого совпадает с осью симметрии детонатора, высота равна 0,3 мм, а весь объем равен приблизительно $V \approx 10^{-11}$ м³.

Будем индекс «1» относить к исходному веществу, а индекс «2» - к продуктам реакции. В области инициирования для расчета концентраций используется уравнение

$$\frac{dX_1}{dt} = -w \cdot X_1, \quad X_2 = 1 - X_1, \quad (4)$$

где величина w связана с энергией инициирования (т.е. температурой взрывчатого вещества) по формуле Аррениуса:

$$w = J \exp\left(-\frac{A}{RT}\right). \quad (5)$$

Для ТЭНа, согласно [8], $J = 3.54 \times 10^{19}$ сек⁻¹, $A = 160$ кДж/моль – энергия активации, а R – газовая постоянная. Температура T в области инициирования рассчитывается по энергии электроиницирования $E = U^2 \tau / r$ в соответствии с (3). Энерговыделение вследствие реакции разложения ТЭНа описывается уравнением

$$Q = -\rho Q_0 \cdot \frac{dX_1}{dt}, \quad Q_0 = 5.706 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}. \quad (6)$$

После того, как инициирование состоялось, дальнейший расчет ведется по двумерной газодинамической программе НЗТ.

Расчетная область представляет собой продольный разрез внутренней части цилиндра длиной 10^{-2} м, разделенной на две подобласти: область инициирования ($0 < l < 1.5 \cdot 10^{-4}$ м) и область распространения детонационной волны ($1.5 \cdot 10^{-4} \text{ м} < l < 10^{-2}$ м). Внутренний радиус цилиндра равен $r = 1.5 \cdot 10^{-3}$ м, внешний радиус $R = 4 \cdot 10^{-3}$ м. В обеих областях задаются одинаковые начальные условия: $\rho = 1000$ кг/м³, $\varepsilon = 0.501 \cdot 10^6$ Дж/кг, что соответствует давлению $p = 0.1053 \cdot 10^6$ Па = 1 атм и температуре $T \approx 300$ К.

Математическая модель развития детонации в канале состоит из уравнений газовой динамики, уравнений состояний вещества в твердой и газообразной фазе, уравнений химической кинетики, а также источниковых членов и граничных условий.

Движение вещества в цилиндрическом канале описывается системой уравнений газовой динамики в двумерной цилиндрически симметричной постановке:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u} \vec{u}) + \text{grad}(p) = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho(\varepsilon + 0.5|\bar{u}|^2))}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\bar{u}(\varepsilon + 0.5|\bar{u}|^2) + p\bar{u}) = Q. \quad (9)$$

Здесь ρ - плотность, u - скорость, ε - удельная внутренняя энергия, p - давление, Q - источник энергосвечения. Эта система дополняется начальными и граничными условиями, а также уравнением состояния для конкретного взрывчатого вещества.

Для концентраций выполняются следующие соотношения:

$$\rho_k = \rho \cdot X_k, \quad v_k = 1/\rho_k, \quad p = \sum_k p_k, \quad \varepsilon = \sum_k \varepsilon_k \cdot X_k. \quad (10)$$

$$p_k = p_k^{(P)} + p_k^{(T)} \quad (11)$$

$$\varepsilon_k = \varepsilon_k^{(P)} + \varepsilon_k^{(T)} \quad (12)$$

$$p_k^{(P)} = A_k \cdot \exp(-R_{1k}\rho_{0k}v_k) + B_k \cdot \exp(-R_{2k}\rho_{0k}v_k) \quad (13)$$

$$p_k^{(T)} = \frac{g_k c_{vk} T}{v_k} \quad (14)$$

$$\varepsilon_k^{(P)} = \frac{A_k}{R_{1k}\rho_{0k}} \cdot \exp(-R_{1k}\rho_{0k}v_k) + \frac{B_k}{R_{2k}\rho_{0k}} \cdot \exp(-R_{2k}\rho_{0k}v_k) \quad (15)$$

$$\varepsilon_k^{(T)} = c_{vk} T \quad (16)$$

Для каждой компоненты используются уравнения состояния Джонса-Уилкинса-Ли (JWL) [14], параметры которого согласно приведены в табл. 3.

Табл. 3. Параметры уравнения состояния JWL

k	ρ_{0k} , кг/м ³	A_k , Па	B_k , Па	$c_{vk} \cdot \rho_{0k}$, Па/град.	R_{1k}	R_{2k}	g_k
1	1000	1312·10 ⁹	-7,84·10 ⁹	1,6766·10 ⁶	11.	5,5	0,02027
	1600	2188·10 ⁹	-58·10 ⁹	2,685·10 ⁶	7,8	3,9	0,3468
2	1000	237,2·10 ⁹	10,61·10 ⁹	10 ⁶	5,6	1,8	0,24
	1600	625,3·10 ⁹	23,29·10 ⁹	10 ⁶	5,25	1,6	0,28

В области распространения детонационной волны используется модель Тарвера [14] ударно-волнового разложения ТЭНа:

$$\frac{dX_1}{dt} = -\left[I \cdot X_1^{2/9} \cdot \eta^4 + G \cdot X_1^{2/9} \cdot X_2^{2/3} \cdot p^z \right], \quad (17)$$

где

$$\eta = \begin{cases} \frac{\rho X_1}{\rho_0} - 1, & \rho X_1 > \rho_0 \\ 0, & \rho X_1 \leq \rho_0 \end{cases} \quad (18)$$

а параметры равны $I = 2 \cdot 10^7$ сек⁻¹, $G = 4 \cdot 10^8$ Мбар^{-z}·сек⁻¹, $z = 1,4$.

2. Результаты расчетов распространения детонации

Одной из целей моделирования является определение энергии инициирования, при которой развивается детонационный режим и одновременно давление в канале остается меньше критического, при котором происходит разрушение канала до того момента, когда ударная волна доходит до конца канала (в последнем случае изделие срабатывает неправильно, разрушаясь слишком рано). Представляет интерес сравнение ситуаций вблизи критического в этом смысле значения параметра w из (5), которое для плотности $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ оказалось равным $w = 3 \cdot 10^5$. На рис. 6 приведены профили давления для несколько большей энергии инициирования, которой отвечает величина $w = 6 \cdot 10^5$, и для плотности $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$. Также на рис. 6 показан критический уровень давления в канале, после которого наступает разрушение материала для стали С-20.

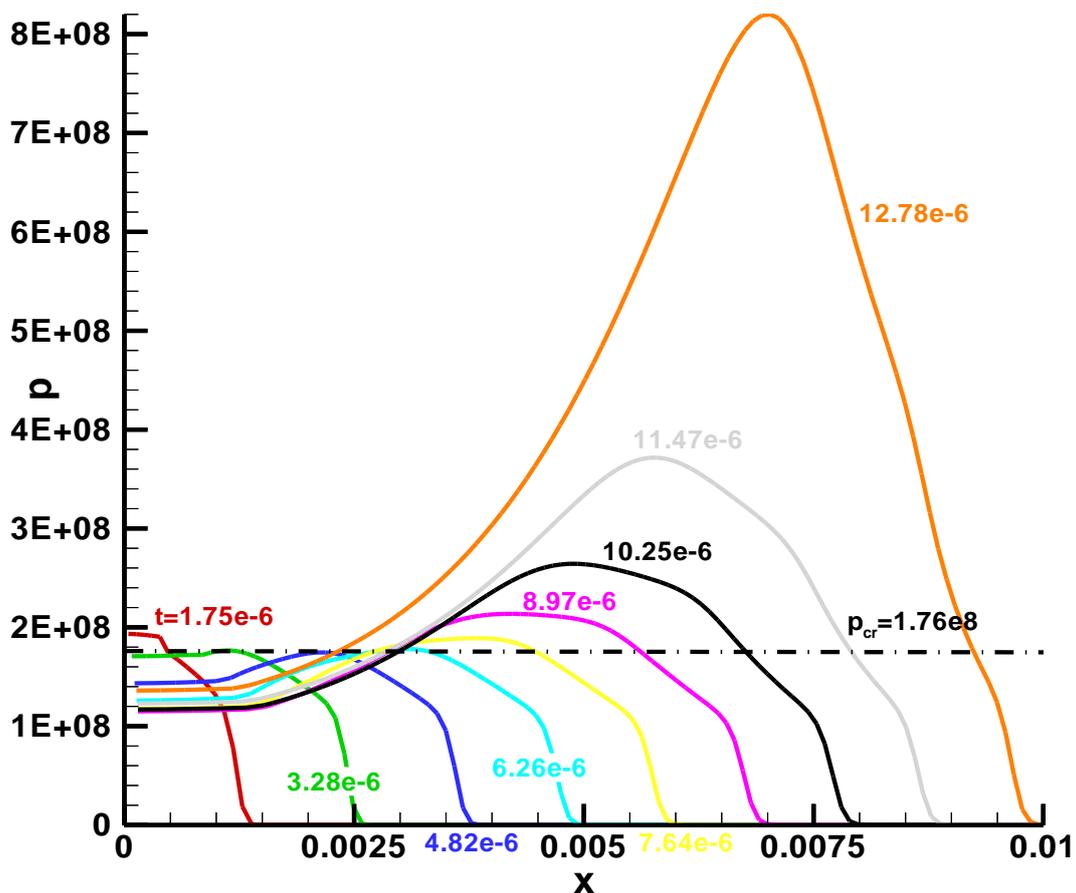


Рис. 6. Давление [Pa] в цилиндре на разные моменты времени [с]

Далее на рис. 7-8 приведены результаты расчетов для температуры и концентрации исходного вещества при том же значении параметра $w = 6 \cdot 10^5$ и плотности $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

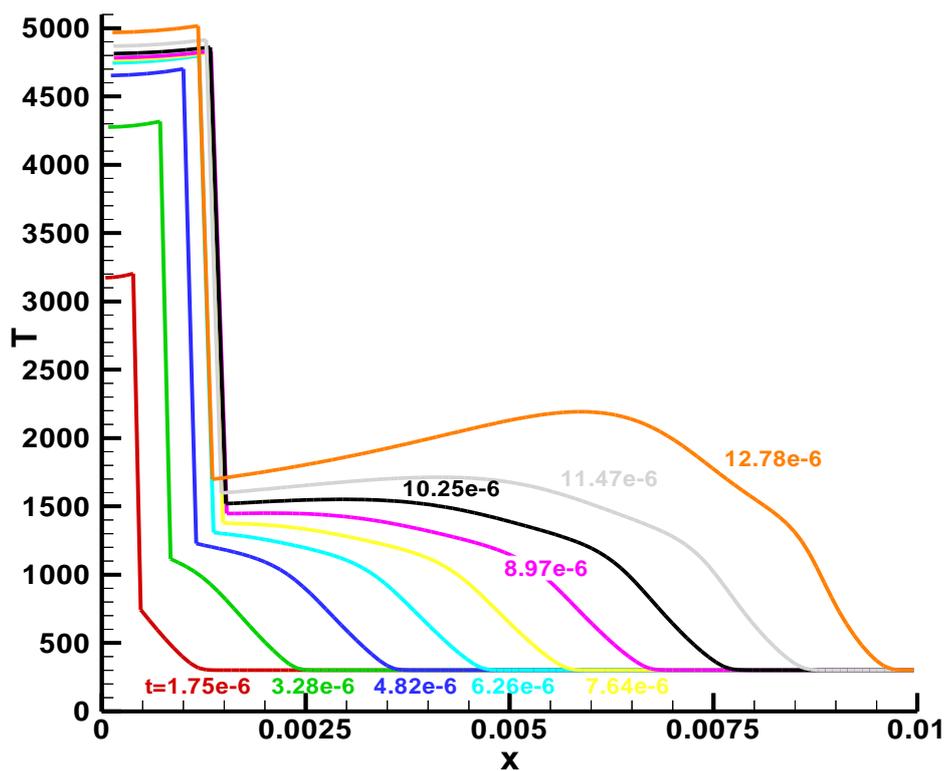


Рис. 7. Температура [K] в цилиндре на разные моменты времени [с]

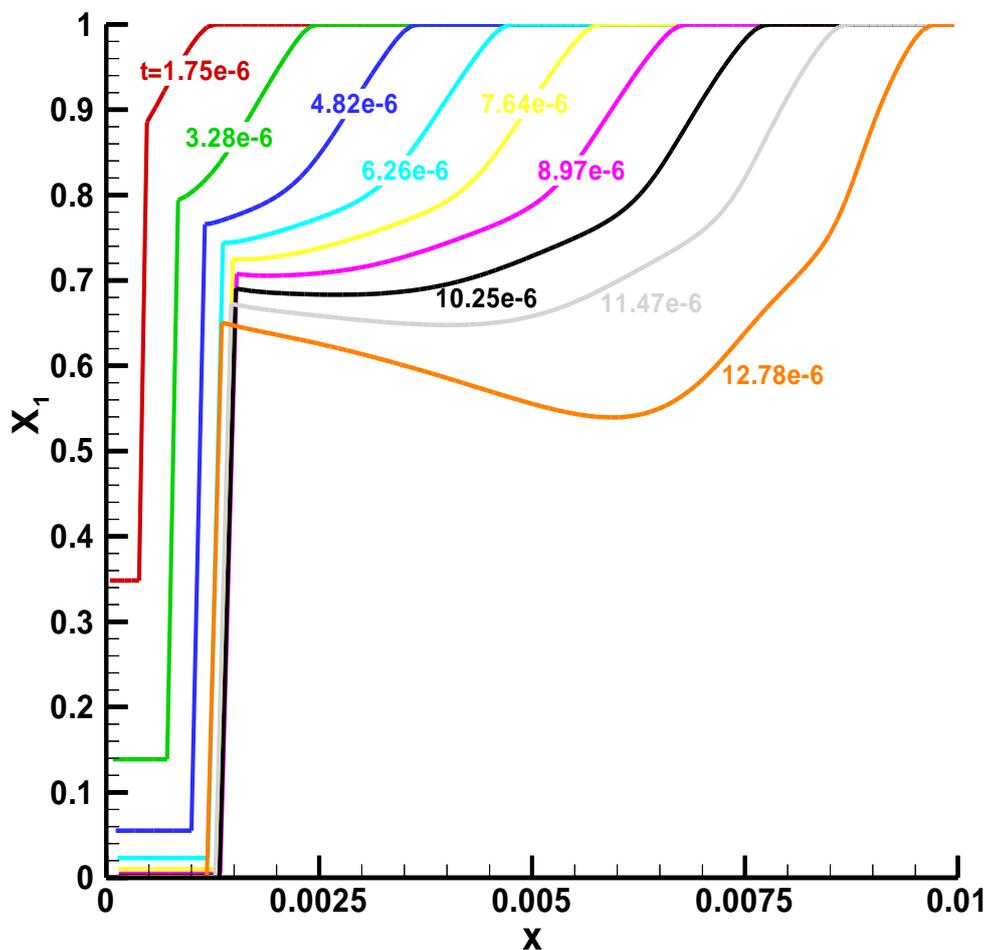


Рис. 8. Концентрация ВВ в цилиндре на разные моменты времени [с]

В эксперименте ИМАШ, анализируемом в настоящей работе, с которым и сравниваются результаты численного моделирования, плотность ТЭНа была близка к $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$. Представляет также интерес сравнить между собой результаты расчетов для разных плотностей.

Распределения тех же величин вдоль стенки цилиндра для варианта с удельным выделением энергии в зоне инициирования, равным $3 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$ и начальной плотностью 1600 кг/м^3 , на разные моменты времени приведены на рис. 9-12. Основное отличие состоит в том, что для варианта с большей плотностью давление на порядок превосходит вариант с меньшей плотностью.

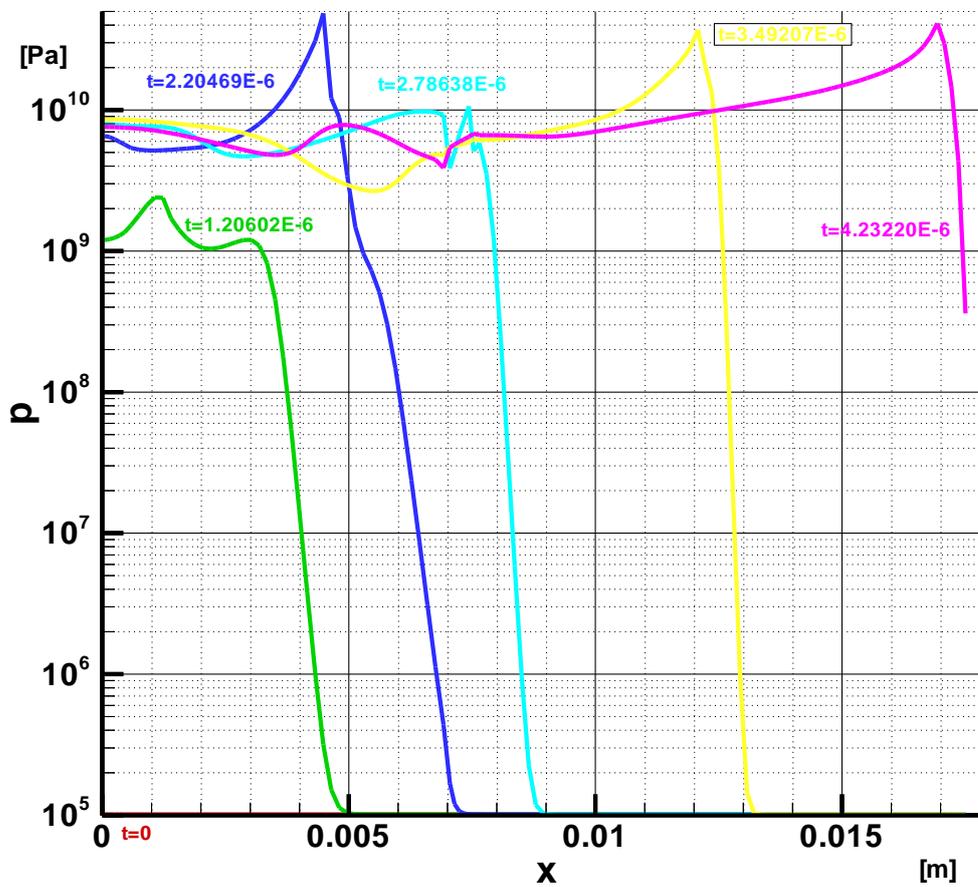


Рис. 9. Давление [Pa] в цилиндре на разные моменты времени [с]

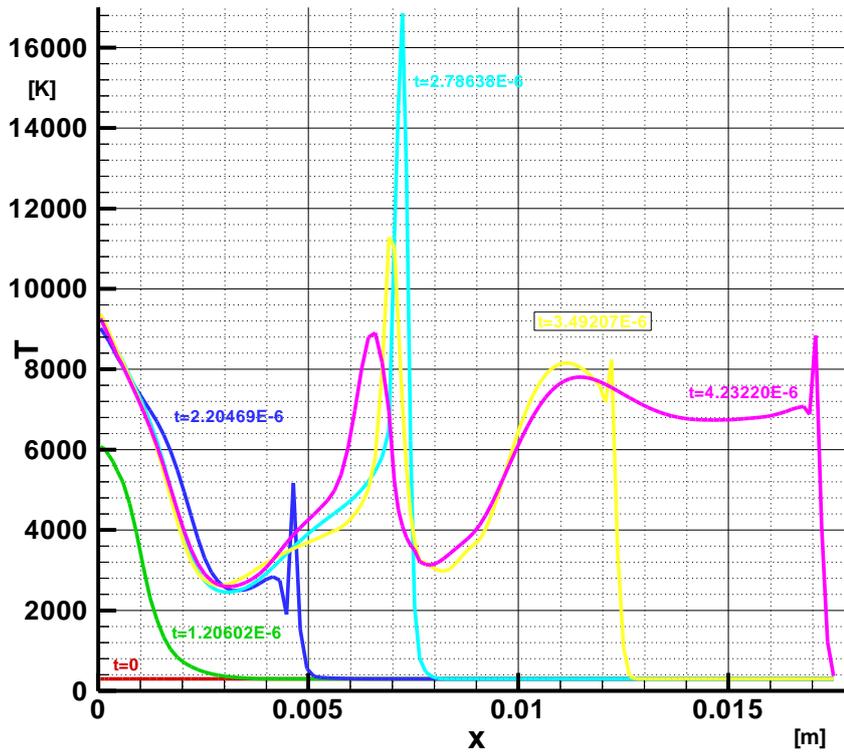


Рис. 10. Температура [K] в цилиндре в разные моменты времени [с]

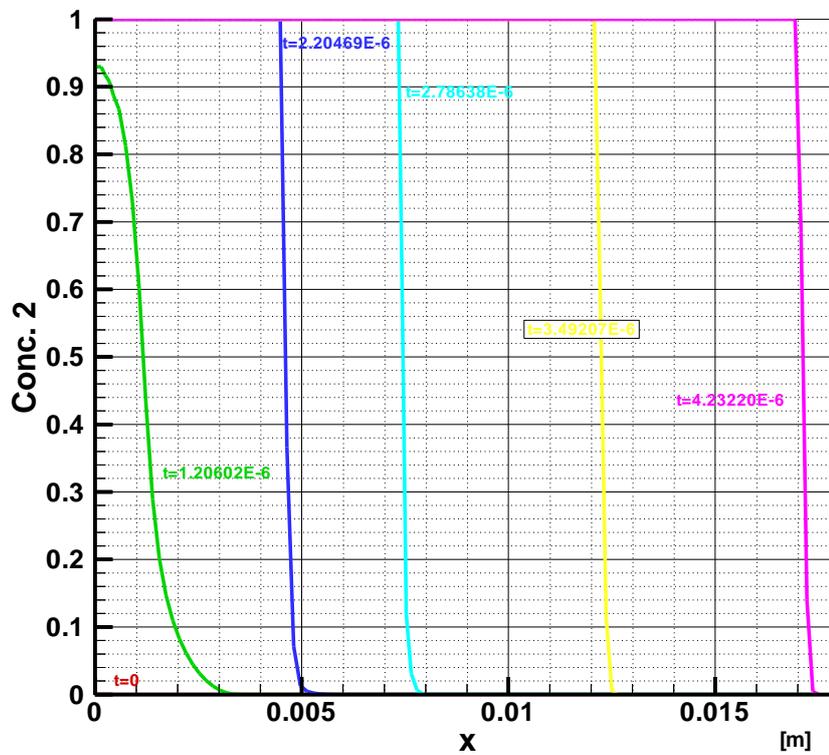


Рис. 11. Концентрация продуктов разложения ТЭНа в разные моменты времени

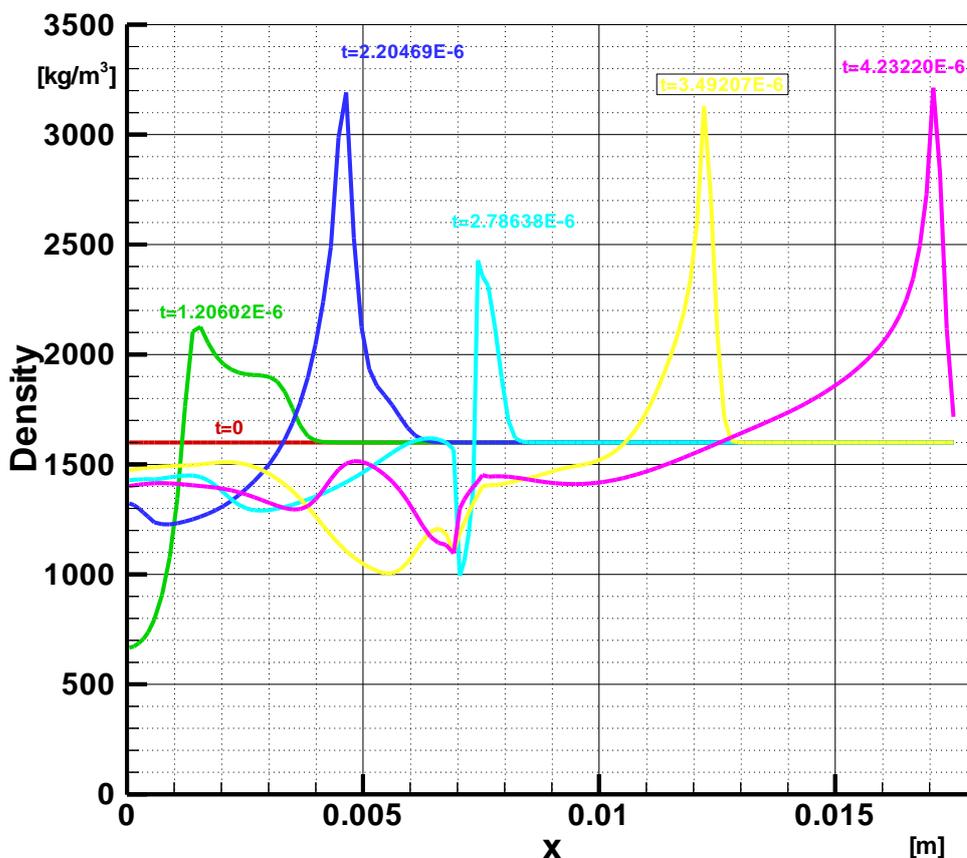


Рис. 12. Плотность вещества в цилиндре в разные моменты времени

Поскольку один из концов цилиндра в расчетах считается закрытым, то наблюдаются эффекты, связанные с отражением ударных волн. Это, в частности, волнообразные профили температуры и плотности вещества вдоль оси цилиндра. Подчеркнем, что в газодинамических расчетах корпус детонатора предполагался неразрушаемым.

3. Анализ зависимости детонации от энергии инициирования

На рис. 13 показаны расчетные скорости распространения детонационных волн для двух вариантов плотностей ТЭНа и различной энергии инициирования. Следует отметить, что эти скорости заметно отличаются в меньшую сторону от величин, приведенных в справочной литературе [15] по взрывчатым веществам. По-видимому, это связано с тем, что в нашем эксперименте мы не имеем установившейся детонации, поскольку длина канала детонатора (1 см) относительно невелика, а стационарная детонация в воздухе наступает на длинах порядка нескольких (5-7) см. Поэтому ожидаемая скорость детонации, наблюдаемая в длинных трубах (7-8 км/сек), в наших расчетах не достигается. Также следует отметить некоторую искусственность модели инициирования, поскольку в ней не используется уравнение ударного

разложения ТЭНа, применяемого на стадии развития детонации. В дальнейших работах предполагается уделить этому аспекту основное внимание.

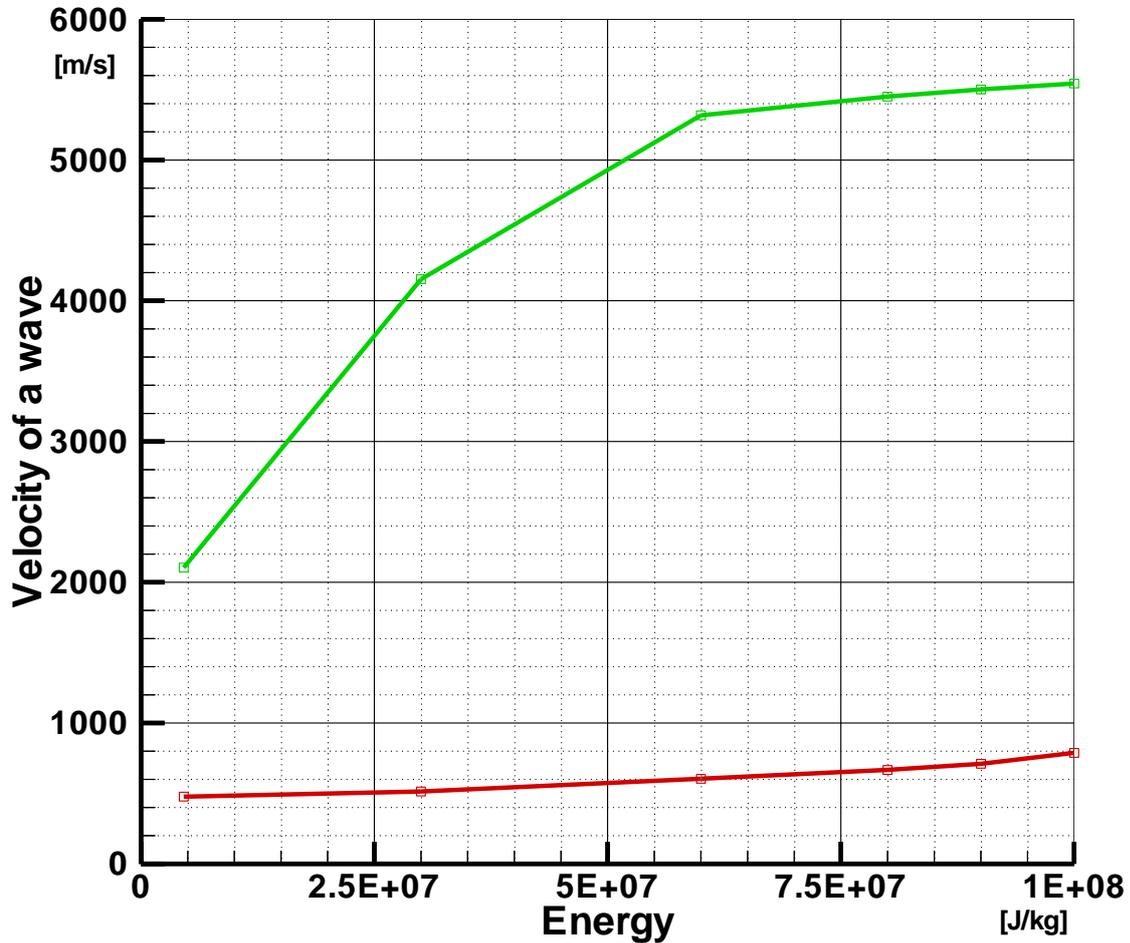


Рис. 13. Скорость ударной волны в зависимости от начальной энергии в зоне инициирования: красная линия – для начальной плотности 1000 кг/м^3 , зеленая линия – для плотности 1600 кг/м^3 .

На рис. 14 показана зависимость концентрации продуктов разложения ТЭНа в расчетной области двумерной задачи ($7.57735 \cdot 10^{-3} < x < 17.57735 \cdot 10^{-3}$, $0.5 \cdot 10^{-3} < y < 2.5 \cdot 10^{-3}$), т.е. в дальней от области инициирования части канала, примыкающей к стенке цилиндра) в зависимости от начальной энергии в области инициирования и от плотности ТЭНа.

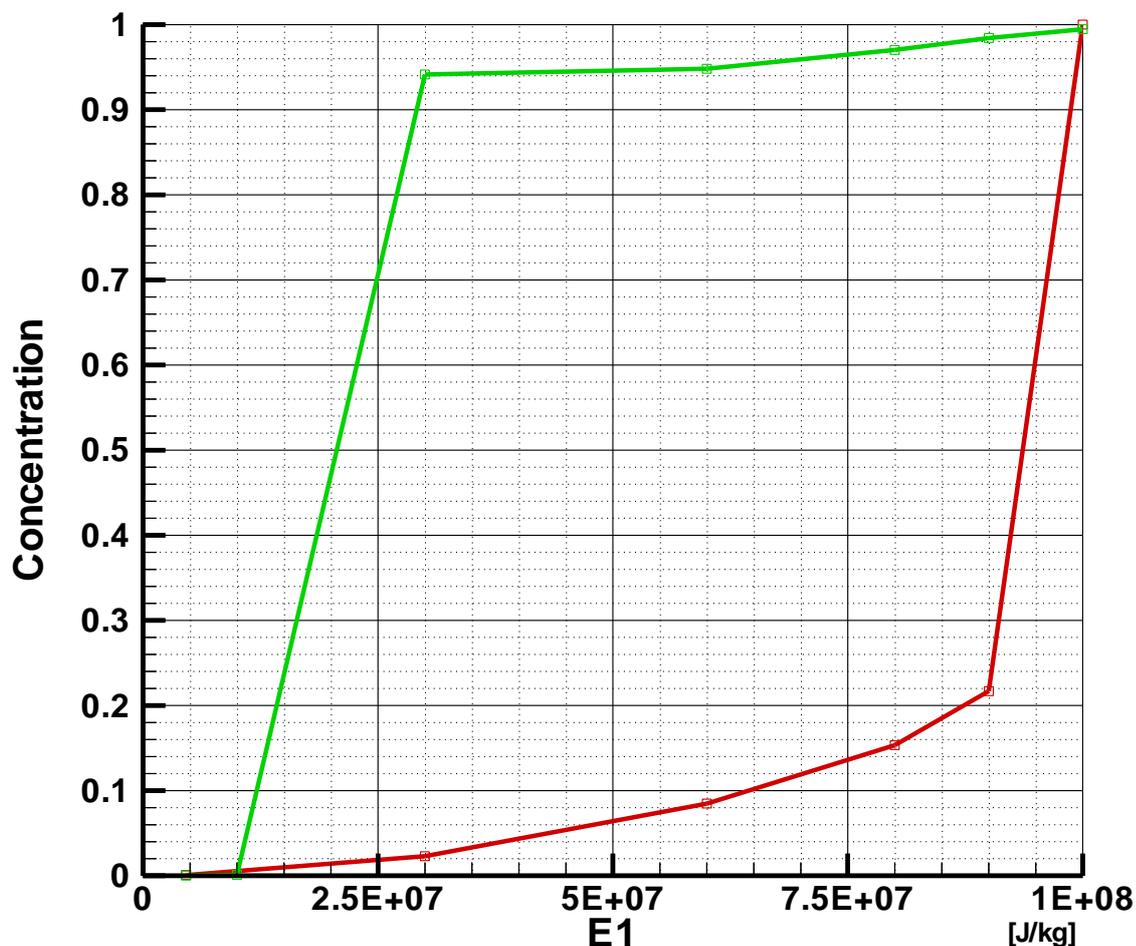


Рис. 14. Концентрация продуктов детонации в дальней зоне в зависимости от начальной энергии в области инициирования: красная линия – для начальной плотности 1000 кг/м^3 , зеленая линия – для плотности 1600 кг/м^3 .

Резюмируя итоги исследования, следует сказать, что в целом расчетный комплекс НЗТ адекватно позволяет моделировать протекание взрывных процессов. Однако требуется проведение экспериментальных работ для уточнения параметров УРС применительно к малым размерам детонатора и уточнения модели инициирования.

Литература

1. Соловьев В.О., Забродина Е.А., Овчинников Н.М., Орлов Ю.Н. Расчеты развития детонации в цилиндрическом канале по программе НЗТ // Проблемы машиностроения и автоматизации. Международный журнал. № 4, 2015, с. 105-110.
2. Соловьев В.О., Забродина Е.А., Овчинников Н.М., Орлов Ю.Н., Пацюк В.В. Двумерные расчеты развития детонации в канале переменного сечения по

- программе НЗТ // Проблемы машиностроения и автоматизации. Международный журнал. № 1, 2016, с. 109-114.
3. 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, с. 1-19.
4. 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 // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. № 105, с. 1-21.
5. Забродин А.В., Прокопов Г.П. Методики численного моделирования двумерных нестационарных течений теплопроводного газа в трехтемпературном приближении // ВАНТ, сер.: Математическое моделирование физических процессов, 1998, вып.3. С. 3-16.
6. Соловьёв В.О., Кельнер М.С., Коровкин Ю.В. Малогабаритные системы электрического инициирования для управляемого взрывного бурения горных пород в сложных условиях // Проблемы машиностроения и автоматизации. Международный журнал. № 1, 2013, с. 106-116.
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. Оpubл. в Официальном бюллетене. «Изобретения. Полезные модели» № 7 от 10.03.1996 г., ФИПС РОСПАТЕНТ.
8. Соловьев В.О. Средства инициирования для твердотопливных пульсирующих взрывных устройств // Боеприпасы и спецхимия. Научно-технический журнал. № 3, 2007, с. 57-62.
9. Соловьев В.О., Овчинников Н.М., Пацюк В.В., Лавров В.В. Специальные электрические детонаторы нового поколения // Проблемы машиностроения и автоматизации. Международный журнал. № 1, 2015, с. 88-99.
10. Орлов Ю.Н., Соловьёв В.О., Суслин В.М. Расчет поведения ударной волны в каналах детонатора // Проблемы машиностроения и автоматизации. Международный журнал. № 4, 2011, с. 112-117.
11. 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.
12. Соловьев В.О., Забродина Е.А., Орлов Ю.Н., Сравнение двух моделей развития детонации в канале // Проблемы машиностроения и автоматизации. Международный журнал. М., № 4, 2016, с. 122-127.
13. Забродина Е.А., Орлов Ю.Н., Соловьёв В.О., Овчинников Н.М., О моделях развития детонации в цилиндрическом канале // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. № 96, с. 1-17.
14. Lee E.L., Tarver C.M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives // Physics of Fluids, 1980, V.23, No 12, p. 2363-2372.
15. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. Т.1. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 832 с.