

УДК 531.57  
DOI 10.17223/19988621/73/5

**В.А. Бураков, А.С. Дьячковский, А.Н. Ищенко,  
В.З. Касимов, К.С. Рогаев, Н.М. Саморокова**

## **УЧЕТ ВЛИЯНИЯ НАЛИЧИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ НА БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЫСТРЕЛА<sup>1</sup>**

Представлена математическая модель выстрела, учитывающая образование конденсированных продуктов при горении метательного заряда. Рассматривается влияние наличия конденсированной фазы на распределение основных баллистических характеристик в заснарядном пространстве при использовании пороховой метательной установки. Проведено теоретическое параметрическое исследование, направленное на оценку влияния массового содержания конденсированных частиц на основные баллистические характеристики выстрела.

**Ключевые слова:** *внутренняя баллистика, ствольные системы, газодинамика, горение порохового заряда, конденсированные частицы.*

В настоящее время в ствольных системах в основном используются бездымные пироксилиновые пороха. Данные пороха практически полностью исчерпали свои энергетические возможности. Перспективными порохами считаются высокоэнергетические баллиститные пороха с различными добавками [1–4]. Данные перспективные пороха горят с образованием конденсированной фазы или сажи. Наличие конденсированных продуктов горения в заснарядном пространстве приводит к потере химической энергии газопороховой смеси на разгон данных негорящих частиц.

### **Математическая модель**

Используемые в настоящее время математические модели внутрибаллистических процессов [5] в баллистических установках не учитывают явным образом наличие конденсированных продуктов горения, используя для их описания упрощенный подход с введением газа с усредненными приведенными параметрами.

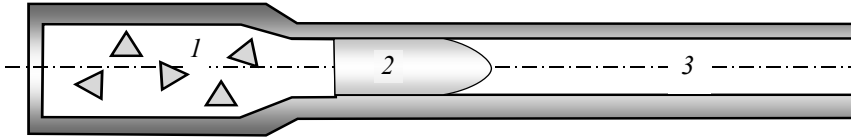
Целью настоящей работы является модификация математической модели [5] и проведение параметрических исследований влияния наличия сажи в продуктах сгорания на внутрибаллистические процессы.

Объектом исследования является пороховая метательная установка, схематически показанная на рис. 1.

В математической модели [5] предполагается, что в метательном заряде имеются частицы различных сортов, различающихся между собой размером и другими характеристиками. Частицы могут быть сгораемыми, в этом случае продукты сгорания представляет собой гомогенную смесь невязких нетеплопроводных га-

<sup>1</sup> В настоящей работе используются результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 8.2.09.2018 Программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского государственного университета.

зов с известными уравнениями состояния. Кроме сгораемых частиц могут присутствовать несгораемые, которые могут быть в смеси изначально, либо появляться в смеси как сажа в результате горения. Но в общем случае в рассмотрении находится всего  $J$  сортов частиц и  $J$  газов, образующихся при горении частиц соответствующего сорта.



**Рис. 1.** Общая схема пороховой метательной установки:  
 1 – пороховой метательный заряд; 2 – снаряд; 3 – ствол  
**Fig. 1.** General scheme of a powder propellant setup:  
 1 – a powder propellant charge; 2 – a projectile; 3 – a barrel

Движение полидисперсной смеси по каналу переменного поперечного сечения описывается законами сохранения массы, импульса и энергии, вид которых приводится ниже.

Для каждой компоненты гомогенной газовой смеси можем записать уравнения сохранения массы

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_j s) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_j u s) = m_{gj} s, \quad j = 1, \dots, J. \quad (1)$$

Для каждого сорта частиц имеем аналогично уравнения сохранения массы:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_j \delta_j s) + \frac{\partial}{\partial x}(\beta_j \delta_j u_j s) = m_{pj} s, \quad j = 1, \dots, J. \quad (2)$$

Уравнение

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u s) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 s) = -\alpha s \frac{\partial p}{\partial x} + 2\pi R \sigma_w^{nc} - s \sum_{j=1}^J (f_j - m_{gj} u_{gj}) \quad (3)$$

является законом сохранения импульса для газовой фазы, а уравнение

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_j \delta_j u_j s) + \frac{\partial}{\partial x}(\beta_j \delta_j u_j^2 s) = -s \beta_j \frac{\partial p}{\partial x} + s (f_j + m_{pj} u_{pj}) \quad (4)$$

– для  $j$ -й фракции частиц.

Для газовой фазы закон сохранения полной энергии имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E s) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u E s) = & -\frac{\partial}{\partial x}(\alpha p u s) - \sum_{j=1}^J \frac{\partial}{\partial x}(p \beta_j u_j s) + s \sum_{j=1}^J u_j \left( \beta_j \frac{\partial p}{\partial x} - f_j \right) + \\ & + s \sum_{j=1}^J m_{gj} \left[ Q_{gj} + \frac{u_{gj}^2}{2} \right] - s Q_r - s q. \end{aligned} \quad (5)$$

Аналогичное уравнение можем записать для  $j$ -й фракции частиц

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_j \delta_j E_j s) + \frac{\partial}{\partial x}(\beta_j \delta_j u_j E_j s) = -u_j \left( \beta_j \frac{\partial p}{\partial x} - f_j \right) + s m_{pj} \left[ Q_{pj} + \frac{u_{pj}^2}{2} \right] + s q_j. \quad (6)$$

Используемые в практике внутрибаллистических расчетов термодинамические свойства пороховых газов описываются уравнениями состояния типа Дюпре [5, 6]. В нашем случае для  $j$ -го элемента газовой смеси имеем калорическое уравнение состояния вида

$$e_{gj} = \frac{1}{\gamma_j - 1} p \left( \frac{1}{\rho_j^0} - b_j \right). \quad (7)$$

Для расчета притока массы при горении применяются соотношения, общепринятые во внутренней баллистике [5, 6]:

$$m_{pj} = - \frac{\beta_j \delta_j s_{0j}}{1 - \psi_j W_{0j}} \sigma_j (\psi_j) U_j \left( p, \frac{dp}{dt} \right). \quad (8)$$

В уравнениях (1) – (8) используются следующие обозначения:  $t$  – время;  $x$  – пространственная координата, отсчитываемая вдоль оси осесимметричного канала ствола в направлении метания;  $s(x, t)$  – площадь поперечного сечения канала;  $\rho_j$  – распределенная плотность газов, образовавшихся при сгорании  $j$ -го сорта частиц;  $\rho_j^0$  – истинная плотность  $j$ -го газа;  $\rho = \sum_{j=1}^J \rho_j$  – распределенная плотность гомогенной смеси газов;  $\rho^0$  – истинная плотность смеси газов;  $c_j = \rho_j / \rho$  – массовая доля  $j$ -го газа в газовой смеси  $\left( \sum_{j=1}^J c_j = 1 \right)$ ;  $\alpha_j$  – объемная доля  $j$ -го газа в газовой смеси  $\left( \sum_{j=1}^J \alpha_j = \alpha \right)$ ;  $\delta_j$  – истинная плотность  $j$ -го сорта частиц;  $\beta_j$  – объемная доля  $j$ -го сорта частиц в газопороховой смеси  $\left( \sum_{j=1}^J \beta_j = \beta = 1 - \alpha \right)$ ;  $u_j$  – скорость частиц  $j$ -го сорта;  $p, T, u$  – соответственно давление, температура и скорость газовой смеси;  $m_{gj} (m_{pj})$  – приток массы  $j$ -го газа (частиц) в единицу времени, приходящийся на единицу объема смеси;  $f_j$  – проекция на ось  $x$  силы, отнесенной к единице объема смеси, с которой газ действует на частицы  $j$ -го сорта вследствие разности скоростей фаз;  $u_{gj} (u_{pj})$  – скорость, с которой газ (частицы) поступают в полидисперсную смесь;  $R$  – текущее значение радиуса поперечного сечения канала ствола;  $\sigma_w^{n\tau}$  – напряжение на поверхности канала;  $E = e + \frac{u^2}{2}$  – полная энергия смеси газов;  $e = \sum_{j=1}^J c_j e_{gj}$  – внутренняя энергия смеси газов;  $Q_{gj}$  – удельная внутренняя энергия поступающих в смесь газообразных продуктов сгорания;  $Q_r$  – приходящаяся на единицу объема смеси интенсивность тепловых потерь вследствие

вие теплообмена со стенками канала ствола;  $q = \sum_{j=1}^J q_j$ ,  $q_j$  – интенсивность притока энергии к частицам  $j$ -го сорта в единице объема смеси вследствие теплообмена с газом;  $E_j = e_j + \frac{u_j^2}{2}$ ,  $e_j$  – удельная внутренняя энергия частиц (известная функция температуры);  $Q_{pj}$  – удельная внутренняя энергия поступающих в смесь частиц;  $b_j$  – коволюм;  $\gamma_j$  – показатель адиабаты;  $M_j$  – средний молекулярный вес данного газа;  $R$  – универсальная газовая постоянная.  $\psi$  – степень превращения;  $s_0$  – начальная поверхность частицы;  $W_0$  – начальный объем частицы;  $\sigma(\psi)$  – отношение текущей поверхности горения к начальной;  $U(p)$  – закон скорости послышного горения.

Система уравнений (1) – (8) при заданных конкретных зависимостях  $m_{pj}$ ,  $m_{gj}$ ,  $Q_{pj}$ ,  $Q_{gj}$ ,  $f_j$ ,  $q_j$ , определяющих межфазное взаимодействие газ – частицы;  $\sigma_w^{n\tau}$ ,  $Q_r$  – задающих трение и теплообмен на границе со стволом; уравнениях состояния газовой смеси и  $e_j(T)$  представляет замкнутую систему для определения средних распределенных плотностей газовых компонентов  $\rho_j$ , скорости  $u_j$ , объемного содержания  $\beta_j$  и температуры  $T_j$  частиц, давления  $p$  и скорости  $u$  газовой смеси. При этом произвол в выборе этих зависимостей позволяет использовать систему (1) – (8) для моделирования широкого класса внутрибаллистических явлений.

Решение системы (1) – (8) проводится посредством модификации Д. Богданова метода С.К. Годунова.

Заметим, что запись уравнений в форме (1) – (8) позволяет в одной расчетной области учитывать наличие частиц любых типов. При этом, например, горячая частица в результате горения может образовывать газообразные продукты и конденсированные компоненты, каждая из которых, в свою очередь, может иметь тип конденсированной компоненты или горячей компоненты. Поэтому с точки зрения логической организации и компьютерной реализации целесообразно ввести в рассмотрение термин «множества частиц» (МЧ), под которым понимается некая замкнутая совокупность частиц. Под замкнутостью понимается то, что частицы из конкретного МЧ, во-первых, предназначены для описания отдельного элемента математической модели, во-вторых, занимают одну и ту же последовательность индексов и, в-третьих, для них в процессе расчета величины  $m_{pj}$ ,  $m_{gj}$ ,  $u_{pj}$ ,  $u_{gj}$  должны быть взаимно согласованы. Простейшим примером МЧ является модель элемента порохового заряда, при горении которого образуются только газообразная компонента. В этом случае данному «множеству частиц» отвечает только один индекс  $j = k$ , скорости горячей частицы и продуктов ее сгорания равны ( $u_{pk} = u_k$ ,  $u_{gk} = u_k$ ), а интенсивности объемного газопритока и убывания массы частиц равны по величине ( $m_{gk} = -m_{pk}$ ) и определяются по (8).

Для целей практической реализации уравнения (6), (7) целесообразно переписать в форме для внутренней энергии.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho es) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho ues) = -p \frac{\partial}{\partial x}(\alpha us) - p \sum_{j=1}^J \frac{\partial}{\partial x}(\beta_j u_j s) + s \sum_{j=1}^J f_j (u - u_j) - 2\pi R u \sigma_w^{n\tau} + s \sum_{j=1}^J m_{gj} \left[ Q_{gj} + \frac{(u - u_{gj})^2}{2} \right] - s Q_r - sq ; \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_j \delta_j e_j s) + \frac{\partial}{\partial x}(\beta_j \delta_j u_j e_j s) = s m_{pj} \left[ Q_{pj} + \frac{(u - u_{pj})^2}{2} \right] + sq_j, \quad j = 1, \dots, J. \quad (10)$$

Если среди частиц имеются принадлежащие к типу негорящих частиц, для которых нужно рассчитывать теплообмен с газовой фазой, то, суммируя (9) с (10) для этих частиц, можно получить уравнение энергии смеси газа с частицами типа негорящих частиц:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho es + \sum_{Tun2} \beta_j \delta_j e_j s \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho ues + \sum_{Tun2} \beta_j \delta_j u_j e_j s \right) = \\ & = -p \left[ \frac{\partial}{\partial x}(\alpha us) + \sum_{Tun2} \frac{\partial}{\partial x}(\beta_j u_j s) \right] + s \sum_{j=1}^J f_j (u - u_j) - 2\pi R u \sigma_w^{n\tau} + \\ & + s \left\{ \sum_{Tun1} m_{gj} \left[ Q_{gj} + \frac{(u - u_{gj})^2}{2} \right] + \sum_{Tun2} m_{pj} \left[ Q_{pj} + \frac{(u - u_{pj})^2}{2} \right] \right\} - s Q_r. \quad (11) \end{aligned}$$

Уравнение энергии в форме (11) можно использовать для мелких частиц в предположении, что время термической релаксации смеси мало. В этом случае рассматриваемая модель вырождается в односкоростную и однотемпературную для газа и конденсированных негорящих частиц.

Применим математическую модель (1) – (11) для учета наличия в продуктах сгорания конденсированной фазы, тем более, что она рассматривает внутриканальную среду как гомогенную смесь несущей газовой фазы и частиц произвольного происхождения.

Для этого построим МЧ, которому отвечают индексы частиц номер  $k$  и  $q = k+1$ . Индекс  $j = k$  соответствует элементу метательного заряда, при горении которого образуются газообразные продукты сгорания (индекс  $j = k$ ) и сажа (индекс  $j = q$ ).

Зависимости для расчета  $m_{pk}$ ,  $m_{gk}$ ,  $u_{pj}$ ,  $u_{gk}$ ,  $Q_{pk}$  и  $Q_{gk}$  определяются в следующем виде:

$$\begin{aligned} u_{pk} &= u_k, \quad u_{gk} = u_k, \quad m_{pk} = m_{pj}, \quad m_{gk} = -m_{pj} (1 - c_{sg}), \\ Q_{pk} &= 0, \quad Q_{gk} = \frac{F_k}{\gamma_k - 1} (1 - c_{sg}) T_{sm}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $c_{sg}$  – массовое содержание сажи в продуктах сгорания элемента МЗ;  $F_k$  – сила пороха;  $m_{pj}$  определяется по (8).

Аналогично  $m_{pq}$ ,  $m_{gq}$ ,  $u_{pq}$ ,  $u_{gq}$ ,  $Q_{pq}$  и  $Q_{gq}$  определяются следующим образом:

$$u_{pq} = u_k, \quad u_{gq} = 0, \quad m_{pq} = m_{pj} c_{sg}, \quad m_{gq} = 0, \quad Q_{pq} = c_v (T_{sm} - T_0) c_{sg}, \quad Q_{gq} = 0, \quad (13)$$

где  $c_v$  – удельная теплоемкость материала сажи;  $T_0$  – начальная температура порохового заряда. Здесь в выражениях для  $Q_{gk}$  и  $Q_{pq}$  учитывается факт однотемпературности продуктов сгорания пороха и поступающих в смесь конденсированных негорящих частиц, а само значение температуры  $T_{sm}$  дается формулой

$$T_{sm} = \frac{[F_k(1 - c_{sg}) + (\gamma_k - 1)c_{sg}c_vT_0]}{(\gamma_k - 1)\left[(1 - c_{sg})\frac{R}{M_k} + c_{sg}c_v\right]} \quad (14)$$

### Параметрические теоретические исследования

С использованием представленной математической модели, позволяющей учитывать влияние в продуктах сгорания сажи, проведено теоретическое параметрическое исследование, направленное на получение газодинамической картины в заснарядном пространстве в выстреле из баллистической установки. Исследования проводились для метательной установки калибром 30 мм, масса снаряда составляла 50 г. Заряд массой 100 г состоял из одного элемента со следующими параметрами:

$$\delta_k = 1.65 \text{ г/см}^3, M_k = 24.61 \text{ г/моль}, \gamma_k = 1.2031, b_k = 1.009 \text{ см}^3/\text{г}.$$

Материал сажи ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) имел следующие параметры [7]:

$$\delta_q = 3.97 \text{ г/см}^3, c_{vq} = 7.85 \text{ см}^2/(\text{К}\cdot\text{мс}^2).$$

Значение  $c_{sg}$  варьировалось в пределах от 0 до 0.5.

На рис. 2 – 4 приведены характерные распределения параметров по длине ствола в различные моменты времени. Рис. 2 иллюстрирует распределения давления по длине ствола в различные моменты времени для  $c_{sg} = 0.1$  (a) и 0.5 (b), рис. 3 и 4 соответствуют пороху, для которого  $c_{sg} = 0.1$  и  $c_{sg} = 0.5$ .

По рис. 2 – 4 можно отследить динамику уменьшения содержания частиц пороха и увеличения количества сажи в продуктах сгорания. Скорость частиц сажи практически равна скорости газа из-за малых размеров частиц и вследствие этого эффективности их ускорения за счет аэродинамической силы. Вместе с тем имеется эффект отставания частиц сажи от газа.

В таблице приведены зависимости от  $c_{sg}$  баллистических характеристик выстрела (дульной скорости снаряда  $V$  и максимального давления в зарядной камере  $P_{\max}$ ), для частиц сажи диаметром  $d_p = 0.001$  см.

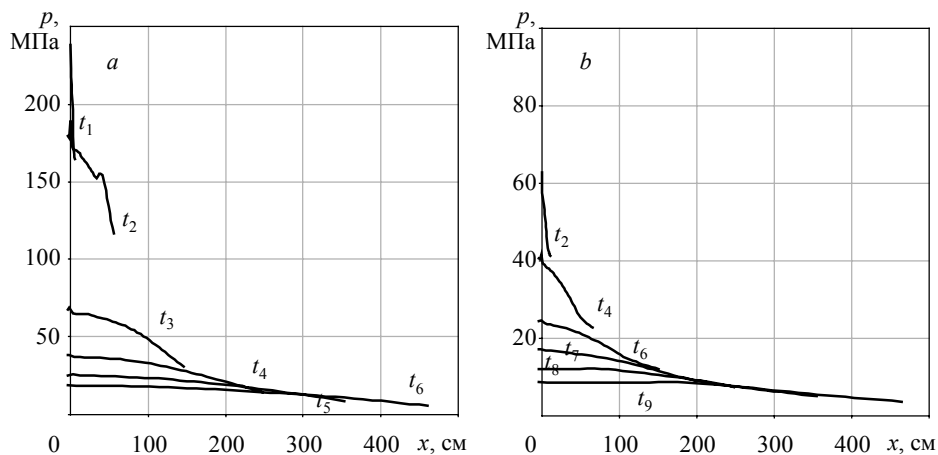
### Основные баллистические параметры выстрела

$c_{sg}$	$V$ , м/с	$P_{\max}$ , МПа	Кинетическая энергия снаряда, $10^6 \text{ г}\cdot\text{см}^2/\text{мс}^3$	Внутренняя энергия сажи, $10^6 \text{ г}\cdot\text{см}^2/\text{мс}^3$	Кинетическая энергия сажи, $10^6 \text{ г}\cdot\text{см}^2/\text{мс}^3$
0.1	2192	390.1	1.2	0.17	0.04
0.2	1929	248.0	0.93	0.23	0.066
0.3	1672	160.8	0.69	0.34	0.075
0.4	1400	105.1	0.49	0.45	0.076
0.5	1131	69.1	0.32	0.54	0.065

Из рис. 2 и таблицы следует, что при увеличении массового содержания сажи давление в продуктах сгорания и скорость снаряда существенно уменьшаются.

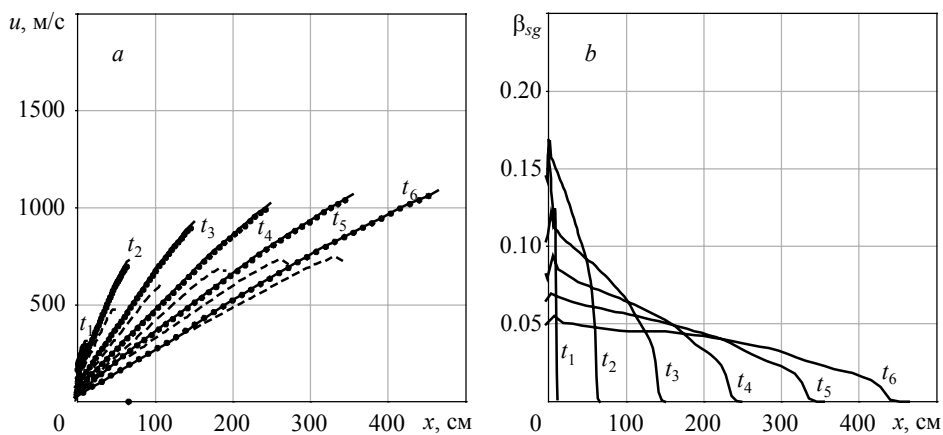
Например, при увеличении массовой доли к-фазы от 0 до 0.5 (снижении энергетиче- ки заряда до 50 %) максимальное давление снижается почти в 7 раз, а дульная скорость до 51.6 % в сравнении с выстрелом без образования сажи.

Рис. 3 и 4 иллюстрируют существенное уменьшение количества сгоревшего пороха при увеличении массового содержания сажи за счет более низкого уровня давления.



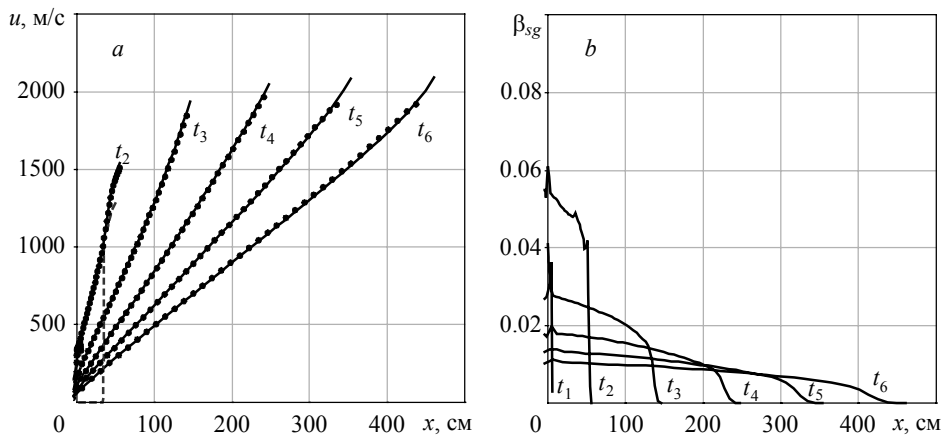
**Рис. 2.** Распределения давления по длине ствола в различные моменты времени для  $c_{sg} = 0.1$  (a) и  $c_{sg} = 0.5$  (b):  $t_1 - 0.5$  мс;  $t_2 - 1$  мс;  $t_3 - 1.5$  мс;  $t_4 - 2$  мс;  $t_5 - 2.5$  мс;  $t_6 - 3$  мс;  $t_7 - 4$  мс;  $t_8 - 5$  мс;  $t_9 - 6$  мс

**Fig. 2.** Pressure distributions along the barrel at different time points for  $c_{sg} = (a) 0.1$  and (b) 0.5:  $t_1 - 0.5$  ms;  $t_2 - 1$  ms;  $t_3 - 1.5$  ms;  $t_4 - 2$  ms;  $t_5 - 2.5$  ms;  $t_6 - 3$  ms;  $t_7 - 4$  ms;  $t_8 - 5$  ms; and  $t_9 - 6$  ms



**Рис. 3.** Распределения параметров по длине ствола в различные моменты времени для  $c_{sg} = 0.1$ : — — скорость газа; - - - - скорость частиц пороха; ••• — скорость сажи (a); объемное содержание сажи (b)  $t_1 - 0.5$  мс;  $t_2 - 1$  мс;  $t_3 - 1.5$  мс;  $t_4 - 2$  мс;  $t_5 - 2.5$  мс;  $t_6 - 3$  мс

**Fig. 3.** Distributions of parameters along the barrel at different time points for  $c_{sg} = 0.1$ : (a) — — gas velocity; - - - - velocity of powder particles; ••• — soot velocity; (b) soot volume  $t_1 - 0.5$  ms;  $t_2 - 1$  ms;  $t_3 - 1.5$  ms;  $t_4 - 2$  ms;  $t_5 - 2.5$  ms; and  $t_6 - 3$  ms



**Рис. 4.** Распределения параметров по длине ствола в различные моменты времени для  $c_{sg} = 0.5$ : — — — скорость газа; - - - - скорость частиц пороха; ••• — скорость сажи (a); объемное содержание сажи (b)  $t_1 - 1$  мс;  $t_2 - 2$  мс;  $t_3 - 3$  мс;  $t_4 - 4$  мс;  $t_5 - 5$  мс;  $t_6 - 6$  мс

**Fig. 4.** Distributions of parameters along the barrel at different time points for  $c_{sg} = 0.5$ : (a) — — — gas velocity; - - - - velocity of powder particles; ••• — soot velocity; (b) soot volume  $t_1 - 1$  ms;  $t_2 - 2$  ms;  $t_3 - 3$  ms;  $t_4 - 4$  ms;  $t_5 - 5$  ms; and  $t_6 - 6$  ms

Падение баллистических характеристик выстрела происходит за счет уменьшения общей энергетики заряда, а также отдачи части энергии пороховых газов на нагрев частиц сажи и разгон конденсированных частиц по каналу ствола баллистической установки. Большая часть энергии пороховых газов тратится на нагрев частиц сажи, меньшая – на ускорение сажи

### Заключение

Разработана математическая модель, позволяющая учитывать влияние конденсированной фазы в продуктах сгорания на внутрибаллистические процессы при расчете выстрела в пороховой метательной установке.

С использованием представленной математической модели проведено теоретическое параметрическое исследование, направленное на изучение влияния массового содержания конденсированных частиц на основные баллистические характеристики выстрела.

Получено, что при наличии в газопороховой смеси сажи из  $Al_2O_3$  с массовым содержанием 0.50 приводит к снижению максимального давления в 7 раз, а дульная скорость метаемого элемента в 2 раза по сравнению с выстрелом без образования сажи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Е Зо Тве, Денисюк А.П., Сизов В.А.* Влияние сажи на скорость и параметры волны горения высококалорийного пороха // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 8. С. 100–105.
2. *Денисюк А.П., Демидова Л.А., Сизов В.А., Меркушкин А.О.* Влияние углеродных нанотрубок на закономерности горения низкокалорийного пороха // Горение и взрыв. 2017. Т. 10. № 1. С. 59–63.



3. Шведова А.В., Крутилин А.В., Сизов В.А., Денисюк А.П. Влияние углеродных материалов на закономерности горения баллистических порохов // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. 31. № 13. С. 87–89.
4. Порязов В.А., Крайнов А.Ю., Крайнов Д.А. Математическое моделирование горения пороха Н с добавлением порошка алюминия // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 1. С. 93–101.
5. Ищенко А.Н., Касимов В.З. Математическая модель и программный комплекс для теоретического исследования внутрибаллистических процессов в ствольных системах: учеб. пособие. Томск: Изд. Дом Томского государственного университета, 2015. 70 с.
6. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М.: Оборонгиз, 1962. 703 с.
7. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. (ред.) Физические величины. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с

Статья поступила 09.10.2020

Burakov V.A., D'yachkovskiy A.S., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z., Rogaev K.S., Samorokova N.M. (2021) ALLOWANCE FOR THE EFFECT OF CONDENSED PARTICLES ON BALLISTIC PARAMETERS OF A SHOT. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 73. pp. 50–59

DOI 10.17223/19988621/73/5

Keywords: internal ballistics, barrel systems, gas dynamics, powder charge combustion, condensed particles.

A mathematical model of the shot fired from a powder propellant setup is developed. An arbitrary number of powder particles of various types are supposed to be in a propellant charge, which are different in size, shape, energy characteristics, and layer-by-layer burning velocity. The products of their combustion represent a mixture of non-viscous non-heat conductive gases with known equations of state. These gases are generated during combustion of the powder particle of a corresponding type. Some condensed particles may occur in the mixture of combustion products during the burning of powder particles. The motion of the polydispersed mixture of combustion products along a varying-cross-section channel is described by the laws of conservation of mass, momentum, and energy. When formulating these laws, the mass, momentum, and energy exchange between gas and condensed phases is taken into account. The formulation is universal and allows one to use the laws for modelling a wide range of internal ballistic phenomena.

In this paper, a theoretical parametric research is shown as an example, which is aimed at estimating the effect of quantity of the occurring condensed particles on basic ballistic characteristics of a shot.

**Financial support.** The paper uses the results obtained while working on the project No. 8.2.09.2018 within the Tomsk State University Competitiveness Improvement Program.

*Valeriy A. BURAKOV* (Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: rogaev@ftf.tsu.ru

*Aleksey S. D'YACHKOVSKIY* (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: lex\_okha@mail.ru

*Aleksandr N. ISHCENKO* (Doctor of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

*Vladimir Z. KASIMOV* (Doctor of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ksm@niipmm.tsu.ru

Konstantin S. ROGAEV (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: rogaev@ff.tsu.ru

Nina M. SAMOROKOVA (Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: lex\_okha@mail.ru.

#### REFERENCES

1. E Zo Tve, Denisjuk A.P., Sizov V.A. (2013) Vliyanie sazhi na skorost' i parametry volny gorenija vysokokaloriynogo porokha [Effect of soot on the speed and parameters of the combustion wave of a high-calorie powder]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta – Bulletin of the Technological University*. 16(8). pp. 100–105.
2. Denisjuk A.P., Demidova L.A., Sizov V.A., Merkushev A.O. (2017) Vliyanie uglerodnykh nanotrubok na zakonomernosti gorenija nizkokaloriynogo porokha [Influence of carbon nanotubes on the combustion laws of low-calorie propellant]. *Gorenie i vzryv – Combustion and Explosion*. 10(1). pp. 59–63.
3. Shvedova A.V., Krutinin A.V., Sizov V.A., Denisjuk A.P. (2017) Vliyanie uglerodnykh materialov na zakonomernosti gorenija ballistitnykh porokhov [Influence of the carbon materials on the combustion properties of the propellants]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii – Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 31(13). pp. 87–89.
4. Poryazov V.A., Krainov A.Yu., Krainov D.A. (2015) Simulating the combustion of N powder with added finely divided aluminum. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 88(1). pp. 93–101. DOI: 10.1007/s10891-015-1171-0.
5. Ishchenko A.N., Kasimov V.Z. (2015) *Matematicheskaya model' i programmnyy kompleks dlya teoreticheskogo issledovaniya vntriballisticheskikh protsessov v stvol'nykh sistemakh* [A mathematical model and a software package for the theoretical study of intraballistic processes in barrel systems]. Tomsk: Tomsk State University Publishing House.
6. Serebryakov M.E. (1962) *Vnutrennyaya ballistika stvol'nykh sistem i porokhovykh raket* [Internal ballistics of barrel systems and powder rockets]. Moscow: Oborongiz.
7. Grigor'ev I.S., Meylikhov E.Z. (1991) *Fizicheskie velichiny* [Physical quantities]. Moscow: Energoatomizdat.

Received: October 9, 2020