

Научная статья

УДК 536.46, 662.612

doi: 10.17223/19988621/81/11

Исследование особенностей зажигания и горения высокоплотных зарядов в условиях постоянного объема

Константин Сергеевич Рогаев¹, Алексей Сергеевич Дьячковский²,
Александр Николаевич Ищенко³, Нина Михайловна Саморокова⁴,
Евгений Юрьевич Степанов⁵, Наталья Радиковна Гимаева⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ rogaev@ftf.tsu.ru

² lex_okha@mail.ru

³ ichan@niipmm.tsu.ru

⁴ Samorokova_nina@mail.ru

⁵ stepanov_eu@mail.ru

⁶ natalia.gimaeva@inbox.ru

Аннотация. Представлено исследование некоторых особенностей зажигания высокоплотных зарядов в условиях постоянного объема. Приведено краткое описание используемой манометрической установки. Исследовано влияние некоторых факторов, таких как масса, тип воспламенителя и площадь поверхности горения, на воспламенение высокоплотного заряда и последующее горение. Представлены и проанализированы зависимости давления от времени при горении высокоплотного заряда в текстолитовом контейнере с различными диаметрами. Показано, что существует зависимость воспламенения пастообразного высокоплотного заряда от геометрических размеров контейнера, в котором он располагается.

Ключевые слова: манометрическая установка, воспламенение, модельное топливо, пастообразное топливо, скорость горения

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 21-79-10054, <https://rscf.ru/project/21-79-10054/>

Для цитирования: Рогаев К.С., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Саморокова Н.М., Степанов Е.Ю., Гимаева Н.Р. Исследование особенностей зажигания и горения высокоплотных зарядов в условиях постоянного объема // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 81. С. 123–132. doi: 10.17223/19988621/81/11

Original article

A study of the ignition and combustion of high-density charges under constant volume conditions

Konstantin S. Rogaev¹, Aleksey S. D'yachkovskiy², Aleksandr N. Ishchenko³,
Nina M. Samorokova⁴, Evgeniy Yu. Stepanov⁵, Natal'ya R. Gimaeva⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ rogaev@ftf.tsu.ru

² lex_okha@mail.ru

³ ichan@niipmm.tsu.ru

⁴ Samorokova_nina@mail.ru

⁵ stepanov_eu@mail.ru

⁶ natalia.gimaeva@inbox.ru

Abstract. The study of combustion and ignition of charges with promising propellants or powder compositions in terms of initial conditions is an urgent problem of modern ballistics. Generally, combustion and ignition of charges are tested in a manometric closed vessel. The charge ignition conditions may affect the subsequent reactions. When designing a shot with a new charge, it is necessary to know what determines the moment of ignition (gas pressure, time, pressure rise rate, type of igniter, etc.) and which factor has a greater effect on the ignition.

This paper presents a study of some features of high-density charge ignition under constant volume conditions. A brief description of the manometric setup is given. The effect of mass and type of igniter and combustion surface area on the high-density charge ignition and subsequent combustion is studied. The pressure-time dependences corresponding to high-density charge combustion in a textolite container with different diameters are presented and analyzed. The ignition of the paste high-density charge is revealed to be affected by the geometric dimensions of the container.

The parametric experimental study results show that the ignition conditions of a model high-density propellant (MHDP) strongly depend on the method of initiation, namely the number of burning particles and ambient pressure; however, these factors do not affect the dependence of the MHDP combustion rate on pressure. The ignition momentum is obtained as a function of the ratio of the container burning surface circumference to the burning surface area.

Keywords: manometric setup, combustion, model propellant, paste propellant, combustion rate

Acknowledgments: This study was carried out at the expenses of the grant from the Russian Science Foundation (project No. 21-79-10054), <https://rscf.ru/project/21-79-10054/>

For citation: Rogaev, K.S., D'yachkovskiy, A.S., Ishchenko, A.N., Samorokova, N.M., Stepanov, E.Yu., Gimaeva, N.R. (2023) A study of the ignition and combustion of high-density charges under constant volume conditions. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 81. pp. 123–132. doi: 10.17223/19988621/81/11

Введение

Исследование горения и воспламенения зарядов из перспективных топлив или пороховых составов в зависимости от начальных условий является актуальной задачей современной баллистики. Большинство исследований по горению и воспламенению зарядов проводят в манометрической бомбе [1–4]. Условия, при которых происходит воспламенение заряда, могут оказывать влияние на протекающие в дальнейшем реакции.

При баллистическом проектировании выстрела с новым зарядом необходимо знать, чем определяется момент воспламенения (давлением газа, временем, скоростью нарастания давления, типом воспламенителя и т.п.) и какие факторы больше влияют на процесс воспламенения [5–8].

В настоящей работе модельное пастообразное топливо (МВТ) имеет плотность около 1.6 г/см^3 , за счет чего может достигать более высокой плотности заряжания в баллистических установках – до $1.5\text{--}1.6 \text{ г/см}^3$ – по сравнению с пироксилиновыми порохами ($\leq 1.0 \text{ г/см}^3$). Данные топлива из-за своей высокой скорости горения могут быть использованы в комбинированной схеме заряжания в качестве присоединенного заряда (ПЗ). В выстреле, как правило, ПЗ воспламеняется позже порохового заряда, и момент воспламенения может оказывать значительное влияние на баллистические параметры выстрела. Раннее воспламенение приводит к превышению давления, позднее – к недогоранию топлива за время выстрела.

Влияние большинства факторов на воспламенение можно оценить в условиях манометрической бомбы. В работе рассматривалось горение МВТ при нормальной температуре, в опыте оно размещалось в цилиндрическом текстолитовом контейнере. Исследовалось влияние типа и массы порохового заряда, площади поверхности горения на воспламенение МВТ.

Экспериментальное исследование

Экспериментальное исследование особенностей зажигания МВТ проводилось в манометрической бомбе, внешний вид которой представлен на рис. 1. Максимальное давление, на которое рассчитана данная установка, – 300 МПа. Свободный объем камеры составляет 172 см^3 и представляет собой цилиндр, в котором сверху располагается воспламенитель – электрокапсюльная втулка (ЭКВ). Для снижения ударного воздействия от ЭКВ на исследуемый состав предусмотрена специальная конструкция гайки с отверстиями по бокам. В бомбе предусмотрены технологические отверстия для установки датчиков давления в двух различных сечениях, запальной пробки и крана для выпуска горячих газов. Сброс давления из камеры осуществляется в выпускной тракт дистанционно при помощи троса, намотанного на шкив крана. Схема размещения контейнера с топливом и порохового заряда в манометрической бомбе показана на рис. 1.

Экспериментально обнаружено, что создаваемого ЭКВ давления для стабильного воспламенения МВТ недостаточно. Поэтому проведена серия опытов по исследованию массы дополнительного порохового заряда, способного повысить стабильность воспламенения МВТ. В серии опытов заряд МВТ одинаковой массы располагался в цилиндрических контейнерах одинаковой формы, но с разными навесками порохового воспламенителя.

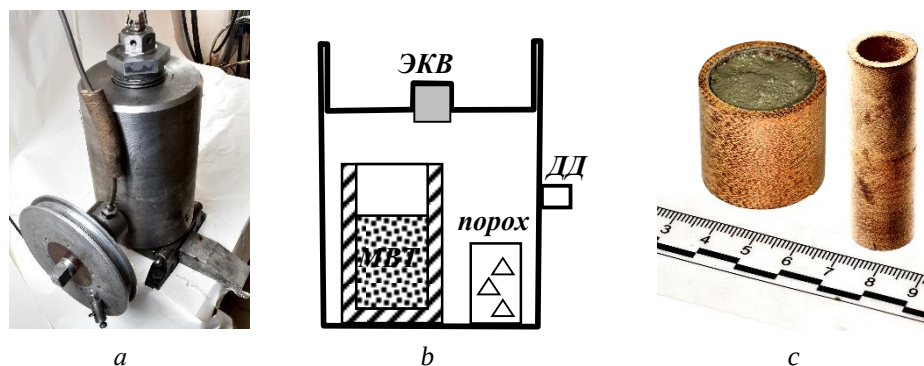


Рис. 1. Внешний вид манометрической бомбы (а), схема рабочей камеры с зарядом (b), внешний вид текстолитовых контейнеров (с)

Fig. 1. (a) Configuration of a closed vessel, (b) scheme of a working chamber with a charge, and (c) configuration of textolite containers

В работе исследовано воспламенение МВТ массой 16.5 г в текстолитовом контейнере диаметром 25 мм (см. рис. 1, с), при этом масса воспламенителя из пироксилинового пороха марки «Ирбис» варьировала от 1 до 10 г. Для определения влияния начальной поверхности на воспламенение МВТ проведены опыты с контейнерами диаметрами от 10 до 40 мм.

С учетом свободного объема манометрической бомбы давление, формируемое воспламенителем ЭКВ, составляет $p_0 = 2$ МПа. Для массы воспламенительного заряда пороха $\omega_B = 2.5$ г давление, формируемое в манометрической бомбе, составляет до 18 МПа, при этом весь пороховой заряд успевает сгореть полностью до начала момента горения МВТ. Для более точного определения закона горения МВТ в серии предварительных экспериментов определен закон горения порохов [4].

На рис. 2 представлено сравнение экспериментальных зависимостей давления от времени при горении МВТ в текстолитовом контейнере с внутренним диаметром $d = 25$ мм при различных массах дополнительного порохового воспламенителя (1, 2.5, 5, 10 г). Видно, что после сгорания пороховой части заряда (в начале каждой кривой) происходит падение давления, а затем снова рост.

На рис. 3 (в приближенном масштабе) показан момент воспламенения для опыта с $\omega_B = 2.5$ г, момент времени t_B , когда $dp/dt = 0$, с определенной точностью можно считать началом горения МВТ, здесь t_0 – момент срабатывания ЭКВ.

В проведенных опытах время и давление воспламенения различны, поэтому нельзя говорить о воспламенении при определенном уровне давления. Для характеристики воспламенения используем величину интеграла

$$I_B = \int_{t_0}^{t_B} p dt, \quad (1)$$

которую будем называть импульсом воспламенения. Для этой серии опытов импульс воспламенения составляет примерно 0.65 МПа·с. Импульс воспламенения МВТ не является физической характеристикой МВТ.

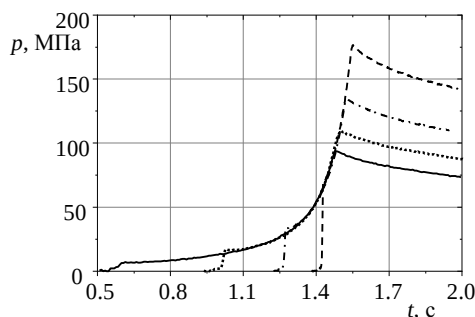


Рис. 2. Экспериментальная зависимость давления от времени при горении МВТ в текстолитовом контейнере с диаметром $d = 25$ мм при массе порохового воспламенителя:

— 1 г, 2.5 г, - · - · - 5 г, - - - - 10 г

Fig. 2. Experimental pressure-time dependence for MHPD combustion in a textolite container with a diameter of $d = 25$ mm at the mass of the powder igniter of:

— 1 g, 2.5 g, - · - · - 5 g, and - - - - 10 g

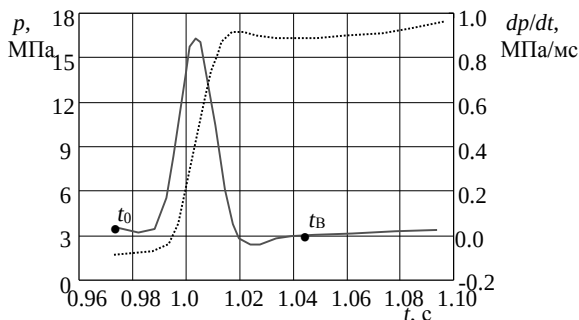


Рис. 3. Экспериментальная зависимость давления от времени (.....) и его производная при воспламенении МВТ (—) при горении пороха

Fig. 3. Experimental pressure-time dependence (.....) and pressure derivative with time for MHPD combustion (—) during powder combustion

Скорость горения топлива определялась по формуле

$$u(p) = \frac{d\psi_{\Pi}}{dt} \frac{V}{S}, \quad (2)$$

где V – объем МВТ; S – площадь поверхности горения; ψ_{Π} – доля сгоревшего МВТ.

Значение $\psi_{\Pi}(t)$ определялось на основании экспериментальной зависимости $p(t)$ с учетом горения пороха воспламенителя по формуле [1]

$$\psi_{\Pi} = \frac{(p - p_0) \left[W_1 - \frac{\omega_{\Pi}}{\delta_{\Pi}} - \alpha_B \omega_B \right] - f_B \omega_B}{(p - p_0) \left(\alpha_{\Pi} - \frac{1}{\delta_{\Pi}} \right) \omega_{\Pi} + f_{\Pi} \omega_{\Pi}},$$

где индекс «В» для пороха, «П» – для исследуемого МВТ; W_1 – свободный объем манометрической бомбы; ω_{Π} – масса МВТ; α_B – коволюм пороха; α_{Π} – коволюм МВТ; f_B – сила пороха; f_{Π} – сила МВТ; δ_{Π} – плотность МВТ.

Длительность процесса горения в манометрической бомбе порядка 1.0 с, что приводит к существенным теплотерям в стенки камеры, однако они не оказывают влияния на зависимость скорости горения от давления. При этом в расчете доли сгоревшего МВТ необходимо использовать не паспортные значения силы топлива, а определенные по значению $p_{\max}$ [1]. Производная $d\psi/dt$ определялась численным дифференцированием.

Зависимости скорости горения МВТ от давления, полученные по формуле (2), в этих опытах практически совпадают (рис. 4), что говорит о том, что время воспламенения не влияет на дальнейшее горение топлива. При одном типе воспламенителя разной массы в цилиндрических контейнерах одного диаметра можно определить характерный импульс воспламенения.

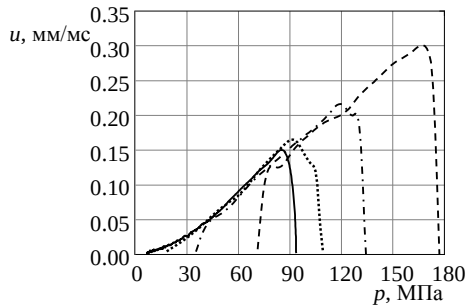


Рис. 4. Зависимость скорости горения от времени при горении МВТ в текстолитовом контейнере с диаметром $d = 25$ мм при массе порохового воспламенителя:

— 1 г, 2.5 г, - · - · - 5 г, - - - - 10 г

Fig. 4. Time dependence of the combustion rate during MHTD combustion in a textolite container with a diameter of $d = 25$ mm for the mass of the powder igniter of:

— 1 g, 2.5 g, - · - · - 5 g, and - - - - 10 g

Для исследованных в качестве дополнительного воспламенителя пироксилиновых пороховых зарядов – одноканальных и семиканальных («Ирбис», «Сунар», «4/7»), получены ожидаемые результаты: при одном типе (форме) контейнера и одинаковых компоновках заряда МВТ и порохового воспламенителя импульс воспламенения и скорости горения МВТ практически одинаковы.

Воспламенение МВТ при недогоревшем дополнительном пороховом заряде определялось с использованием зависимости доли сгоревшего пороха от интеграла давления [9]. На рис. 5 показана экспериментальная зависимость давления от времени при горении МВТ в текстолитовом контейнере при различном воздействии воспламенителя ЭКВ. В одном случае произведено непосредственное воздействие ударной волны и горячих частиц на поверхность МВТ, в другом воздействие производилось через рассеиватель. Видно, что при непосредственном воздействии на МВТ его горение начинается раньше по времени (импульс горения уменьшился до 0.065 МПа·с), однако при этом скорость горения, полученная по формуле (2), не меняется (рис. 6). Кроме того, это сравнение показывает существенное влияние горячих частиц ДРП на воспламенение МВТ.

Проведена серия опытов с одинаковой навеской МВТ и порохового воспламенителя, но с текстолитовым контейнером разного диаметра (рис/ 7). Из экспериментов видим, что в контейнерах большего диаметра уменьшается импульс

воспламенения, при этом увеличивается максимальное давление за счет уменьшения теплотер при меньшем времени процесса горения.

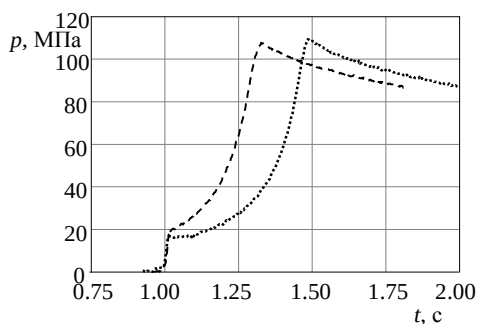


Рис. 5. Экспериментальная зависимость давления от времени при горении МВТ в текстолитовом контейнере: - - - - с рассеивателем, ····· — без рассеивателя

Fig. 5. Experimental pressure-time dependence of MHP combustion in a textolite container: - - - - with a diffuser and ····· — without a diffuser

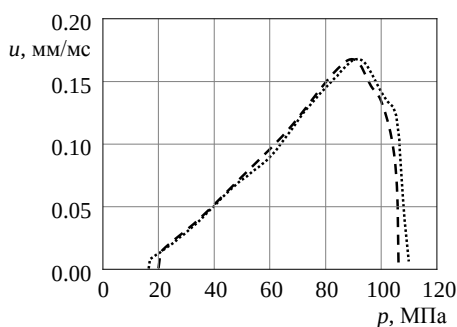


Рис. 6. Зависимость скорости горения МВТ от давления: - - - - с рассеивателем, ····· — без рассеивателя

Fig. 6. Dependence of MHP combustion rate on pressure: - - - - with a diffuser and ····· — without a diffuser

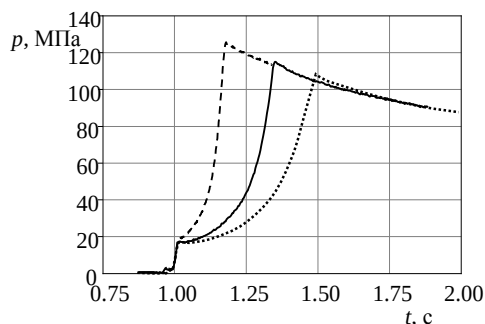


Рис. 7. Экспериментальная зависимость давления от времени при горении МВТ в текстолитовом контейнере с диаметром: ····· — 25 мм; ——— — 30 мм - - - - 40 мм
Fig. 7. Experimental pressure-time dependence of MHP combustion in a textolite container with a diameter of: ····· — 25 mm, ——— — 30 mm, and - - - - 40 mm

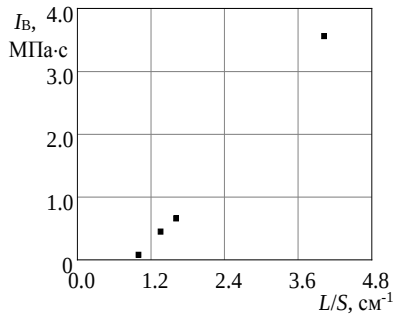


Рис. 8. Расчетная зависимость импульса воспламенения от L/S

Fig. 8. Calculated dependence of the ignition momentum on L/S

Видно, что существует зависимость импульса воспламенения от отношения длины окружности поверхности горения L к площади поверхности горения S (рис. 8). То есть чем меньше влияние боковой поверхности, тем быстрее воспламеняется МВТ. Возможно, это связано с оттоком тепла в стенку контейнера во время нагрева поверхности продуктами горения пороха.

Заключение

В результате проведенных параметрических экспериментальных исследований получено, что условия воспламенения МВТ в значительной степени зависят от способа инициации (количество горящих частиц, окружающее давление), однако данные факторы не влияют на зависимость скорости горения МВТ от давления. Отмечено, что существует зависимость импульса воспламенения от отношения длины окружности поверхности горения контейнера к площади поверхности горения. Полученные особенности зажигания и горения МВТ необходимо учитывать при баллистическом проектировании компоновки заряда в выстреле из ствольных баллистических систем.

Список источников

1. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М. : Оборонгиз, 1962. 703 с.
2. Botnan J.I. Testing of M7 propellant at different temperatures in closed vessel. Norwegian Defense Research Establishment (FFI), 2009. 80 p.
3. Boulkadid M.K., Lefebvre M.H., Jeuniau L., Dejeaifve A. Temperature sensitivity of propellant combustion and temperature coefficients of gun performance // Cent. Eur. J. Energ. Mater. 2016. V. 13 (4). P. 1005–1022.
4. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Саморокова Н.М. Интегриродифференциальный метод определения законов скорости горения конденсированных систем в условиях постоянного объема // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 1. С. 67–71.
5. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А., Романьков А.В., Королев В.П. Влияние начальной температуры на характеристики выстрела при использовании блочных метательных зарядов // Химическая физика. 2018. Т 37, № 3. С. 27–34.
6. Heath T. Martin E.B., Kenneth K.K. Effect of Initial Temperature on the Interior Ballistics of a 120-mm Mortar System // Journal of Applied Mechanics. 2013. № 80 (3). Art. 031408. P. 1–11.

7. Leciejewski Z.K., Surma Z. Investigation of influence of propellant charge temperature on gun firing phenomenon // *High-Energetic Materials Instytut Przemysłu Organicznego*. 2009. V. 1. P. 42–47.
8. Ищенко А.Н., Дьячковский А.С., Касимов В.З., Зыкова А.И., Саморокова Н.М. О влиянии начальной температуры заряда на баллистические характеристики выстрела // Сборник трудов X Всерос. науч. конф., 3–5 сентября 2018 г., г. Томск. Томск : Том. гос. ун-т, 2018. С. 41–43.
9. Барышев М.С., Бураков В.А., Ищенко А.Н., Саморокова Н.М., Хоменко Ю.П. Уточнение закона горения ДРП на основе результатов манометрических испытаний // Сборник докладов научной конференции Волжского регионального центра РАН, 2010, г. Саров. Саров : Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. Т. 2. С. 1007–1013.

References

1. Serebryakov M.E. (1962) *Vnutrennyaya ballistika stvol'nykh sistem i porokhovykh raket* [Internal ballistics of barrel systems and powder rockets]. Moscow: Oborongiz.
2. Botnan J.I. (2009) Testing of M7 propellant at different temperatures in closed vessel. *Norwegian Defense Research Establishment (FFI)*.
3. Boulkadid M.K., Lefebvre M.H., Jeuniau L., Dejeaive A. (2016) Temperature sensitivity of propellant combustion and temperature coefficients of gun performance. *Central European Journal of Energetic Materials*. 13(4). pp. 1005–1022. doi: 10.22211/cejem/67229
4. Khomenko Yu.P., Ishchenko A.N., Samorokova N.M. (1999) Integrodifferentsial'nyy metod opredeleniya zakonov skorosti goreniya kondensirovannykh sistem v usloviyakh postoyanogo ob"ema [An integro-differential method for determining the burning rate laws for condensed systems under constant volume conditions]. *Fizika goreniya i vzryva – Combustion, Explosion and Shock Waves*. 35(1). pp. 67–71.
5. Ermolaev B.S., Sulimov A.A., Roman'kov A.V., Korolev V.P. (2018) Effect of the initial temperature on the characteristics of the shot with a block charge. *Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics*. 12. pp. 232–238. doi: 10.1134/S1990793118020057
6. Martin H.T., Boyer E., Kuo K.K. (2013) Effect of initial temperature on the interior ballistics of a 120-mm mortar system. *Journal of Applied Mechanics*. 80(3). Article 031408. pp. 1–11. doi: 10.1115/1.4023318
7. Leciejewski Z.K., Surma Z. (2009) Investigation of influence of propellant charge temperature on gun firing phenomenon. *High-Energetic Materials Instytut Przemysłu Organicznego*. 1. pp. 42–47.
8. Ishchenko A.N., D'yachkovskiy A.S., Kasimov V.Z., Zyкова A.I., Samorokova N.M. (2018) O vliyaniy nachal'noy temperatury zaryada na ballisticheskie kharakteristiki vystrela [On the effect of the initial charge temperature on ballistic characteristics of a shot]. *Proceedings of the X All-Russian Scientific Conference, Tomsk*. pp. 41–43.
9. Baryshev M.S., Burakov V.A., Ishchenko A.N., Samorokova N.M., Khomenko Yu.P. (2010) Utochnenie zakona goreniya DRP na osnove rezul'tatov manometricheskikh ispytaniy [Improvement of the burning law for a black powder according to manometric test results]. *Proceedings of reports of the scientific conference of the Volga RCRAS*. Sarov: RFNC-VNIIEF Publishing House. 2. pp. 1007–1013.

Сведения об авторах:

Рогаяев Константин Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: rogaev@ftf.tsu.ru

Дьячковский Алексей Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: lex_okha@mail.ru

Ищенко Александр Николаевич – доктор физико-математических наук, директор Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

Саморокова Нина Михайловна – научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: Samorokova_nina@mail.ru

Степанов Евгений Юрьевич – младший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: stepanov_eu@mail.ru

Гимаева Наталья Радиковна – инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: natalia.gimaeva@inbox.ru

Information about the authors:

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

D'yachkovskiy Aleksey S. (Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: lex_okha@mail.ru

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

Samorokova Nina M. (Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: Samorokova_nina@mail.ru

Stepanov Evgeniy Yu. (Junior Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: stepanov_eu@mail.ru

Gimaeva Natal'ya R. (Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: natalia.gimaeva@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 29.04.2022; принята к публикации 03.02.2023

The article was submitted 29.04.2022; accepted for publication 03.02.2023