

*А.В. Саун, к.б.н., нач. каф., ФВП НТУ «ХПИ»,  
Ю.В. Хилько, преподаватель, НУГЗУ,  
К.В. Корытченко, к.т.н., нач. НИЛ, ФВП НТУ «ХПИ»*

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ВНУТРИБАЛЛИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
В ГАЗОДЕТОНАЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ  
МЕТАНИЯ ТУШАЩИХ ВЕЩЕСТВ**

(представлено д-ром техн. наук Ключкой Ю.П.)

Построена математическая модель внутрибаллистических процессов в газодетонационной установке метания тушащих веществ. Рассчитаны термомеханические нагрузки, время релаксации волновых процессов и динамику движения контейнера с тушащим веществом в газодетонационной установке.

**Ключевые слова:** модель, метание тушащих веществ, детонация в газах.

**Постановка проблемы.** Проблема метания огнетушащих веществ различной массы с высокой производительностью и эффективностью на заданные расстояния с целью дистанционного тушения крупных пожаров является актуальной.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В распространенных технических средствах и методах доставки огнетушащих веществ на большие расстояния в качестве источника энергии метания используют пороховые заряды, энергию сжатого воздуха и горючих газов [1, 2]. В частности, пороховые установки реализованы на серии пожарных машин типа «Импульс-1», «Импульс-2М», «Импульс-Шторм» и обеспечивают эффективное тушение залповым выстрелом порошкового вещества массой до 1500 кг на дальности 50–100 м [3]. Пневматические системы выброса рабочего тела используют в установках фирм Иста (Россия), Resqmax (США), Restech (Норвегия) [4–6]. Такие установки обеспечивают метание средств пожаротушения и спасения небольшой массы (10–20 кг) на расстояния 50–300 м. По интенсивности подачи огнегасящей смеси имеют преимущество установки с пороховыми зарядами, а по обеспечению циклической работы и управлению дальностью метания за счет изменения энергии выстрела – газовые метательные установки.

В данной работе в качестве перспективной рассматривается установка метания тушащих веществ в контейнерах на основе газовой детонации, обладающая преимуществами по указанным показателям в комплексе. В установках такого типа повышение энергоэффективности и дальности метания обеспечивается за счет более высокого давления в

рабочей камере и снижения времени теплоотдачи при детонационном сгорании газового заряда в сравнении с установками, где реализуется медленный процесс дефлаграционного сгорания газового заряда [7].

**Постановка задачи и её решение.** Для обоснования технического задания на разработку газодетонационных устройств метания циклического действия требуется исследовать динамику движения контейнера с тушащим веществом и термомеханические нагрузки, которые могут возникать в детонационной камере сгорания. В данной работе такое исследование проведено путем численного моделирования.

**Описание математической постановки задачи капсульного метания тушащего вещества в газодетонационной установке.** Задача метания тел решается с помощью газовой детонационной системы метания. Система представляет собой детонационную трубу 1, заполненную детонационной газовой смесью 2 (рис. 1). В трубе располагается метаемое тело 3 (капсула с тушащим веществом). Ускорение тела обеспечивается за счет работы сил давления, возникающего в результате детонационного сгорания газовой смеси.

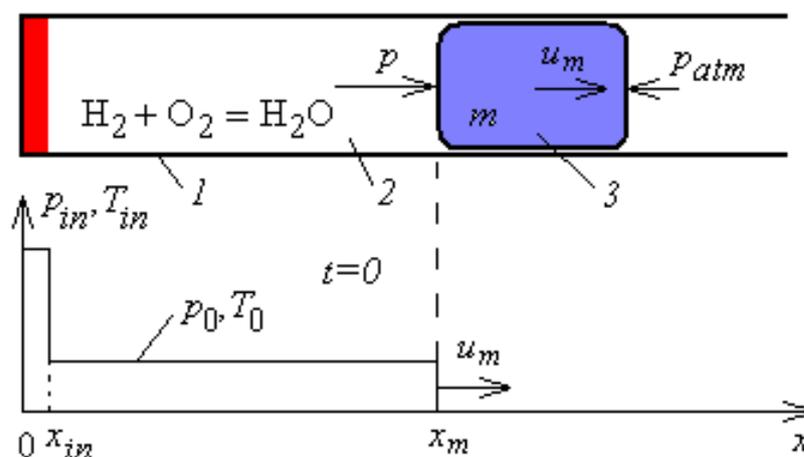


Рис. 1. Схема устройства и принцип работы газодетонационной установки метания тушащих веществ

Для расчета процесса ускорения метаемого тела в детонационной установке, осуществим математическую постановку задачи метания. В случае пренебрежения потерями тепла, выделяющегося в результате сгорания топлива через контактные поверхности, процессы детонационного сгорания и ускорения метаемого тела целесообразно рассматривать как одномерную плоско-симметричную задачу в декартовой системе координат.

Движение метаемого тела зададим путем перемещения границы расчетной области с учетом противодействия внешней среды. Отсюда, в начальный момент времени  $t = 0$  правой подвижной границе расчетной области присвоена координата  $x_m$  (начальное положение метаемого тела) и скорость движения границы принята равной  $u_m = 0$ . Левая не-

подвижная граница расчетной области с координатой  $x = 0$  соответствует закрытому торцу детонационной трубы. На данных границах выполняется условие непротекания. Участок  $0-x_m$  заполнен стехиометрической смесью водорода с кислородом при температуре  $T_0 = 300$  К. Начальное давление  $p_0$  является варьируемым параметром задачи. Предполагается, что в газодетонационной установке обеспечивается прямое инициирование детонации. Поэтому при моделировании на участке  $0-x_{in}$  задается изохорное разогревание газа до температуры  $T_{in}$ .

Процесс детонационного сгорания и расширения продуктов детонации описывается дифференциальными уравнениями газодинамики для многокомпонентной химически реагирующей газовой смеси [8]. В диапазоне  $0 < x < x_m$ , решалась система уравнений (неразрывности, импульса и энергии), в виде

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

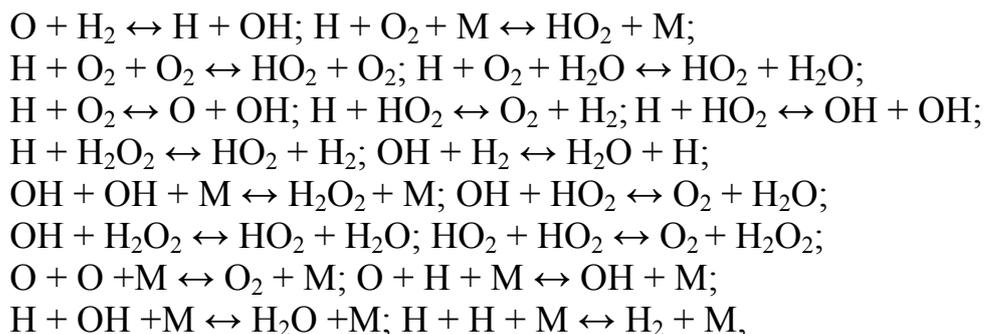
$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (p + \rho u^2)}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \left( \rho \varepsilon + \frac{\rho u^2}{2} \right)}{\partial t} + \frac{\partial \left[ u \left( \rho \varepsilon + \frac{\rho u^2}{2} + p \right) \right]}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial y_i}{\partial t} + \frac{\partial y_i u}{\partial x} = \dot{\omega}_i, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность газа;  $u$  – скорость;  $p$  – давление;  $\varepsilon$  – внутренняя энергии единицы массы газа;  $x$  – координата по расстоянию;  $y_i$  – молярная концентрация  $i$ -й компоненты,  $i = 1, \dots, G$  ( $G$  – число компонентов);  $\dot{\omega}_i$  – скорость изменения концентрации  $i$ -й компоненты смеси за счет химических реакций.

Расчет химических реакций осуществлялся по упрощенной кинетической схеме сгорания водорода [9], включающей 8 компонентов (H, O, OH, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, HO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) и состоящей из 17-ти обратимых химических реакций:



где  $M$  означает третью частицу.

Давление идеального газа для многокомпонентной смеси определяется в виде суммы парциальных давлений  $i$ -х компонентов смеси

$$p = RT \sum_{i=1}^G y_i, \quad (5)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $G = 8$  в данной задаче.

Энергия единицы объема смеси рассчитывается по выражению

$$\rho \varepsilon = \sum_{i=1}^G y_i U_i^0, \quad (6)$$

где  $U_i^0$  – внутренняя (химическая и тепловая) энергия 1 моля  $i$ -й компоненты смеси, рассчитываемая по выражению

$$U_i^0 = H_i^0 - RT, \quad (7)$$

где  $H_i^0$  – молярная энтальпия  $i$ -й компоненты смеси, равная

$$H_i^0 = \Delta H_{298,15i}^0 + \int C_{pi} dT, \quad (8)$$

где  $\Delta H_{298,15i}^0$  – стандартная молярная энтальпия образования  $i$ -й компоненты смеси;  $C_{pi}$  – молярная теплоемкость  $i$ -й компоненты при постоянном давлении.

Плотность смеси рассчитывается по выражению

$$\rho = \sum y_i \cdot \mu_i, \quad (9)$$

где  $\mu_i$  – молярная масса  $i$ -й компоненты.

Динамика движения правой границы определяется из уравнений:

$$F = (p_m - p_{atm}) \cdot S = m \cdot a, \quad (10)$$

$$x_m = x_{m0} + \int_0^t a \cdot t dt, \quad (11)$$

где  $p_m$  – давление на правой границе расчетной области;  $p_{atm}$  – противодавление окружающей среды;  $S$  – площадь поперечного сечения детонационной трубы (метаемого тела);  $a$  – мгновенное ускорение метаемого тела;  $m$  – масса метаемого тела.

Из уравнения (10) видно, что для трубы произвольной площади в данной задаче достаточно ввести приведенную массу  $M = m/S$ , которая в данной работе принималась равной  $M = 250 \text{ кг/м}^2$ .

*Начальные и граничные условия задачи.* В начальных условиях принято отсутствие газодинамических возмущений в расчетной области на интервале  $x_{in} < x < x_m$ :

$$p(x)|_{t=0} = p_0, \quad (12)$$

$$T(x)|_{t=0} = T_0, \quad (13)$$

$$u(x)|_{t=0} = 0, \quad (14)$$

где  $p_0, T_0$  – давление и температура горючей газовой смеси в начальный момент времени, соответственно.

Начальная протяженность детонационной камеры составила  $x_m = 0,1 \text{ м}$ . В представленных ниже расчетах принято  $p_0 = 1,1 \cdot \text{МПа}$ ,  $T_0 = 300 \text{ К}$ .

В области  $0 < x < x_{in}$  принято

$$p(x)|_{t=0} = p_{in}, \quad (15)$$

$$T(x)|_{t=0} = T_{in}, \quad (16)$$

$$u(x)|_{t=0} = 0. \quad (17)$$

В данной работе принято  $T_{in} = 3000 \text{ К}$ ,  $x_{in} = 0,002 \text{ м}$ . Давление  $p_{in}$  определялось по закону изохоры при плотности газа, равной плотности  $\rho_0$  детонирующей смеси.

В начальных условиях расчетная область заполнялась стехиометрической водородно-кислородной смесью, то есть стехиометрические коэффициенты  $i$ -х компонентов принимались равными:

$$\nu(H_2)|_{t=0} = 2; \quad (18)$$

$$\nu(O_2)|_{t=0} = 1; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \nu(O)|_{t=0} = \nu(H)|_{t=0} = \nu(OH)|_{t=0} = \nu(H_2O)|_{t=0} = \nu(H_2O_2)|_{t=0} = \\ \nu(HO_2)|_{t=0} = 0, \end{aligned} \quad (20)$$

где  $\nu$  – стехиометрический коэффициент.

Скорость метаемого тела в начальный момент времени приравнивалась нулю

$$u_m|_{t=0} = 0. \quad (21)$$

Со стороны закрытого торца детонационной трубы (левой границы расчетной области) принято отсутствие градиентов термодинамических параметров газа

$$\left. \frac{dp}{dx} \right|_{x=0} = 0; \quad (22)$$

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = 0, \quad (23)$$

и неподвижность левой границы

$$u \Big|_{x=0} = 0. \quad (24)$$

Со стороны метаемого тела (правой подвижной границы расчетной области) принято отсутствие градиентов термодинамических параметров газа в виде:

$$\left. \frac{dp}{dx} \right|_{x=x_m} = 0, \quad (25)$$

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=x_m} = 0. \quad (26)$$

В начальный момент метаемое тело неподвижно, что соответствует выражению

$$u_m \Big|_{x=x_m} = 0. \quad (27)$$

*Методы и алгоритмы, использованные при численном моделировании.* Для численного решения системы уравнений (1–11) применялся метод расщепления по физическим процессам: газодинамический, химический и механический. Также использовался принцип замороженных коэффициентов. Газодинамические процессы рассчитывались по методу Годунова С.К. первого порядка точности [10]. Расчетный шаг по времени при расчете газодинамических течений задавался исходя из условия Куранта. Из-за наличия цепных химических реакций в рассматриваемой модели, подцикл расчета химических превращений в расчетных ячейках имел собственный расчетный шаг по времени. При расчете механического процесса на расчетном шаге по времени замораживалась величина давления на правой границе расчетной области.

Использовался следующий алгоритм расчета. Рассчитывалось

изменение термодинамического состояния среды в расчетной области  $0 < x < x_m$  под действием газодинамических процессов. Далее определялось изменение состояния реагирующей среды в результате протекания химических реакций. По рассчитанному давлению  $p_m$  среды на правой границе расчетной области определялось ускорение и перемещение метаемого тела.

*Результаты численного моделирования.* Для заданных начальных условий рассчитана следующая динамика перемещения метаемого тела в газодетонационной установке (рис. 2, 3).

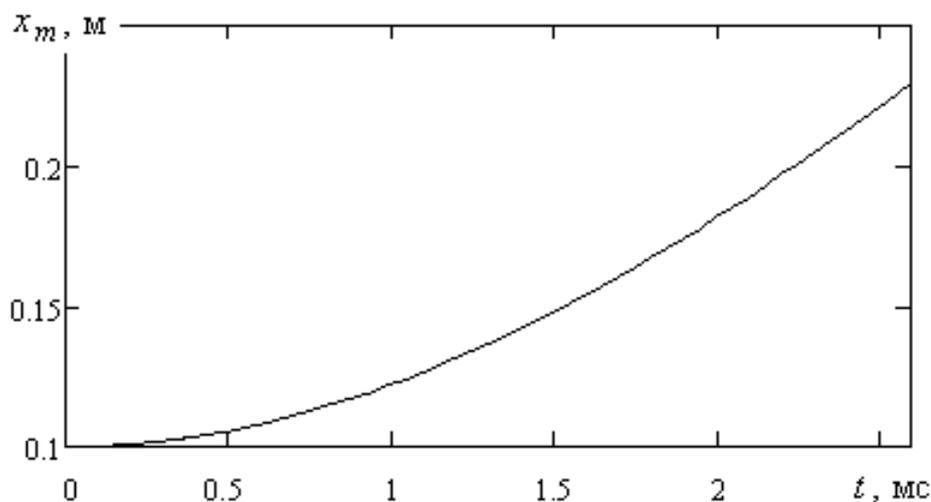


Рис. 2. Перемещение метаемого тела в газодетонационной установке

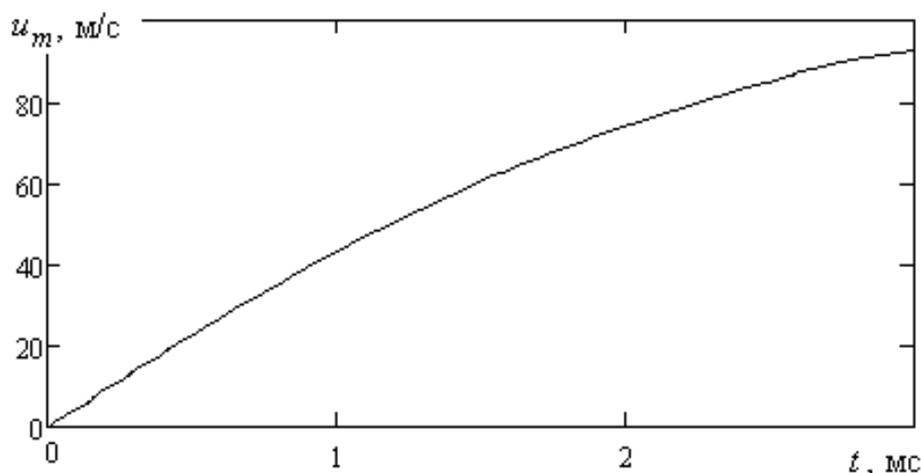
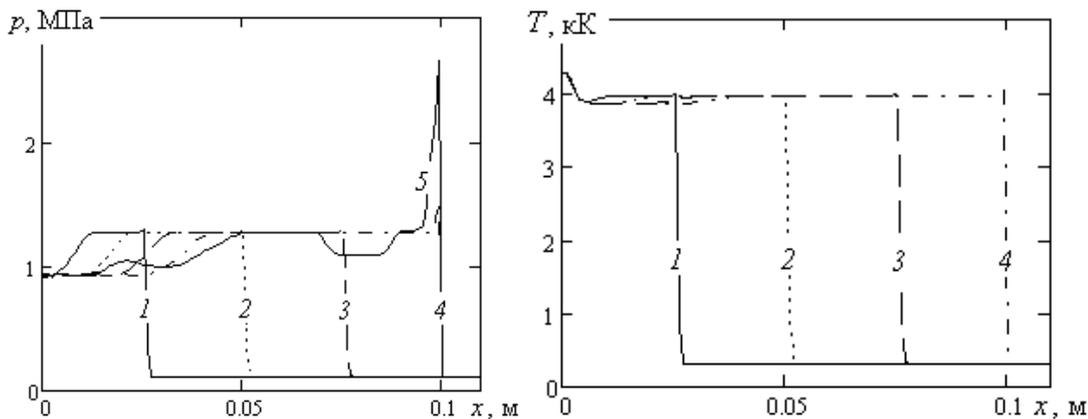


Рис. 3. Скорость  $u_m$  перемещения метаемого тела в газодетонационной установке

Изменение термодинамического состояния (давления и температуры) среды в газодетонационной установке в результате детонационного сгорания представлено на рисунке 4. Результаты расчетов соответствуют времени: 1 – 5 мкс; 2 – 10 мкс; 3 – 15 мкс; 4 – 20 мкс, 5 – 25 мкс.

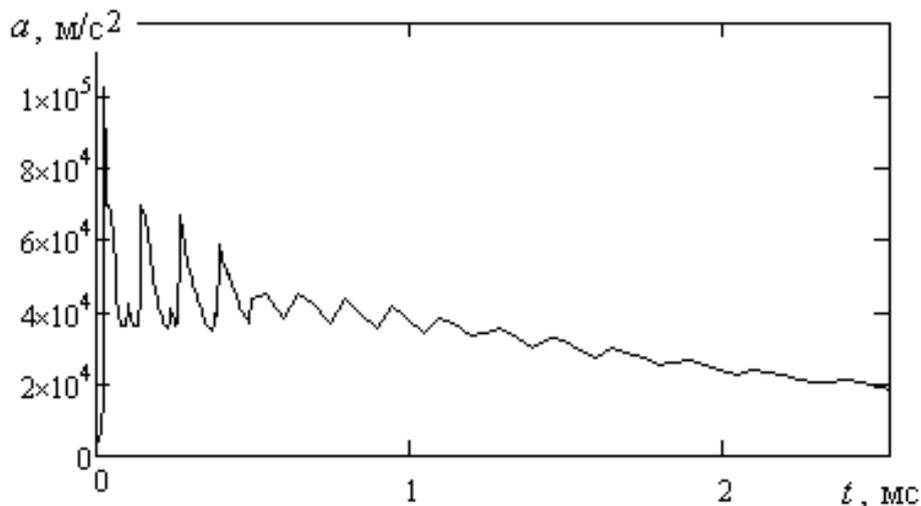


**Рис. 4.** Поле распределений давления (слева) и температуры (справа) на различные моменты времени

Исходя из полученных результатов имеем, что в расчетном варианте детонационное сгорание происходит за 20 мкс в камере сгорания длиной 0,1 м. Из анализа перемещения фронта детонационной волны имеем скорость распространения волны, равную  $D \approx 5000$  м/с. При этом, давление в продуктах детонации достигает  $13 \pm 1$  МПа. В области отражения ударной волны от метаемого тела давление газа возрастает до 27 МПа.

Имеем, что метаемое тело приобретает скорость 100 м/с за время не более 4 мс. При этом, необходимая полная длина газодетонационной системы для получения данной скорости составляет до 0,35 м.

Установлено, что после детонационного сгорания процесс ускорения метаемого тела имеем пульсирующий характер (рис. 5).



**Рис. 5.** Динамика ускорения метаемого тела в газодетонационной системе

Это вызвано наличием волн давления сложной структуры, возникающих в камере после детонационного сгорания горючей газовой смеси (рис. 6).

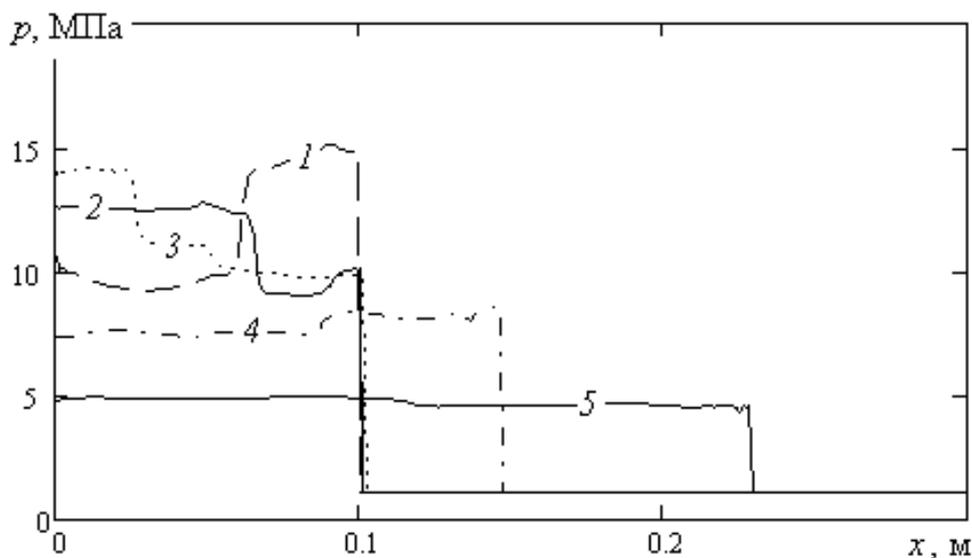


Рис. 6. Поле распределения давления в процессе метания на различные моменты времени: 1 – 0,17 мс; 2 – 0,25 мс; 3 – 0,35 мс; 4 – 1,5 мс; 5 – 3 мс

Из анализа распределения давления наблюдается постепенное затухание волновых процессов за время порядка нескольких миллисекунд. Поэтому дальнейшее перемещение метаемого тела можно рассчитывать по закону адиабаты.

При метании с помощью газодетонационной установки контейнера диаметром 0,1 м, что в расчетном варианте соответствует массе 2 кг, и при начальной скорости 100 м/с максимальная дальность метания составит 1000 м (без учета сопротивления воздуха).

**Выводы.** Разработанная математическая модель процесса ускорения тела в газодетонационной установке позволяет исследовать динамику перемещения метаемого тела (контейнера с тушащим веществом) и термомеханические нагрузки, возникающие в детонационной камере сгорания. Получено, что при начальном давлении 1,1 МПа в стехиометрической смеси водорода с кислородом в камере сгорания возникают максимальные давления до 27 МПа.

В дальнейшем планируется исследовать газодетонационные установки, в которых в качестве горючего газа используются пропан-бутановые смеси и воздух как окислитель.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бухтояров Д.В. Установки импульсного пожаротушения / Бухтояров Д.В., Копылов С.Н., Кузук В.А. / Пожарная безопасность 2005. – №3. – С. 89-94.

2. Пат. 2264834 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 62 С 39/00, F 41 F 1/00. Ствольное метательное устройство / Коротков Ю.А., Амельчу-

гов С.П.; заявитель и патентообладатель ООО Научно-технический центр “Системы пожарной безопасности” (RU). – № 2004100986/02; заявл. 12.01.2004 ; опубл. 27.11.2005, Бюл. № 33.

3. Новые импульсные технологии. Специальные системы пожаротушения. [Электронный ресурс]. – режим доступа к сайту: <http://rus.impulse-storm.com/>.

4. Сайт группы компаний “Иста”. [Электронный ресурс]. – режим доступа к сайту: <http://www.ista-01.ru/ru/foam/>.

5. Web site Rescue Solutions International, Inc. [Электронный ресурс]. – режим доступа к сайту: <http://www.resqmax.com/contact.php>.

6. Web site Restech. [Электронный ресурс]. – режим доступа к сайту: <http://restech.no/>.

7. Детонаційні системи. Область застосування та проблеми реалізації / [Хілько Ю. В., Коритченко К. В., Серпухов О. В., Галак О. В.] / Збірник матеріалів науково-технічної конференції ЦНДІ ОВТ ЗСУ “Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки Збройних Сил України”. – К.: ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2012. – С. 67-74 .

8. Зельдович Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я. Б.Зельдович, Ю.П. Райзер. – М : Наука, 1982, 688 с.

9. Petersen E. L. Reduced kinetics mechanisms for ram accelerator combustion / E. L. Petersen, R. K. Hanson // Journal of Propulsion and power. – 1999. – V. 15, No 4. – P. 591–600.

10. Численное решение многомерных задач газовой динамики / [Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др.] ; под ред. С.К. Годунова. – М.: Наука, 1976. – 400 с.

О.В. Саkun, Ю.В. Хилько, К.В. Коритченко

**Чисельне моделювання внутрішньобалістичних процесів у газодетонаційній установці метання речовин, які гасять**

Побудована математична модель внутрішньобалістичних процесів у газодетонаційній установці метання речовин, які гасять. Розраховані термомеханічні навантаження, час релаксації хвильових процесів і динаміку руху контейнера з речовиною, яка гасить у газодетонаційній установці.

**Ключові слова:** модель, метання речовин, які гасять, детонація в газах.

O.V. Sakun, Yu.V. Khilko, K.V. Korytchenko

**Numeral modeling of inner-ballistics processes in gas-detonation device for throwing extinguishing substances**

The numerical model of inner-ballistics processes in gas-detonation device for throwing extinguishing substances is created. The thermo-mechanic loads, relaxation time of wave processes and dynamics of container movement with the extinguishing substances are calculated for gas-detonation device.

**Keywords:** model, throwing extinguishing substances, detonation in gases.