



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

Препринты ИПМ • Препринт № 180 за 2018 г.



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

**Забродина Е.А., Орлов Ю.Н.,
Соловьев В.О.**

Моделирование
распространения детонации
в цилиндрическом канале

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Забродина Е.А., Орлов Ю.Н., Соловьев В.О. Моделирование распространения детонации в цилиндрическом канале // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 180. 14 с. doi:[10.20948/prepr-2018-180](https://doi.org/10.20948/prepr-2018-180)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-180>

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

**Е.А. Забродина, Ю.Н. Орлов,
В.О. Соловьев**

**Моделирование
распространения детонации
в цилиндрическом канале**

Москва — 2018

Забродина Е.А., Орлов Ю.Н., Соловьев В.О.

Моделирование распространения детонации в цилиндрическом канале

В работе описываются математические модели инициирования детонации посредством электрического импульса и последующего распространения детонационной волны. Приводятся результаты расчетов по двумерной газодинамической программе НЗТ применительно к задаче развития детонации в конечном прямом цилиндрическом канале переменного сечения в зависимости от плотности взрывчатого вещества (ВВ) и объемной плотности энергии, мгновенно вносимой в зону инициирования.

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

Zabrodina E.A., Orlov Yu.N., Soloviev V.O.

The detonation wave propagation modeling in a cylindrical channel

In this paper the mathematical models of initiation of detonation by the use of electric charge and spreading out the detonation wave are described. The numerical results of detonation modeling in a cylindrical channel, obtaining with the use of 2D gas dynamic numerical program H3T, are investigated. We analyze the dependence of the detonation wave velocity on the density of explosive material and volume energy density for detonation initiation.

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

Содержание

Введение	3
1. Математические модели развития детонации	5
2. Результаты расчетов	7
Литература	13

Введение

Численное моделирование в области газовой динамики, в том числе и распространения детонационной волны в цилиндрическом канале, активно развивается около 40 лет. Классическими монографиями по этому вопросу являются книги А.А. Самарского и Ю.П. Попова [1] и С.К. Годунова, А.В. Забродина и др. [2]. В зарубежной литературе вычислительные модели детонации взрывчатых веществ (ВВ) подробно описаны в монографии [3]. Актуальность данной тематики связана со сложностью разработки математической модели инициирования и последующего горения (то есть термического разложения) ВВ, а также с недостаточной точностью проводимых натурных испытаний для построения эмпирической модели уравнения состояния как исходного ВВ, так и продуктов разложения.

В настоящее время существует множество моделей для описания развития детонации [4-8]. Однако, как отмечено в работе [5], хотя исследование кинетики инициирования детонации в конденсированных ВВ ведется весьма интенсивно, не построено общепринятой детальной микроскопической модели этого явления, а также не выяснен фундаментальный вопрос о том, какие процессы обеспечивают возбуждение детонации. В этой связи актуальной задачей является создание физической теории, основанной на моделировании реальных элементарных процессов, которая бы позволила описать основные физические эффекты, наблюдаемые в экспериментах по ударно-волновому инициированию детонации в гетерогенных конденсированных ВВ. Одна из моделей таких процессов предложена, собственно, в [5], однако и она не является моделью из первых принципов, каковые с необходимостью приводят к использованию кинетических уравнений (чаще всего уравнения Больцмана), а для их решения надо знать не только межмолекулярный потенциал, но и проводить вычисления по расчету функции распределения смеси реагирующих газов в семимерном пространстве, что требует разработки специальных вычислительных алгоритмов.

Следовательно, в практических расчетах используются эмпирические зависимости, присущие моделям сплошной среды. Поскольку же измерения термодинамических параметров такой среды по самому своему содержанию стационарны, а взрывные процессы, в которых проводятся такие измерения, существенно нестационарны, то подбор подходящих эффективных параметров для описания результатов экспериментов зависит, вообще говоря, от самих экспериментов и потому не может считаться физически достоверным. В то же время за неимением иных моделей в расчетах используются именно такие эмпирические зависимости в предположении, что описываемая в расчетах ситуация в основном схожа с условиями экспериментов, в которых эти модели были получены.

Физическая модель детонации была предложена в 40-х годах прошлого столетия Я.Б. Зельдовичем, Дж. фон Нейманом и В. Дёрингом [9-11]. Согласно

этим представлениям детонационное разложение ВВ осуществляется под действием ударной волны, возбуждающей в веществе экзотермическую химическую реакцию, энергия которой идет на поддержание процесса. Однако в отдельных экспериментах наблюдаются и неклассические режимы инициирования детонации [12].

Таким образом, выбирая одну из эмпирических моделей при численном анализе развития детонации для конкретных образцов изделий, следует учитывать, что использование некоторой другой (но тоже экспериментальной) модели повлияет как на точность вычислительного алгоритма, так и качественно на вид решения.

Среди моделей, берущих свое начало из представления Аррениуса о скоростях химических реакций и аппроксимации больцмановского интеграла столкновений, основными являются экспоненциальные модели [4] для скоростей реакций с подгоночными параметрами, статистически оцениваемыми по результатам экспериментов. Используются также полиномиальные модели для описания развития детонации, в основе которых лежит классическая работа Ли и Тарвера [13].

Практическими задачами, требующими применения компьютерного моделирования, являются, в частности, задачи оптимизации условий инициирования детонации в цилиндрических каналах различной формы.

В предшествующих работах авторов [14-15] были представлены результаты численного моделирования развития детонации в цилиндрических каналах, а также в каналах в форме усеченного конуса и нескольких вложенных цилиндров разного диаметра [16-17], соединяемых через усеченные конусы. В работе [18] была сформулирована модель электрического инициирования пентаэритриттетранитрата (ТЭН) в канале детонатора и был проведен численный анализ развития детонации для разных плотностей ВВ и для разных энергий инициирования на основе моделирования распространения ударной волны в цилиндрическом канале по двумерной газодинамической программе НЗТ [19].

В настоящей работе целью проводимого анализа является сравнение результатов численного моделирования по эмпирическим моделям [20, 21], восходящих к Тарверу [13], с экспериментальными данными, полученными в ИМАШ РАН и приведенными в [18]. Проводимые эксперименты были направлены на уменьшение размеров детонаторов и на повышение надежности и эффективности их срабатывания.

Отметим здесь, что 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 изделий. 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 [22] были проанализированы зависимости объемов электролитических конденсаторов различных типов, используемых для электроинициирования, от

подводимой энергии. Выяснилось, что объем растет линейно с увеличением энергии. При этом 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.

Детонаторы с малой энергией инициирования были предложены одним из авторов данной работы в [23-25]. Различные режимы распространения волны детонации в таких детонаторах изучались в рамках разных математических моделей в [26-29] 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.

1. Математические модели развития детонации

Согласно [18] инициирование ТЭНа в анализируемом эксперименте происходило посредством пропускания электрического тока через расплавляемый внутри области инициирования ВВ участок электрической цепи. Электрический разряд происходил при замыкании обкладок конденсатора. Меняя напряжение на обкладках конденсатора, можно менять энергию инициирования, что влияет на режим прохождения ударной волны. Энергия конденсатора в эксперименте менялась в пределах от 0,5 до 4,5 Дж. Считалось, что мощность энерговыделения постоянна в течение характерного времени $\tau = 5 \text{ мкс}$, после чего обращается в нуль. Фактически не вся энергия конденсатора идет на нагревание ВВ, но на сегодняшний день у нас нет достоверных данных о доле энергии, идущей на инициирование. Поэтому считаем, что нагревание ТЭНа происходит со ступенчатым временным профилем мощности в зоне инициирования, т.е. там, где ВВ непосредственно окружает проволочку в центральной части дна цилиндра.

Далее индекс «1» относится к исходному веществу, а индекс «2» – к продуктам реакции. В области инициирования для расчета концентраций используется уравнение

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

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

$$w = J \exp\left(-\frac{A}{RT}\right). \quad (2)$$

Для ТЭНа, согласно [8], $J = 3.54 \times 10^{19} \text{ сек}^{-1}$, $A = 160 \text{ кДж/моль}$ – энергия активации, а R – газовая постоянная. Энерговыделение вследствие реакции разложения ТЭНа описывается уравнением

$$Q = -\rho Q_0 \cdot \frac{dX_1}{dt}, \quad Q_0 = 5.706 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}. \quad (3)$$

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

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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u} \vec{u}) + \operatorname{grad}(p) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho(\varepsilon + 0.5|\vec{u}|^2))}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}(\varepsilon + 0.5|\vec{u}|^2) + p\vec{u}) = Q. \quad (6)$$

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 $k = 1, 2$:

$$\rho_k = \rho \cdot X_k, \quad v_k = 1/\rho_k, \quad p = \sum_k p_k, \quad \varepsilon = \sum_k \varepsilon_k \cdot X_k. \quad (7)$$

$$p_k = p_k^{(P)} + p_k^{(T)} \quad (8)$$

$$\varepsilon_k = \varepsilon_k^{(P)} + \varepsilon_k^{(T)} \quad (9)$$

Для каждой компоненты используются уравнения состояния Джонса–Уилкинса–Ли (JWL) [30], параметры которого согласно введенным ниже обозначениям приведены в табл. 1:

$$p_k^{(P)} = A_k \cdot \exp(-R_{1k} \rho_{0k} v_k) + B_k \cdot \exp(-R_{2k} \rho_{0k} v_k) \quad (10)$$

$$p_k^{(T)} = \frac{g_k c_{vk} T}{v_k} \quad (11)$$

$$\varepsilon_k^{(P)} = \frac{A_k}{R_{1k} \rho_{0k}} \cdot \exp(-R_{1k} \rho_{0k} v_k) + \frac{B_k}{R_{2k} \rho_{0k}} \cdot \exp(-R_{2k} \rho_{0k} v_k) \quad (12)$$

$$\varepsilon_k^{(T)} = c_{vk} T \quad (13)$$

Табл. 1. Параметры уравнения состояния JWL

k	$\rho_{0k},$ кг/м ³	$A_k, \text{ Па}$	$B_k, \text{ Па}$	$C_{vk} \cdot \rho_{0k},$ 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

Далее в области распространения детонационной волны используются две модели ударно-волнового разложения ТЭНа. Согласно [20] (первая модель)

$$\frac{dX_1}{dt} = - \left[I \cdot X_1^{2/9} \cdot \eta^4 + G \cdot X_1^{2/9} \cdot X_2^{2/3} \cdot p^z \right], \quad (14)$$

где

$$\eta = \begin{cases} \frac{\rho X_1}{\rho_0} - 1, & \rho X_1 > \rho_0 \\ 0, & \rho X_1 \leq \rho_0 \end{cases} \quad (15)$$

а параметры равны $I = 2 \cdot 10^7 \text{ сек}^{-1}$, $G = 4 \cdot 10^8 \text{ Мбар}^{-z} \cdot \text{сек}^{-1}$, $z = 1,4$. Давление p измеряется в мегабарах.

Согласно [21] (вторая модель)

$$\frac{dX_1}{dt} = - \left[I \cdot X_1^{0.667} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^9 \right]_{X_2 < 0.1} + \begin{cases} G_1 \cdot X_1^{0.667} \cdot X_2^{0.04} \cdot p, & \text{при } X_2 \leq 0.04 \\ G_2 \cdot X_1^{0.667} \cdot X_2^{0.667} \cdot p^2, & \text{при } X_2 > 0.04 \end{cases} \quad (16)$$

$I = 22 \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1}$, $G_1 = 55 \cdot 10^6 \text{ Мбар}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$, $G_2 = 8000 \cdot 10^6 \text{ Мбар}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$.

2. Результаты расчетов

Расчетная область представляет собой продольный разрез внутренней части цилиндра длиной 10^{-2} м, разделенной на три подобласти (рис. 1):

- область инициирования ($0 < l < 1.5 \cdot 10^{-4}$ м),
- область развития детонации ($1.5 \cdot 10^{-4}$ м $< l < 7 \cdot 10^{-3}$ м),
- область распространения детонационной волны ($7 \cdot 10^{-3}$ м $< l < 1.7 \cdot 10^{-2}$ м).

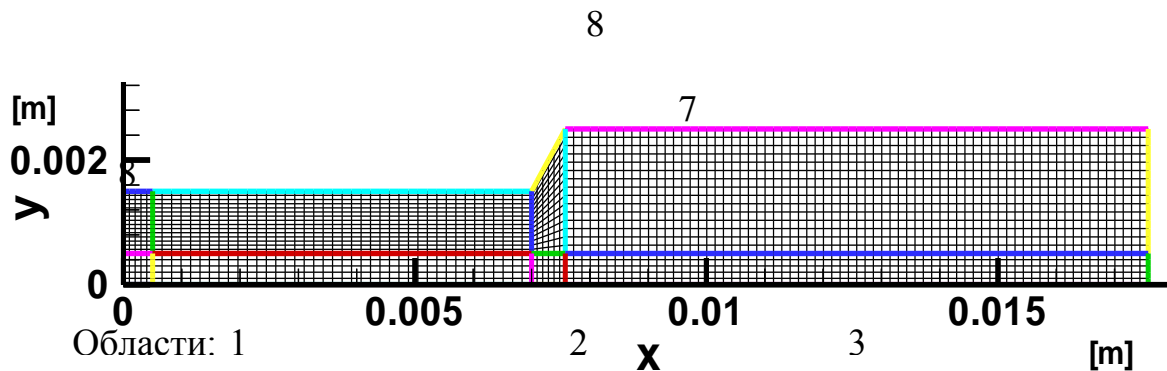


Рис. 1. Конфигурация и сетки расчетного блока. $0x$ – ось симметрии, $0y$ – цилиндрический радиус.

Весь расчетный блок для удобства выделения зоны поджига разделен на 8 областей неподвижными эйлеровыми границами. Области нумеруются слева направо и снизу вверх, как показано на рис. 1. Все внешние верхние ($y = 1.5 \cdot 10^{-3} \div 2.5 \cdot 10^{-3}$ м), левые ($x = 0$) и нижние ($y = 0$) границы – жесткие стенки. Правые границы ($x = 17.57735 \cdot 10^{-3}$ м) – неподвижные эйлеровы, что соответствует нулевому краевому условию 2-го рода.

Размеры областей [м]:

1: $0 < x < 0.5 \cdot 10^{-3}$, $0 < y < 0.5 \cdot 10^{-3}$ – область поджига,

2: $0.5 \cdot 10^{-3} < x < 7 \cdot 10^{-3}$, $0 < y < 0.5 \cdot 10^{-3}$,

3: $7 \cdot 10^{-3} < x < 7.57735 \cdot 10^{-3}$, $0 < y < 0.5 \cdot 10^{-3}$,

4: $7.57735 \cdot 10^{-3} < x < 17.57735 \cdot 10^{-3}$, $0 < y < 0.5 \cdot 10^{-3}$,

5: $0 < x < 0.5 \cdot 10^{-3}$, $0.5 \cdot 10^{-3} < y < 1.5 \cdot 10^{-3}$,

6: $0.5 \cdot 10^{-3} < x < 7 \cdot 10^{-3}$, $0.5 \cdot 10^{-3} < y < 1.5 \cdot 10^{-3}$,

7: $7 \cdot 10^{-3} < x < 7.57735 \cdot 10^{-3}$, $0.5 \cdot 10^{-3} < y < 1.5 \cdot 10^{-3} \div 2.5 \cdot 10^{-3}$ (верхняя граница наклонена к оси симметрии на угол 60°),

8: $7.57735 \cdot 10^{-3} < x < 17.57735 \cdot 10^{-3}$, $0.5 \cdot 10^{-3} < y < 2.5 \cdot 10^{-3}$.

Во всех 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.

На рисунках 2 и 3 представлены результаты расчетов скорости детонационной волны по одномерному и двумерному численным алгоритмам в зависимости от начальной энергии в зоне инициирования. Красные линии отвечают начальной плотности ВВ 1000 кг/м³, зеленые – плотности 1600 кг/м³. Сплошные линии соответствуют расчетам по формуле (14) (одночленная модель Тарвера), штриховые – расчетам по формуле (16) (двучленная модель Тарвера).

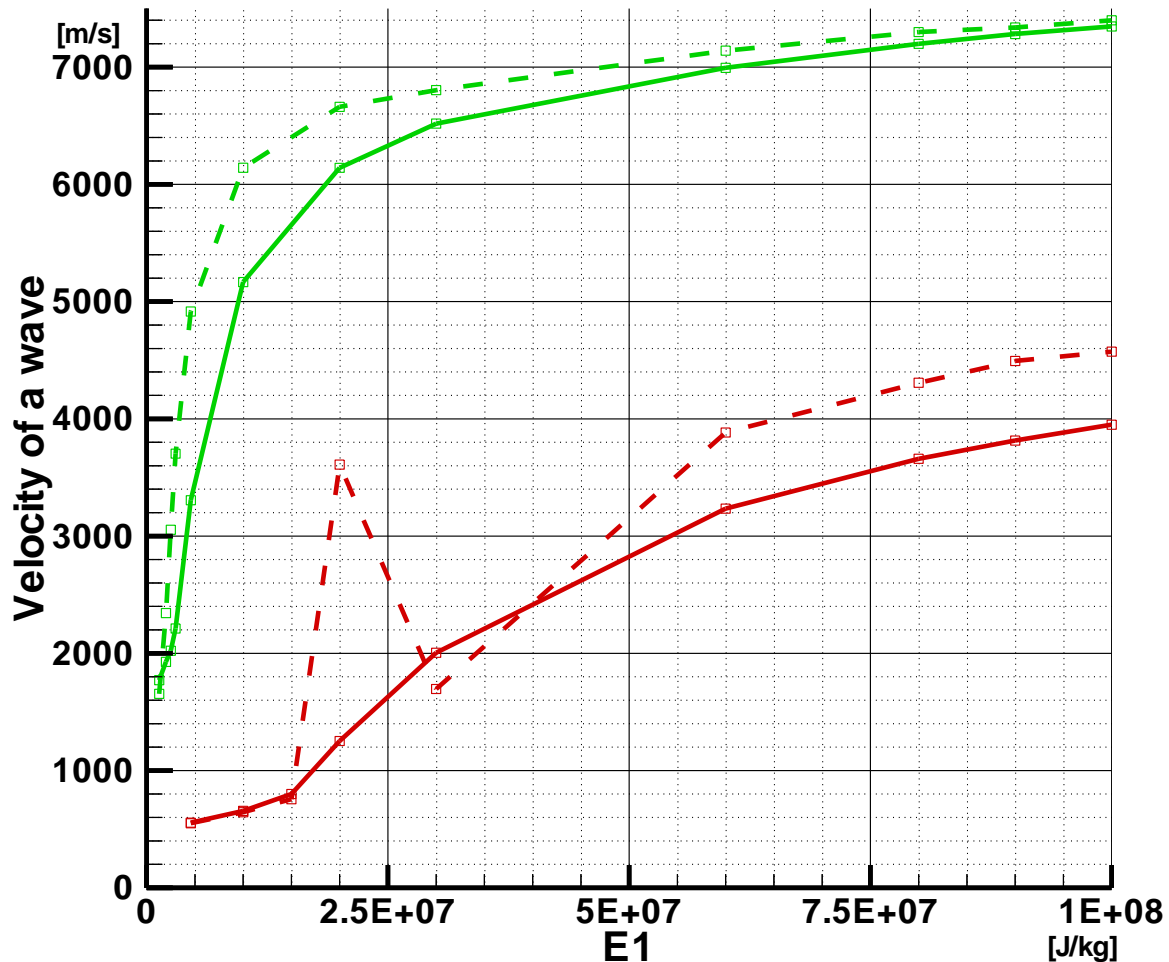


Рис. 2. Скорость детонации по расчетам по одномерной модели в зависимости от энергии инициирования и двух начальных плотностей ВВ

Если не принимать во внимание вычислительный артефакт при расчетах по одномерной двучленной модели (красная штрихованная линия), то можно сделать вывод, что при достаточной энергии инициирования режим детонации развивается более эффективно для двучленной модели. При большей начальной плотности ВВ скорость детонации примерно в два раза выше, чем при низкой. Однако следует отметить, что тенденции увеличения скорости детонации с ростом плотности и энергии инициирования ведут себя по-разному: при низкой плотности увеличение энергии приводит ко все большему расхождению скоростей (красные штрихованная и сплошная линии), а при высокой – напротив, к сближению (зеленые штрихованная и сплошная линии).

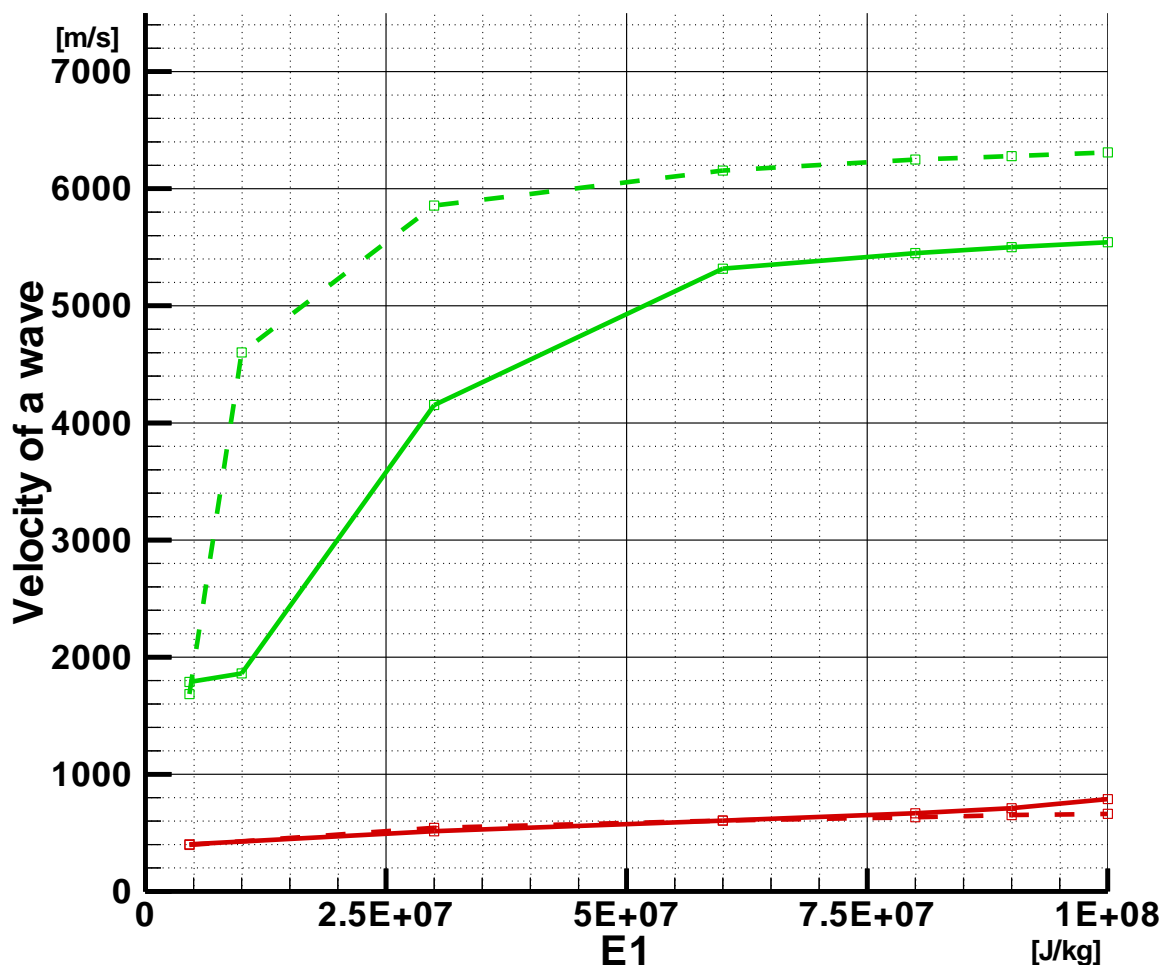


Рис. 3. Скорость детонации по расчетам по двумерной модели в зависимости от энергии инициирования и двух начальных плотностей ВВ

При расчетах по двумерной численной схеме различие в скоростях прохождения ударной волны более заметно: низкая плотность (красные линии) не дает детонационного режима, причем и двучленная модель, и одночленная дают совпадающие результаты. Для высокой плотности (зеленые линии) двучленная модель четко дает более высокую скорость детонационной волны.

При малых энергиях инициирования, т.е. в режиме обычного горения, обе модели дают практически одинаковые результаты, тогда как в режиме детонации результаты получаются существенно разными.

В эксперименте ИМАШ, анализируемом в настоящей работе, с которым и сравниваются результаты численного моделирования, плотность ТЭНа была близка к $\rho = 1600$ кг/м³. Представляет также интерес сравнить между собой результаты расчетов для разных плотностей.

Профили давления вдоль стенки цилиндра для двумерного расчета и для плотности $\rho = 1000$ кг/м³ показаны на рис. 4. Также показан критический

уровень давления в канале, после которого наступает разрушение материала детонатора для стали С-20.

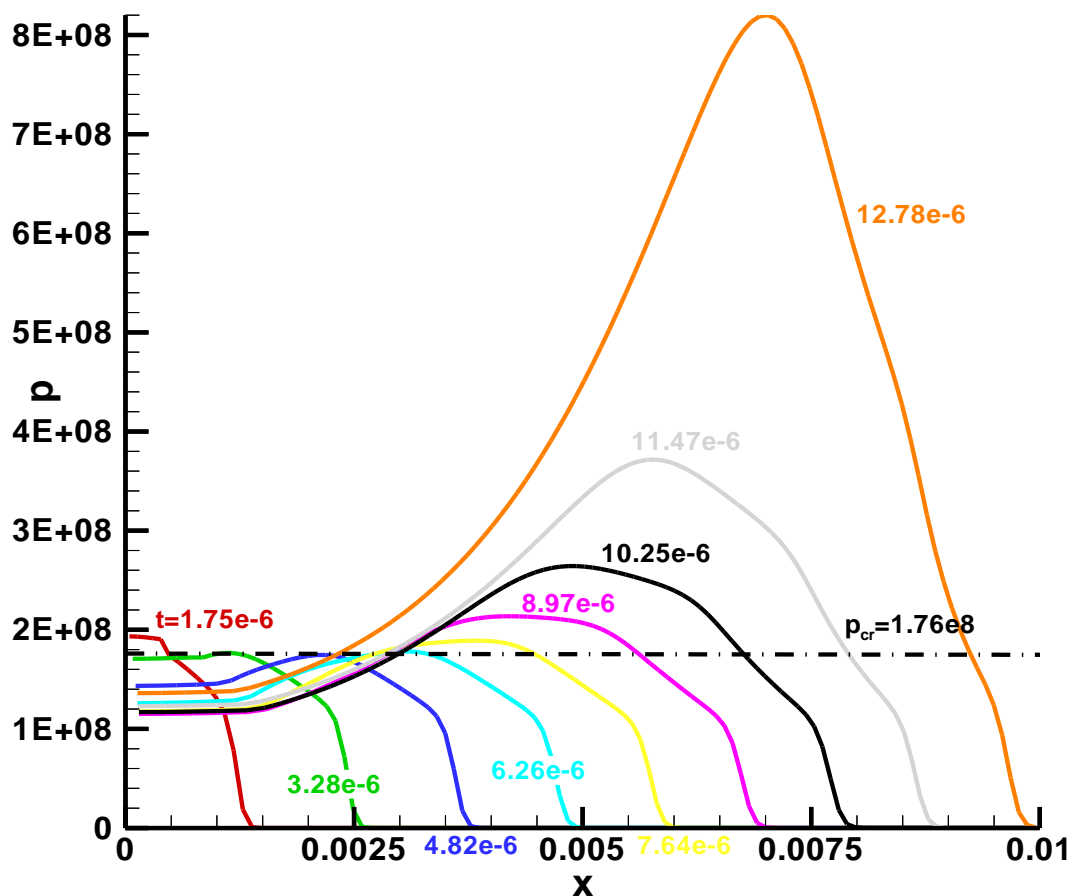


Рис. 4. Давление [Па] в цилиндре в разные моменты времени [с] для плотности ВВ 1000 кг/м^3

Распределения тех же величин вдоль стенки цилиндра для варианта с удельным выделением энергии в зоне инициирования, равным $3 \cdot 10^7$ Дж/кг, и начальной плотностью 1600 кг/м^3 на разные моменты времени приведены на рис. 5. Основное отличие от рис. 4 состоит в том, что для варианта с большей плотностью расчет давления по формуле (26), т.е. по второй модели детонации, на порядок превосходит вариант с меньшей плотностью.

Следует отметить, что в эксперименте ИМАШ наблюдалось разрушение корпусов детонаторов. Разрушение происходило вблизи зоны инициирования, однако ударная волна успевала дойти до открытого конца цилиндра. Это означает, что скорость распространения ударной волны должна была быть достаточно высокой, чему отвечает модель (26), которая, таким образом, представляется более адекватной для описания данного эксперимента, чем модель (24).

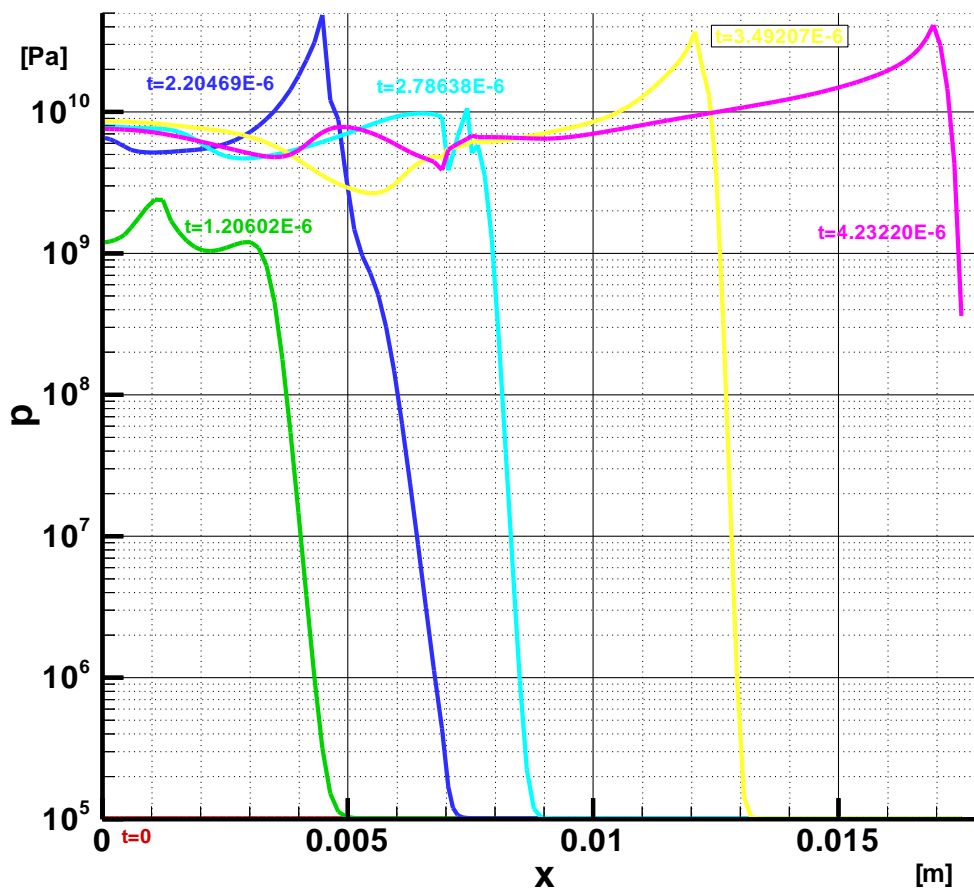


Рис. 5. Давление [Па] в цилиндре на разные моменты времени [с] для плотности ВВ 1000 кг/м^3 по второй модели детонации

Поскольку один из концов цилиндра в расчетах считается закрытым, то при высоких скоростях распространения наблюдаются эффекты, связанные с отражением ударных волн. Подчеркнем, что в самих газодинамических расчетах корпус детонатора предполагался неразрушаемым.

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 уравнения состояния ВВ применительно к малым размерам детонатора и уточнения модели инициирования.

Литература

1. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные методы решения задач газовой динамики. – М.: Наука, 1980.
2. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики – М.: Наука, 1976.
3. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации. – М.: Мир, 1985.
4. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортон В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. – М.: Янус-К, 1996.
5. Гребенкин К.Ф., Жеребцов А.Л., Кутепов А.Л., Попова В.В. О возможности экспериментальной проверки полупроводниковой модели детонации // ЖТФ, 2002. Т. 72, вып. 11.
6. Кобылкин И.Ф., Павлова И.А. Возбуждение детонации в снаряжении оболочечных взрывных устройств при воздействии высокоскоростных ударников с разной формой головной части // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 3. С. 54–65.
7. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Возбуждение и распространение взрывных превращений в зарядах взрывчатых веществ. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015.
8. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. Т.1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
9. Зельдович Я.Б. Теория распространения детонации в газовых системах // ЖЭТФ, 1940. № 10. С. 542.
10. Von Neumann J. Theory of Detonation Waves // Office of Science Research and Development. Report N 549. 1942.
11. Doering W. Uber den detonations vorgang in gasen // Ann. Phys. 1943. V. 43, N 6. P. 421-436.
12. Лобойко Б.Г., Любятинский С.Н. Зоны реакции детонирующих взрывчатых веществ // ФГВ, 2000. Т. 36, №6. С. 45-64.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.

18. Забродина Е.А., Орлов Ю.Н., Соловьёв В.О., Овчинников Н.М., Кельнер М.С. Модель электроиницирования ТЭНа в канале детонатора // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 72. 17 с.
19. 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.
20. Tarver C.M., Hallquist J.O., Ericson L.M. Modeling Short Pulse Duration Shock Initiation of Solid Explosives // VIII Symp. On Detonation, NSWC, Albuquerque, NM, 1985, p. 951-961.
21. May C.M., Tarver C.M. Modeling Short Shock Pulse Duration Initiation of LX-16 and LX-10 Charges // APS Shock Compression of Condensed Matter, Nashville, TN, 2009.
22. 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.
23. Соловьёв В.О., Думенко В.И. Электродетонатор и электровоспламенитель для него // МКИ: 6 F 42 B 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.
24. Соловьёв В.О. Средства инициирования для твердотопливных пульсирующих взрывных устройств // Боеприпасы и спецхимия. Научно-технический журнал. № 3, 2007, с. 57-62.
25. Соловьёв 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.
26. 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.
27. 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.
28. Соловьёв 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.
29. 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, 17 с.
30. Горбатенко А.А. Анализ уравнения состояния продуктов детонации JWL // Молодежный научно-технический вестник. № 3, 2012, с. 1-5.