

УДК 531.57

DOI 10.17223/19988621/67/9

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПАСТООБРАЗНОГО ТОПЛИВА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ ЗАРЯЖАНИЯ¹

Работа посвящена исследованию горения и диспергирования модельного пастообразного топлива в условиях модельной баллистической установки при использовании различных компоновок выстрела. Рассмотрено два варианта закона диспергирования с учетом давления на фронте горения топлива и с учетом ускорения метаемой сборки в стволе. Рассмотрена газодинамическая картина выстрела с использованием пастообразного топлива в качестве присоединенного заряда. Проведенное комплексное экспериментально-теоретическое исследование позволило получить универсальный закон диспергирования для модельного пастообразного топлива в условиях модельной баллистической установки.

Ключевые слова: *внутренняя баллистика, ствольные системы, газодинамика, присоединенный заряд, горение, диспергирование пастообразных топлив.*

Применение новых топлив в качестве присоединенного заряда (ПЗ), является одним из способов повышения дульной скорости метаемой сборки (МС). Использование ПЗ позволяет повысить скорость снаряда на дульном срезе без повышения максимального давления на дно канала ствола. Повышение дульной скорости при использовании перспективных топлив в режиме ПЗ возможно за счет следующих факторов: повышения средней плотности заряжания; перераспределения энергии продуктов горения в заснарядном пространстве в процессе выстрела; использования реактивного подгона снаряда в стволе. Более подробно данные преимущества представлены в работах авторов [1–5]. Для повышения скорости метания наряду с пастообразными топливами в качестве ПЗ могут выступать и высокоплотные заряды конвективного горения [6–8], а также другие нетрадиционные схемы выстрела [9–15].

Для безопасного применения топлив в перспективных и имеющихся ствольных артиллерийских системах необходимо знать законы диспергирования и горения данных топлив, позволяющие с хорошей точностью описывать процесс выстрела. Принято считать, что диспергирование ПЗ в основном зависит от давления на фронте горения, поэтому для скорости диспергирования обычно используется степенной закон. Данный закон позволяет с высокой точностью прогнозировать работу рассматриваемых топлив в режиме ПЗ при использовании порохового заряда, располагаемого в камере заряжания. Исследование диспергирования и горения топлив в режиме ПЗ проводилось при использовании метаемой сборки фиксированной массы в условиях модельной баллистической установки.

¹ В настоящей работе использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 8.2.09.2018 Программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского государственного университета.

В [16] показана возможность использования в качестве слагаемого в законе диспергирования зависимости от ускорения связки МС+ПЗ. Данное допущение позволяет прогнозировать поведение пастообразного топлива не только при использовании различных масс метаемых сборок, но и при использовании различных типов зеренных порохов.

В данной работе проведено экспериментально-теоретическое исследование горения ПЗ из модельного пастообразного топлива, направленное на получение закона его диспергирования с учетом ускорения метаемой сборки при использовании различных компоновок выстрела.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на баллистической установке калибром 30 мм. Данная баллистическая установка входит в состав баллистического стенда [17], позволяющего регистрировать основные баллистические характеристики (зависимость давления в камере заряжания от времени, скорость метаемой сборки в стволе и дульную скорость метаемой сборки). Внешний вид установки представлен на рис. 1.

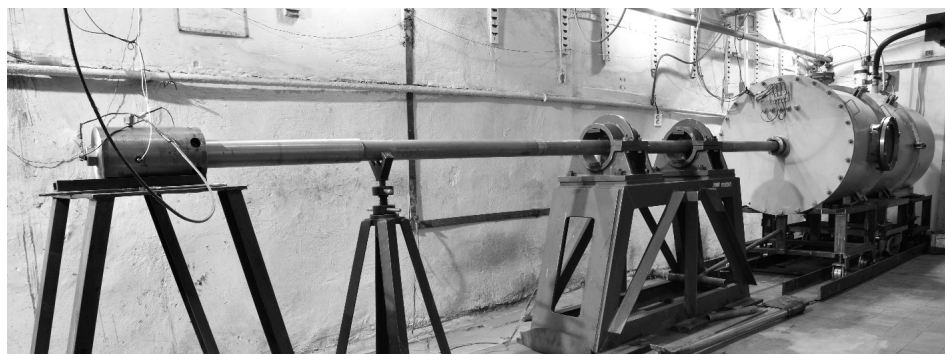


Рис. 1. Внешний вид модельной баллистической установки

Fig. 1. Design of a model ballistic installation

При проведении экспериментов на измерительно-регистрирующем комплексе [18] записываются следующие параметры: 1) давление в камере заряжания $P_{\text{кн}}(t)$ с использованием пьезокварцевых датчиков 2Т6000 и комплекта аппаратуры «Нейва-10000» со специальным программным обеспечением для измерения давления в баллистических установках в диапазоне от 0 до 600 МПа; 2) скорость МС $V_{\text{сн}}(t)$ – измерителем скорости снаряда «ДДС-6000» на основе СВЧ-радара [19]; 3) скорость МС на дульном срезе V – индукционным датчиком дульной скорости метаемых тел в диапазоне от 100 м/с до 3000 м/с [20].

В качестве метаемой сборки в экспериментах использовался снаряд-поршень массой $q = 100, 200$ и 400 г (рис. 2, *a–c*). Метаемая сборка состоит из пластиковой оболочки, изготовленной методом послойного наплавления SBS-пластика, стального сердечника, запрессованного в оболочку и толкающего текстолитового поддона (рис. 2, *d*).

В качестве основного зерненого порохового заряда использовались два вида одноканального с разной толщиной горящего свода (Ирбис Охота 35 и Сунар 30-06) и один вид семиканального пороха (6/7). В качестве ПЗ использовалось модельное

пастообразное топливо, располагаемое в пластиковом контейнере, изготовленном посредством наплавления SBS-пластика. Данный контейнер необходим для предотвращения горения ПЗ по боковой поверхности. Присоединенный заряд располагался в стволе непосредственно за МС.

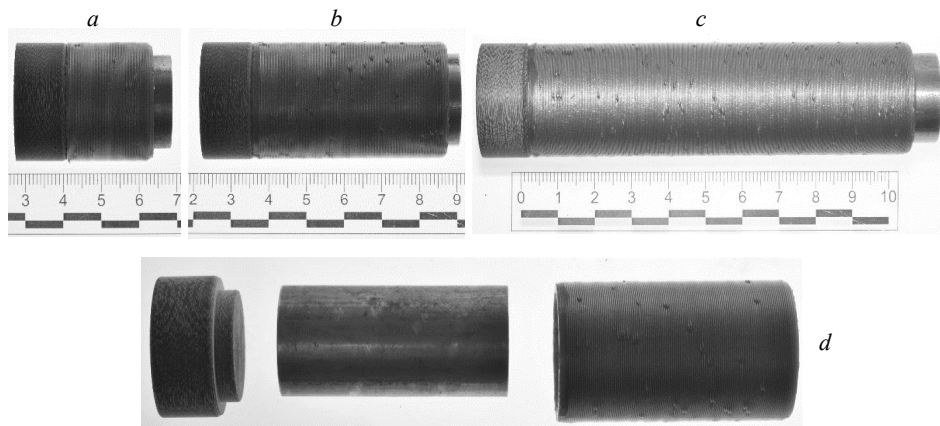


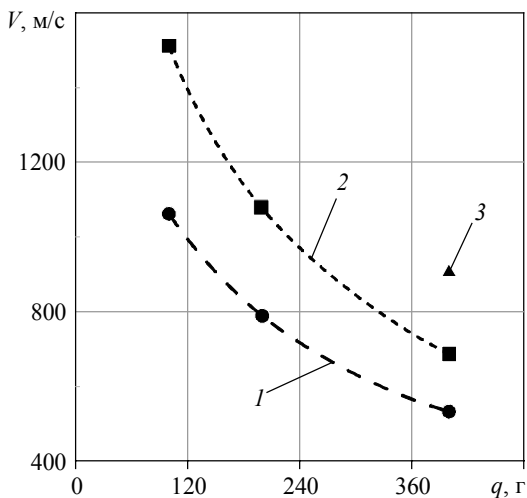
Рис. 2. Внешний вид метаемых сборок массой q , г:
 a – 100, b – 200, c – 400; d – основные компоненты метаемой сборки

Fig. 2. Configuration of projectile assemblies with mass q :
 (a) 100, (b) 200, and (c) 400 g; (d) main components of a projectile assembly

В серии экспериментов определялись основные баллистические характеристики выстрелов из модельной баллистической установки с использованием трех видов зерновых порохов и трех масс метаемых сборок. Результаты проведенной серии экспериментов представлены на рис. 3. Масса основного порохового заряда подбиралась таким образом, чтобы в камере заряжания реализовывалось максимальное давление 230–250 МПа. Видно, что при ограничении максимального давления и массе снаряда 400 г высшую скорость показывает семиканальный пороховой заряд с наибольшей толщиной горящего свода.

Рис. 3. Зависимость дульной скорости от массы метаемой сборки: 1 – выстрелы с использованием пороха марки Ирбис Охота 35; 2 – выстрелы с использованием пороха марки Сунар 30-06; 3 – выстрел с использованием пороха типа 6/7

Fig. 3. Muzzle velocity as a function of the projectile assembly mass: 1 – shots with the use of the Irbis Okhota 35 gunpowder; 2 – shots with the use of the Sunar 30-06 gunpowder; and 3 – a shot with the use of the 6/7-type gunpowder



Модель диспергирования и горения топлива

Для исследования газодинамической картины течения продуктов сгорания в заснарядном пространстве использовался программный комплекс, разработанный сотрудниками НИИ ПММ ТГУ, позволяющий проводить теоретические расчеты выстрелов с использованием классической схемы заряжания и схемы заряжания с ПЗ [21]. Программный комплекс реализован на базе математической модели, основанной на общепринятых допущениях механики многофазных сред. В математической модели принято допущение, что фронт диспергирования ПЗ считается поверхностью сильного разрыва. Соответствующими условиями динамической совместности связаны параметры справа и слева от фронта. Топливо на фронте диспергирования частично превращается в газ, а частично распадается на совокупность частиц, вбрасываемых через фронт в заснарядное пространство. Данные частицы горят в заснарядном пространстве в послонном режиме. Степень выгорания топлива во фронте диспергирования характеризовалась параметром $\psi_0 = \psi / \psi_n$ [21], который при проведении расчетов принимался равным $\psi_0 = 0.1$.

Рассмотрено два закона диспергирования ПЗ. В математической модели считалось, что ПЗ начинает гореть позже порохового заряда. В качестве характеристики начала диспергирования ПЗ используется импульс давления на фронте горения $I = \int P dt$ (импульс начала горения присоединенного заряда). В первом случае закон диспергирования присоединенного заряда представляет собой степенную зависимость от давления:

$$\begin{aligned} U_s &= 0, \text{ при } I < I_1, \\ U_s &= B_s \left(\frac{P}{P_{\text{атм}}} \right)^v, \text{ при } I \geq I_1. \end{aligned} \quad (1)$$

где I_1 – импульс начала диспергирования ПЗ; B_s – коэффициент в законе скорости диспергирования; P – давление в газе на фронте диспергирования; $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, v – показатель степени, для исследуемого топлива данный параметр принимался равным 0.8.

Послойное горение диспергированных частиц топлива в математической модели также определялось общепринятой зависимостью от давления [21, 22]:

$$U_c = U_1 \left(\frac{P}{P_{\text{атм}}} \right)^v, \quad (2)$$

где U_1 – коэффициент, зависящий от химической природы топлива; v – показатель степени для исследуемого топлива.

Во втором случае рассматривался вариант, при котором скорость диспергирования в большей степени зависит от ускорения dV_{CH}/dt (или от градиента давления в ПЗ dP_s/dl):

$$\frac{dV_{\text{CH}}}{dt} = \frac{(P_{s1} - P_{s2})S}{m} = \frac{P_{s1} - P_{s2}}{l_{\text{ПЗ}}} \frac{1}{\rho} = \frac{dP_s}{dl} \frac{1}{\rho},$$

где V_{CH} – скорость метаемой сборки (скорость ПЗ); P_{s1} , P_{s2} – давления на левой и правой границе ПЗ; $l_{\text{ПЗ}}$ – длина ПЗ; S – площадь поперечного сечения ПЗ; m – масса ПЗ; ρ – плотность ПЗ.

Закон диспергирования с учетом ускорения связки МС+ПЗ записывался в виде

$$U_s = 0, \text{ при } I < I_1, \\ U_s = A_s \left(\frac{\left(\frac{dV_{\text{CH}}}{dt} \right)}{g} \right)^\mu, \text{ при } I \geq I_1. \quad (3)$$

где μ – показатель степени, для исследуемого топлива данный параметр принимался равным 1; A_s – коэффициент в законе скорости диспергирования.

Закон послойного горения диспергированных частиц топлива определялся также по формуле (2).

Результаты экспериментально-теоретического анализа

Проведя газодинамический анализ расчетно-экспериментальных данных с использованием двух законов диспергирования, получены их параметры для модельного пастообразного топлива, применяемого в режиме ПЗ. Для проведенной серии экспериментов основные коэффициенты для закона диспергирования (1), полученные как параметры согласования расчетных и опытных данных при решении прямой задачи, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры законов диспергирования и послойного горения
модельного пастообразного топлива

№	P_{max} , МПа	V , м/с	I , МПа·с	B_s , м/с	$x_{\text{кд}}$, см	U_1 , мм/с	$m_{\text{оч}}$, г
Ирбис Охота 35							
1	226	1062	110	0.022	193	0.065	24
2	224	789	110	0.022	86	0.028	30
3	227	533	170	0.022	77	0.026	39
Сунар 30-06							
4	260	1511	110	0.022	80	0.055	10
5	232	1079	160	0.022	79	0.050	7
6	224	687	220	0.022	72	0.020	21
6/7							
7	242	911	330	0.022	90	0.010	24

На рис. 4 представлено сравнение расчетных и полученных в эксперименте временных зависимостей давления в камере заряжания и скорости метаемой сборки массой 400 г при использовании закона диспергирования (1). Рассогласование расчетных и экспериментальных данных по основным баллистическим характеристикам: максимальному давлению на дно канала ствола и дульной скорости снаряда не превышает 3 и 1 % соответственно. Представленные результаты свидетельствуют о получении правдоподобной картины распределения газодинамических параметров в выстреле с использованием в качестве ПЗ модельного пастообразного топлива.

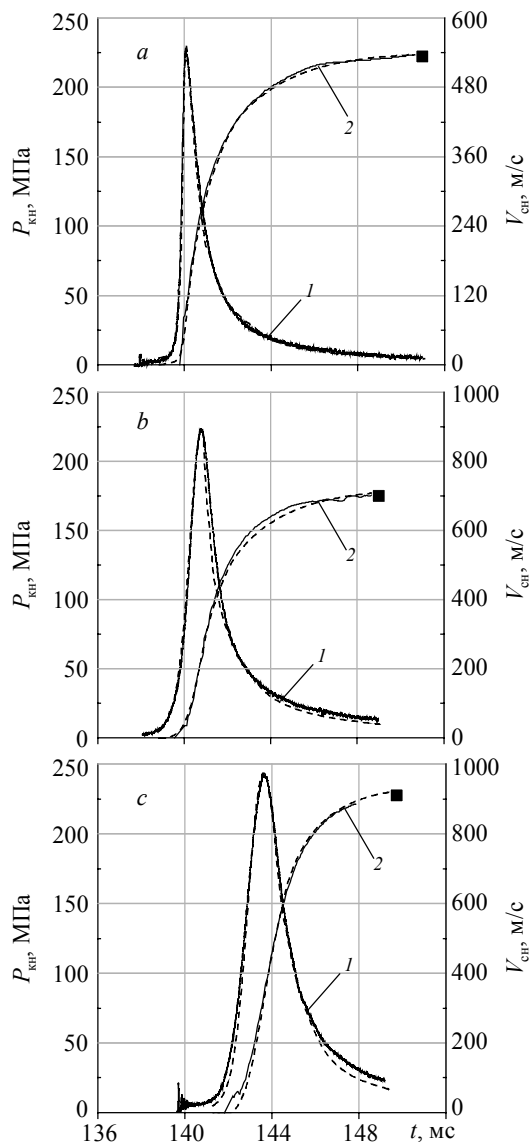


Рис. 4. Временные зависимости давления в камере заряжания и скорости метаемой сборки массой 400 г при использовании закона диспергирования (1): *a* – порох марки Ирбис Охота 35; *b* – порох марки Сунар 30-06; *c* – порох типа 6/7; 1 – давление в камере заряжания; 2 – скорость метаемой сборки в стволе; ■ – дульная скорость МС; — эксперимент; --- расчет

Fig. 4. Time dependences of the pressure in the loading chamber and the speed of the projectile assembly with the mass of 400 g when using the law of dispersion (1): (*a*) the Irbis Okhota 35 gunpowder, (*b*) the Sunar 30-06 gunpowder, and (*c*) the 6/7-type gunpowder; 1, pressure in the loading chamber; 2, speed of the projectile assembly in the barrel; ■ – muzzle velocity of MS; — experiment; --- calculation

Как видно из табл. 1 увеличение массы снаряда ведет к увеличению импульса задержки, так как коэффициент B_s в законе диспергирования сохранялся неизменным, в качестве основного параметра согласования использовалась послойная скорость горения частиц. Понижение скорости послойного горения частиц и увеличение импульса зажигания связано с тем, что ПЗ возможно имеет большую зависимость от давления при увеличении массы метаемой сборки.

Наименьшая масса несгоревших частиц получена при использовании метаемой сборки массой 100 г совместно с пороховым зарядом марки Сунар 30-06. Стоит отметить, что при использовании семиканального порохового заряда наблюдается увеличение ширины кривой давления, однако, несмотря на это в расчетах получено увеличение недогоревшей части ПЗ. Большая величина импульса задержки I говорит о том, что ПЗ начинал диспергировать позже и практически половина его, в виде недогоревших частиц, была выброшена вслед за снарядом из ствола.

В случае использования в расчете закона диспергирования (3) также получено хорошее совпадение по основным баллистическим характеристикам. Результат сравнения расчетно-экспериментальных данных при использовании закона диспергирования с учетом ускорения представлена на рис. 5. Рассогласование теоретических результатов с результатами, полученными в ходе экспериментальной серии, составляет не более 2 % по давлению и не более 1 % по дульной скорости. Параметры закона диспергирования и закона послойного горения частиц представлены в табл. 2. При использовании закона диспергирования (3), коэффициенты скорости диспергирования ПЗ и послойного горения частиц остаются неизменными, что уменьшает количество изменяемых параметров согласования. Это позволяет сделать вывод об возможности применения данного закона горения для случаев изменения массы метаемой сборки и типа основного зернового порохового заряда в условиях модельной баллистической установки.

Таблица 2

Параметры законов горения модельного пастообразного топлива

№	P_{\max} , МПа	V , м/с	I , МПа·с	A_s , см/с	$x_{\text{зд}}$, см	U_1 , мм/с	$m_{\text{оч}}/m_{\text{ом}}$, г
Ирбис Охота 35							
1	226	1062	93	0.001	116	0.050	24/0
2	224	789	100	0.001	343	0.050	19/0
3	227	533	130	0.001	—	0.050	10/17
Сунар 30-06							
4	260	1511	120	0.001	66	0.050	13/0
5	232	1079	135	0.001	118	0.050	9/0
6	224	687	180	0.001	—	0.050	11/8
6/7							
7	242	911	300	0.001	—	0.050	13/2

В результате получено, что для всей серии опытов при коэффициенте скорости диспергирования ПЗ $A_s = 0.001$ м/с и послойного горения частиц $u_c = 0.05$ мм/с закон диспергирования имеет универсальный характер и может быть использован для дальнейших расчетов в условиях модельной баллистической установки.

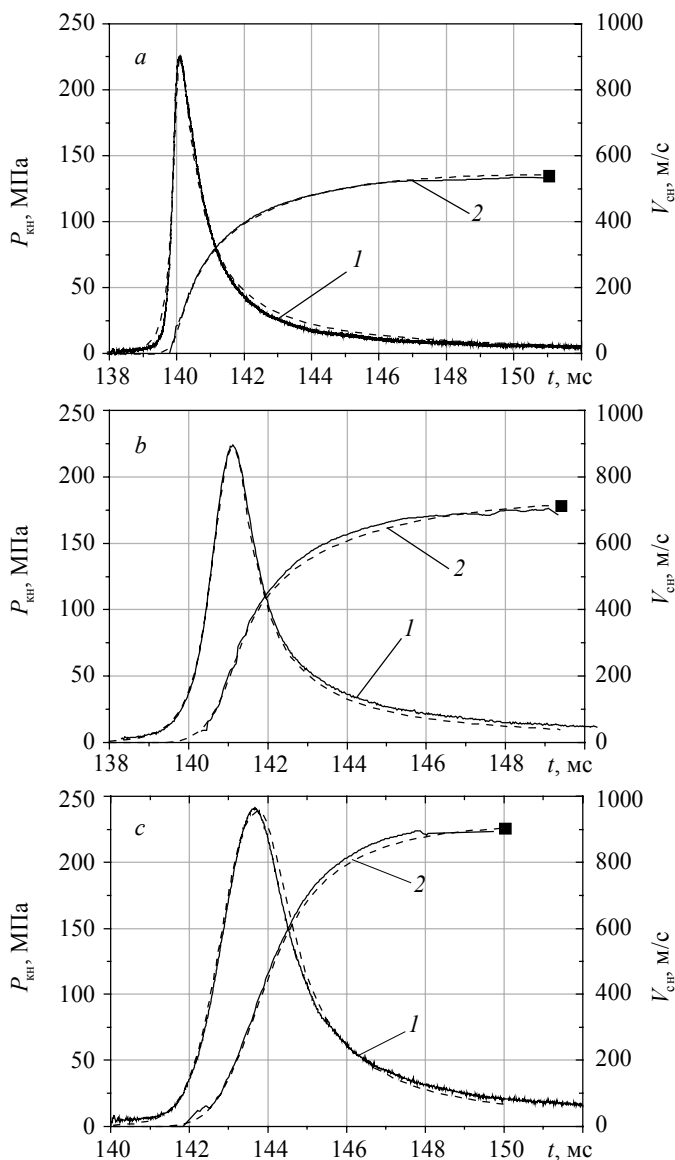


Рис. 5. Временные зависимости давления в камере заряжания и скорости метаемой сборки массой 400 г при использовании закона диспергирования (3): *a* – порох марки Ирбис Охота 35; *б* – порох марки Сунар 30-06; *в* – порох типа 6/7; 1 – давление в камере заряжания; 2 – скорость метаемой сборки в стволе; ■ – дульная скорость МС; — эксперимент; --- расчет

Fig. 5. Time dependences of the pressure in the loading chamber and the speed of the projectile assembly with the mass of 400 g when using the law of dispersion (3): (*a*) the Irbis Okhota 35 gunpowder, (*b*) the Sunar 30-06 gunpowder, and (*c*) the 6/7-type gunpowder; 1, pressure in the loading chamber; 2, speed of the projectile assembly in the barrel; ■ – muzzle velocity of MS; — experiment; --- calculation

Из сравнения теоретических результатов с применением законов диспергирования (1) и (3) следует, что они дают близкие результаты по количеству несгоревшей части ПЗ и основным баллистическим характеристикам (временным зависимостям давления в камере заряжания, скорости метаемой сборки в стволе и дульной скорости), но более универсальным является закон диспергирования с учетом ускорения связки ПЗ + МС.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о пригодности использования закона диспергирования (1) при неизменной массе снаряда и типа порохового заряда. Использование закона диспергирования (3) возможно использовать при переходе к другой массе метомой сборки или при смене типа пороха в рассматриваемом диапазоне давлений. Такой закон горения модельного топлива в качестве ПЗ может быть использован для дальнейшего прогнозных расчетов и параметрических исследований в условиях модельной баллистической установки.

Заключение

Проведенные комплексные расчетно-экспериментальные исследования, направленные на получение законов диспергирования, позволили детально изучить процессы происходящие с ПЗ, состоящим из модельного пастообразного топлива при различных компоновках выстрела.

С использованием математической модели получены картины изменения газодинамических параметров в заснарядном пространстве при использовании топлив в качестве присоединенного заряда.

Получен закон диспергирования с учетом ускорения метаемой сборки и присоединенного заряда, позволяющий с высокой точность описывать процессы в заснарядном пространстве для различных масс метаемых сборок и типов зернового порохового заряда в условиях модельной баллистической установки в рассматриваемом диапазоне давлений.

Список обозначений

ρ – плотность ПЗ [г/см³]; ν – показатель степени [БР]; υ – показатель степени [БР]; μ – показатель степени [БР]; I_1 – импульс давления на фронте горения [МПа·с]; $l_{ПЗ}$ – длина ПЗ [м]; m – масса ПЗ [г]; $m_{ом}$ – масса оставшегося моноблока топлива в виде ПЗ не сгоревшего за время выстрела [г]; $m_{оч}$ – суммарная масса оставшихся частиц топлива не сгоревших за время выстрела [г]; P – давление в газе на фронте диспергирования [МПа]; P_{max} – максимальное давление в камере заряжания [МПа]; P_{s1} , P_{s2} – давление на левой и правой границе ПЗ [МПа]; $P_{атм}$ – атмосферное давление [МПа]; $P_{кн}(t)$ – давление в камере заряжания [МПа]; q – масса метаемой сборки снаряда – поршня [г]; S – площадь поперечного сечения ПЗ [м²]; U_1 – коэффициент, зависящий от химической природы топлива [мм/с]; U_c – скорость послынного горения диспергированных частиц топлива, зависящая от давления [мм/с]; U_s – скорость диспергирования [м/с]; $U_{сг}$ – скорость послынного горения диспергированных частиц топлива, зависящая от ускорения [мм/с]; V – дульная скорость снаряда [м/с]; $V_{сн}(t)$ – скорость снаряда в стволе [м/с]; $x_{кд}$ – координата снаряда при окончании диспергирования ПЗ [см]; ψ_0 – степень превращения (отношение сгоревшей массы элемента к его начальной массе) [БР]; A_s – коэффициент в законе скорости диспергирования [мм/с]; B_s – коэффициент в законе скорости диспергирования [м/с]; g – ускорение свободного падения на поверхности Земли [м/с²].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ищенко А.Н., Касимов В.З. Математическая модель и программный комплекс для теоретического исследования внутрибаллистических процессов в ствольных системах: учебное пособие. Томск: Изд. дом Том. гос. ун-та, 2015. 70 с.
2. Ищенко А.Н., Дьячковский А.С., Зыкова А.И., Саморокова Н.М. Исследование температурного градиента выстрела с присоединенным зарядом из пастообразных топлив // Высокоэнергетические и специальные материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение: сборник тезисов XIV Международной конференции «НЕМs-2018», 3–5 сентября 2018 года, г. Томск, Россия. Томск: Изд. дом Том. гос. ун-та, 2018. С. 245–250.
3. Zykova I., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z., Samorokova N.M., Diachkovskiy A.S. Determining the parameters of the combustion law of the travelling charge propellant in 30-mm ballistic installation shot // AIP Conf. Proc. Vol. 2103, 020004 (2019); Published: Apr 29, 2019. ISBN: 978–0-7354-1835-6 doi: 10.1063/1.5099868.
4. Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Касимов В.З., Рогаев К.С. Исследование газодинамических особенностей ствольного старта модели с импульсным реактивным двигателем // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2015. Т. 3. № 35. С. 45–51.
5. Ishchenko A.N., Zykova A.I., Kasimov V.Z., Samorokova N.M. Improvement of projectile muzzle velocity at using a two-segment travelling charge // Высокоэнергетические и специальные материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение: сборник тезисов XIV Международной конференции «НЕМs-2018», 3–5 сентября 2018 г., г. Томск, Россия. Томск: Изд. дом Том. гос. ун-та, 2018. С. 176–178.
6. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А., Романьков А.В. Присоединенный высокоплотный заряд конвективного горения в комбинированной схеме выстрела: новые результаты // Горение и взрыв. 2013. № 6. С. 206–210.
7. Ермолаев Б.С., Романьков А.В., Сулимов А.А. Баллистическое подобие для выстрелов с присоединенным зарядом // Горение и взрыв. 2019. Т. 12. № 4. С. 138–144.
8. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А., Романьков А.В., Храповский В.Е., Беляев А.А., Кроули А.Б. Конвективное горение блочных зарядов из семиканальных пороховых зерен, ингибированных поливинилбутиралем // Химическая физика. 2015. Т. 34. № 5. С. 1–11.
9. Сафронов А.И., Крайнов А.Ю. Внутренняя баллистика ствольной системы с присоединенной камерой подгона // Вестник ТГПУ. 2004. Серия: Естественные и точные науки. Т. 6. № 43. С. 67–70.
10. Сафронов А.И. Повышение скоростей метания элементов для изучения поведения материалов при импульсных воздействиях // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2004. № 27. С. 169–172.
11. Horst A.W. A Brief Journey Through the History of Gun Propulsion. ARL-TR-3671 November 2005.
12. Damse R.S., Singh A. Advanced Concepts of the Propulsion System for the Futuristic Gun Ammunition // Defence Science Journal. 2003. V. 53. No. 4. P. 341–350.
13. Xin Lu, Yanhuang Zhou, Yonggang Yu. Experimental and numerical investigations on traveling charge gun using liquid fuels // J. Appl. Mech. 2011. V. 78. Iss. 5. 051002. 6 pp.
14. Tompkins R.E., White K.J., Oberle W.F., Juhasz A.A. Traveling charge gun firings using very high burning rate propellants// Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground Md. Technical report. ADA203307. 35 pp.
15. Ikuta K. Two stage travelling charge accelerator for high velocity // Sci. Technol. Energy. 2004. V. 65. No. 1. P. 25–27.
16. Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Касимов В.З., Рогаев К.С., Саморокова Н.М. Особенности диспергирования и горения пастообразного топлива в баллистических экспериментах // Сборник материалов IX Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», посвященной 55-летию полета Ю.А. Гагарина, г. Томск, 21–25 сентября 2016 г. Томск, 2016. С. 157–158.

17. Буркин В.В., Ищенко А.Н., Майстренко И.В., Фуфачев В.М., Дьячковский А.С., Бураков В.А., Корольков Л.В., Степанов Е.Ю., Чупашиев А.В., Рогаев К.С., Саммель А.Ю., Сидоров А.Д. Баллистический ударный стенд // Патент на полезную модель. Заявка № 2018111538 от 30.03.2018.
18. Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Корольков Л.В., Рогаев К.С., Саммель А.Ю., Степанов Е.Ю., Чупашиев А.В. Информационно-измерительный комплекс НИИ ПММ ТГУ // Сборник материалов Международной молодежной научной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», 17–19 ноября 2014. Томск: ТГУ, 2014. С. 127–128.
19. Прибор измерения скорости в стволе ДДС 6000: паспорт. М.: Таис, 2010. 8 с.
20. Буркин В.В., Дьячковский А.С., Егоров А.Л., Ищенко А.Н., Корольков Л.В., Майстренко И.В., Рогаев К.С., Степанов Е.Ю., Чупашиев А.В. // Датчик дульной скорости. Патент на полезную модель № 161396, заявка RU 2015127042 06.07.2015.
21. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 256 с.
22. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М.: Оборонгиз, 1962. 703 с.

Статья поступила 17.07.2020 г.

Burkin V.V., D'yachkovskiy A.S., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z., Rogaev K.S., Samorokova N.M. (2020) STUDY OF THE PASTE-LIKE PROPELLANT COMBUSTION AT VARIOUS LOADING SCHEMES. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 67. pp. 89–101

DOI 10.17223/19988621/67/9

Keywords: internal ballistics, barrel systems, gas dynamics, traveling charge, combustion, dispersion of paste-like propellants.

The experimental and theoretical studies of the paste-like propellant combustion in a model ballistic installation are implemented. The research is carried out using three masses of projectile assemblies and three types of the propellant charge. The paper presents two versions of the law of dispersion for paste-like propellants which allow accounting for the pressure on the front and acceleration of the projectile assembly with a traveling charge. The coefficients in the laws of dispersion are obtained. Using the mathematical model presented in this work, the gas-dynamic pictures of the shots when the propellants are applied as traveling charges are obtained for each dispersion law. Based on the results, a detailed study of the processes occurring with the traveling charge consisting of a model paste-like propellant is implemented for various shot arrangements. The discrepancy between theoretical results and the results obtained in the set of experiments is no more than 2% for the maximum pressure and no more than 1% for the muzzle velocity. The dispersion law accounting for the projectile assembly acceleration and traveling charge makes it possible to describe accurately the processes in the space behind the projectile for projectile assemblies of various masses and different types of granulated powder charge in terms of the model ballistic installation in the considered pressure range.

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.

Viktor V. BURKIN (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: v.v.burkin@mail.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@ftf.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. Ishchenko A.N., Kasimov V.Z. (2015) *Matematicheskaya model' i programmnyy kompleks dlya teoreticheskogo issledovaniya vnutriballisticheskikh protsessov v stvol'nykh sistemakh* [Mathematical model and software package for the theoretical study of intraballistic processes in barrel systems]. Tomsk: Tomsk State University Publishing House.
2. D'yachkovskiy A.S., Ishchenko A.N., Zykova A.I., Samorokova N.M. (2018) Temperature gradient investigation of the shot with travelling charge from pasty propellant. *Abstracts of the XIV International Conference "HEMs-2018" High-energy and Special materials: Demilitarization, Anti-terrorism and Civilian Use*. Tomsk: TSU. pp. 245–250.
3. Zykova A.I., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z., Samorokova N.M., Diachkovskiy A.S. (2019) Determining the parameters of the combustion law of the travelling charge propellant in 30-mm ballistic installation shot. *AIP Conference Proceedings*. 2103(020004). pp. 1–7. DOI: 10.1063/1.5099868.
4. Burkin V.V., D'yachkovskiy A.S., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z., Rogaev K.S. (2015) Issledovanie gazodinamicheskikh osobennostey stvol'nogo starta modeli s impul'snym reaktivnym dvigatelem [Investigation of gas-dynamic features of a moving model with a pulse jet engine (CPJE) inside a barrel]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 3(35). pp. 45–51.
5. Ishchenko A.N., Zykova A.I., Kasimov V.Z., Samorokova N.M. Improvement of projectile muzzle velocity at using a two-segment travelling charge. *Abstracts of the XIV International Conference "HEMs-2018" High-energy and Special materials: Demilitarization, Anti-terrorism and Civilian Use*. Tomsk: TSU. pp. 176–178.
6. Ermolaev B.S., Romankov A.V., Sulimov A.A., Crowley A.B. (2014) Compacted modified propellant blocks as traveling charge in the hybrid shot scheme. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 39. pp. 1–10. DOI: 10.1002/prep.201400154.
7. Ermolaev B.S., Roman'kov A.V., Sulimov A.A. Ballisticheskoe podobie dlya vystrel'ov s prisoedinennym zaryadom [Ballistic similarity for gun shots with a traveling charge]. *Gorenie i vzryv – Combustion and Explosion*. 12(4). pp. 138–144. DOI: 10.30826/CE19120415.
8. Ermolaev B.S., Sulimov A.A., Roman'kov A.V., Khrapovskiy V.E., Belyaev A.A., Krouli A.B. (2015) Konvektivnoe gorenie blochnykh zaryadov iz semikanal'nykh porokhovyykh zeren, ingibirovannykh polivinilbutiralem [Convective combustion of block charges from seven-channel powder grains inhibited by polyvinyl butyral]. *Khimicheskaya fizika – Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics*. 34(5). pp. 1–11. DOI: 10.7868/S0207401X15050040.
9. Safronov A.I., Kraynov A.Yu. (2004) Vnutrennyaya ballistika stvol'noy sistemy s prisoedinennoy kameroy podgona [Interior ballistics of the barrel system with an attached matching chamber]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta – Tomsk State Pedagogical University Bulletin*. 43(6). pp. 67–70.
10. Safronov A.I. (2004) Povyshenie skorostey metaniya elementov dlya izucheniya povedeniya materialov pri impul'snykh vozdeystviyakh [Increasing the speed of the projection elements

- to study the behavior of materials under impulse actions]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, Seriya fiziko-matematicheskie nauki*. 27. pp. 169–172. DOI: 10.14498/vsgtu297.
11. Horst A.W. (2005) *A Brief Journey Through the History of Gun Propulsion*. DOI: 10.21236/ada441021.
 12. Damse R.S., Singh A. (2003) Advanced concepts of the propulsion system for the futuristic gun ammunition. *Defence Science Journal*. 53(4). pp. 341–350. DOI: 10.14429/dsj.53.2279.
 13. Xin Lu, Yanhuang Zhou, Yonggang Yu. (2011) Experimental and numerical investigations on traveling charge gun using liquid fuels. *Journal of Applied Mechanics*. 78(5). pp. 051002-1–051002-6. DOI: 10.1115/1.4004292.
 14. Tompkins R.E., White K.J., Oberle W.F., Juhasz A.A. (1988) Traveling charge gun firings using very high burning rate propellants. *Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground Md. Technical report – ADA203307*.
 15. Ikuta K. (2004) Two stage travelling charge accelerator for high velocity. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 65(1). pp. 25–27. DOI: 10.1002/prep.201400154.
 16. D'yachkovskiy A.S., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z., Rogaev K.S., Samorokova N.M. (2016) Osobennosti dispergirovaniya i goreniya pastoobraznogo topliva v ballisticheskikh eksperimentakh [Features of dispersion and combustion of paste-like propellant in ballistic experiments]. *Proceedings of the IX All-Russian Conference "Fundamental and Applied Problems of Modern Mechanics"*. Tomsk: RIAMM. pp. 157–158.
 17. Burkin V.V., Ishchenko A.N., Maystrenko I.V., Fufachev V.M., D'yachkovskiy A.S., Burakov V.A., Korol'kov L.V., Stepanov E.Yu., Chupashev A.V., Rogaev K.S., Summel' A.Yu., Sidorov A.D. (2018) *Ballisticheskii udarnyy stend* [Ballistic shock stand]. RF Patent 180958.
 18. Burkin V.V., D'yachkovskiy A.S., Ishchenko A.N., Korol'kov L.V., Rogaev K.S., Sammel' A.Yu., Stepanov E.Yu., Chupashev A.V. (2014) Informatsionno izmeritel'nyy kompleks NII PMM TGU [Data measuring complex of RIAMM]. *Proceedings of International Youth Scientific Conference "Actual Problems of Modern Continuum Mechanics and Celestial Mechanics"*. Tomsk: RIAMM. pp. 127–128.
 19. (2010) *Pribor izmereniya skorosti v stvole DDS 6000: pasport* [A device for measuring the speed in the barrel DDS 6000: passport]. Moscow: Tais.
 20. Burkin V.V., D'yachkovskiy A.S., Egorov A.L., Ishchenko A.N., Korol'kov L.V., Maystrenko I.V., Rogaev K.S., Stepanov E.Yu., Chupashev A.V. (2015) *Datchik dul'noy skorosti* [Muzzle velocity sensor]. RF Patent 161396.
 21. Khomenko Yu.P., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z. (1999) *Matematicheskoe modelirovanie vnutriballisticheskikh protsessov v stvol'nykh sistemakh* [Mathematical simulation of intraballistic processes in barrel systems]. Novosibirsk: SB RAS Publishing House.
 22. Serebryakov M.E. (1962) *Vnutrennyaya ballistika stvol'nykh sistem i porokhovyykh raket* [Internal ballistics of barrel systems and powder rockets]. Moscow: Oborongiz.

Received: July 17, 2020