

УДК 531.57
DOI 10.17223/19988621/74/8

**В.В. Буркин, А.С. Дьячковский, А.Н. Ищенко, В.З. Касимов,
К.С. Рогаев, А.Д. Сидоров, Е.Ю. Степанов**

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВЫСТРЕЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОПЛОТНЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДУЛЬНОЙ СКОРОСТИ СНАРЯДА¹

Проведены теоретические исследования, направленные на демонстрацию положительного эффекта применения высокоплотных высокоэнергетических топлив в артиллерийском выстреле. С помощью специального программного комплекса, в основе которого лежит математическая модель внутриваллистических процессов, проведены параметрические исследования возможностей выстрела с применением модельного высокоплотного топлива в режиме присоединенного заряда, располагаемого в канале ствола за снарядом в дополнение к основному пороховому заряду, в условиях модельной баллистической установки среднего калибра. Закон горения топлива, полученный расчетно-экспериментальным путем на установке малого калибра, был адаптирован к условиям установки среднего калибра. Определены условия заряжания, позволяющие добиться наибольшего повышения дульной скорости снаряда при использовании топлива по сравнению с выстрелом по классической схеме заряжания и с сохранением требуемого уровня давления. Представлены рекомендации по модернизации высокоплотного топлива для получения дополнительного прироста дульной скорости снаряда.

Ключевые слова: *внутренняя баллистика, ствольные системы, газовая динамика, высокоэнергетическое топливо, присоединенный заряд, горение топлив.*

Исследование новых перспективных схем заряжания является одним из основных направлений внутренней баллистики, позволяющих повысить дульную скорость снаряда. Наличие «эффекта насыщения» ограничивает скорость снаряда в классической схеме выстрела при использовании порохового метательного заряда, поскольку максимальная скорость метания при сгорании пороха определяется предельной скоростью разлета пороховых газов в вакууме. Традиционные способы повышения скорости снаряда практически исчерпали свой потенциал и не позволяют значительно повысить дульную скорость [1]. Для повышения скорости требуется применение нетрадиционных схем метания.

Перспективным направлением в области высокоскоростного метания является схема выстрела с присоединенным зарядом (ПЗ), используемым в выстреле вместе с основным зарядом [2]. ПЗ представляет из себя моноблочный дополнительный заряд, состоящий из новых высокоэнергетических топлив и располагаемый за снарядом в стволе (рис. 1).

Включение в заряд ПЗ позволяет увеличить суммарную массу заряда и, как следствие, повысить среднюю плотность заряжания. В процессе выстрела сначала

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-00028).

происходит инициирование пороха. Спустя время, определяемое, в частности, импульсом давления на фронте горения, воспламеняется ПЗ, горение происходит в торцевом режиме при движении снаряда по каналу ствола. Применение схемы выстрела с ПЗ приводит к перераспределению энергии продуктов сгорания в за-снарядном пространстве, что позволяет повысить давление на снаряде без увеличения давления в камере сгорания [3]. При использовании схемы выстрела с ПЗ появляется возможность реактивного подгона снаряда в ствол. Перечисленные преимущества позволяют повысить дульную скорость снаряда без повышения максимального давления на дно канала ствола [4].

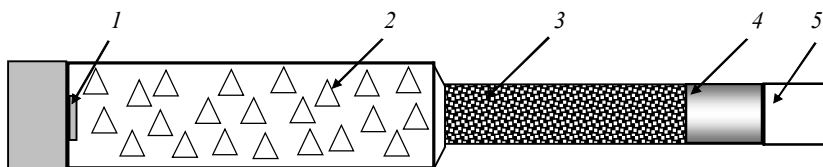


Рис. 1. Схема выстрела с применением ПЗ:

1 – воспламенитель; 2 – порох; 3 – ПЗ; 4 – снаряд; 5 – ствол

Fig. 1. Schematic diagram of a shot with a traveling charge:

1 – an initiator; 2 – a gunpowder; 3 – a traveling charge; 4 – a projectile; 5 – a barrel

Целью работы является расчетно-теоретическое исследование возможностей повышения дульной скорости снаряда при сохранении максимального давления на дно канала ствола путем применения ПЗ, а также выработка рекомендаций по модернизации ПЗ. В основе данной работы лежат результаты проведенных экспериментально – теоретических исследований применения высокоэнергетического топлива в режиме ПЗ на лабораторной гладкоствольной установке малого калибра [5].

В работе используется программный комплекс, в основе которого лежит математическая модель внутрибаллистических процессов в ствольных системах, базируемая на основных допущениях механики многофазных сред [6]. Математическая модель предусматривает наличие в пороховом заряде произвольного количества фракций частиц, а также наличие в составе заряда моноблочных элементов, которые горят по своим законам и диспергируют на отдельные частицы дополнительной фракции.

Основная система газодинамических уравнений, определяющая внутрибаллистические процессы, записана в виде законов сохранения массы смеси газов, импульса и энергии в квазиодномерном приближении с учетом разных типов частиц и замыкается уравнением состояния для газовой смеси [6]. Уравнения решаются по модифицированной схеме С.К. Годунова второго порядка точности по координате [7] и времени [8] с использованием на предварительном шаге решения задачи о распаде произвольного разрыва.

Результаты параметрических исследований

В исследовании по повышению дульной скорости снаряда принят следующий базовый выстрел: масса снаряда 9 кг, масса пороха 7.9 кг, максимальное давление в канале ствола 560 МПа, дульная скорость 1575 м/с. Для топлива за основу был выбран закон горения, полученный в [5] на малом калибре и адаптированный к условиям среднего калибра.

ПЗ загорается в процессе движения по каналу ствола через некоторое время после начала горения пороха, определяемое конкретным параметром. В модели, описанной в [6], в качестве такого параметра выбран импульс давления на фронте горения I_1 [9], который контролирует начало горения без учета зажигания. Закон горения ПЗ выглядит следующим образом:

$$U_r = 0, \text{ при } I < I_1,$$

$$U_r = B_1 \left(\frac{P}{P_{\text{атм}}} \right)^v, \text{ при } I \geq I_1,$$

$$I_1 = \int_0^{t_1} P dt,$$

где B_1 – коэффициент закона скорости горения; P – давление газа на фронте горения; $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление; v – показатель степени в законе горения.

Считается, что на фронте горения ПЗ помимо газообразных продуктов горения образуются частицы. Начальная степень превращения ПЗ в газ $\Psi_0 = 0.1$. Это означает, что на фронте горения в каждый момент времени 10% топлива переходит в газ, а 90% – в частицы, которые догорают в канале ствола. Для частиц задается степенной закон горения

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

где U_1 – единичная скорость горения – скорость горения при $P = P_{\text{атм}} = 0.1$ МПа; v – показатель степени в законе горения частиц.

Параметрические исследования проведены с учетом следующих допущений. Длина ствола постоянна. Порох состоит из зернового семиканального и трубчатого одноканального пороха, равномерно расположенных по объему камеры сгорания. Горение ПЗ происходит в одну стадию. Массы ПЗ, частей пороха и импульс давления на фронте горения топлива подбирались таким образом, чтобы реализовывалось максимальное давление 560 МПа (базовый выстрел). Масса ПЗ варьируется: 13, 17, 20, 23 и 26% от общей массы заряда (порох + топливо). Импульс I_1 меняется от 450 до 1150 МПа·с. Использовались такие условия заряжания, чтобы происходило полное сгорание топлива за время выстрела.

Результаты параметрических исследований представлены на рис. 2. Установлено, что наибольшее повышение дульной скорости достигается при 20%-й доле массы ПЗ от общей массы заряда. Дальнейшее увеличение доли ПЗ приводит к его недогоранию за время выстрела в стволе. При этом масса снаряда увеличивается на массу недогоревшего ПЗ, что не дает возможности дальнейшего повышения дульной скорости без проектирования новой ствольной системы или модернизации топливного состава.

Изменение импульса давления на фронте горения позволяет регулировать процесс зажигания ПЗ. Воспламенение ПЗ после достижения максимума давления в камере сгорания позволяет повысить дульную скорость. Дальнейшее увеличение импульса давления при постоянстве скорости горения приводит к недогоранию ПЗ в канале ствола и уменьшению дульной скорости снаряда (рис. 2). На рис. 3 представлены временные зависимости давления газа в камере сгорания, давления газа на дне снаряда и скорости снаряда для выстрела по классической

схеме заряжания и для выстрела с ПЗ. Второй всплеск давления после основного максимума (указан стрелкой на рис. 3) говорит о начале горения ПЗ [3]. В результате проведенного исследования максимальное повышение дульной скорости до 1733 м/с (прирост на 10% по сравнению с базовым выстрелом) возможно при использовании ПЗ массой 20% от общей массы заряда, импульсом $I_1 = 950$ МПа·с.

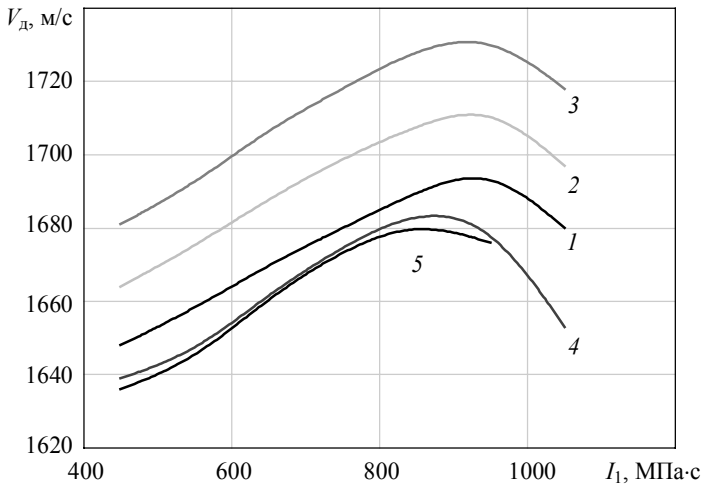


Рис. 2. Зависимости дульной скорости от импульса давления на фронте горения:
1 – 13%, 2 – 17%, 3 – 20%, 4 – 23%, 5 – 26%

Fig. 2. Dependences of the muzzle velocity on the pressure transient at the flame front:
1 – 13%, 2 – 17%, 3 – 20%, 4 – 23%, and 5 – 26%

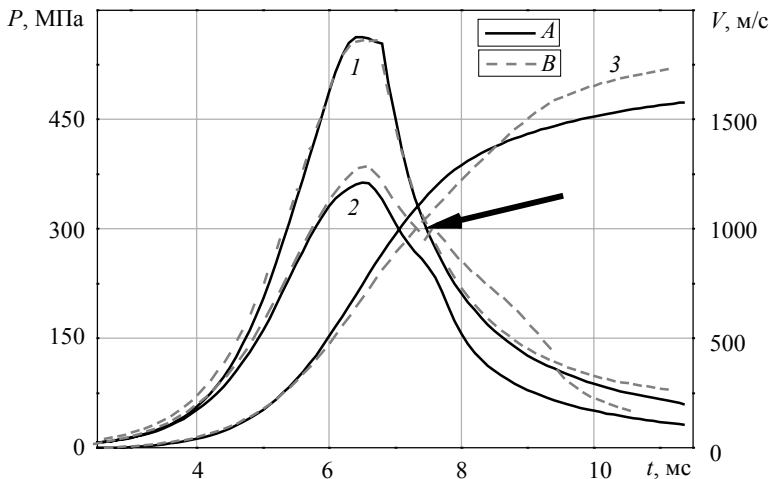


Рис. 3. Временные зависимости давления газа в камере сгорания 1, давления газа на дне снаряда 2 и скорости снаряда 3. А – классическая схема заряжания, В – выстрел с ПЗ

Fig. 3. Time dependences of: 1, gas pressure in a combustion chamber; 2, gas pressure at a shot base; and 3, projectile velocity. А – a classic loading scheme, В – a shot with a traveling charge

Рассмотренное топливо разработано для применения на малом калибре и апробировано в условиях среднего калибра. Для получения большего прироста дульной скорости снаряда на установке среднего калибра требуется разработка перспективных топлив и проведение дополнительного теоретического исследования.

В качестве начальной точки дополнительного исследования выбраны условия заряжания, которые позволили получить максимальное повышение дульной скорости до 1733 м/с (10%). Исследования по оценке возможностей схемы выстрела с ПЗ проведены путем модернизации ПЗ за счет изменения коэффициента в законе скорости горения B_1 и силы топлива f – аналога силы пороха [10] при неизменном импульсе $I_1 = 950$ МПа·с. Фиксированный импульс позволит провести корректное сравнение с расчётными данными начальной точки.

Согласно проведенным расчётам, к максимальному повышению дульной скорости при сохранении базового давления ведет уменьшение параметра B_1 , что позволяет продлить работу ПЗ в стволе, а также увеличение силы топлива f (рис. 4). А именно: уменьшение B_1 на 15% и увеличение f на 20% позволило добиться максимального повышения дульной скорости снаряда до 1772 м/с (прирост на 15.7%).

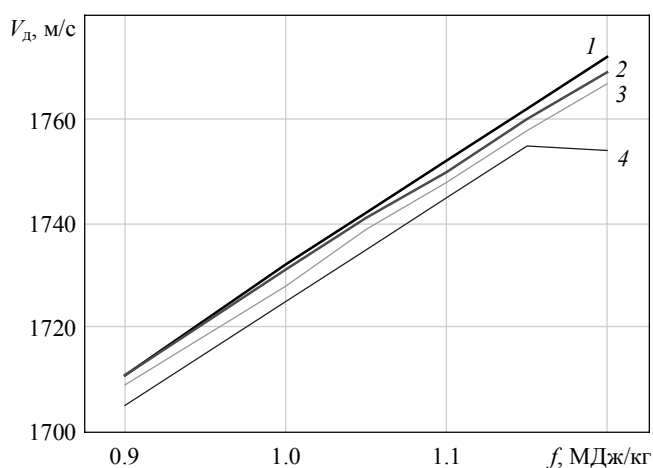


Рис. 4. Зависимость дульной скорости снаряда от энергетики топлива для разных B_1 :

1 – $0.85B_1$; 2 – $0.95B_1$; 3 – B_1 ; 4 – $1.1B_1$

Fig. 4. Dependence of the projectile muzzle velocity on fuel energy for different B_1 :

1 – $0.85B_1$; 2 – $0.95B_1$; 3 – B_1 ; and 4 – $1.1B_1$

Большее увеличение силы топлива способствует существенному повышению температуры горения, что на практике приводит к возрастанию скорости износа установки, сокращению живучести ствольных систем и, как следствие, снижению дульной скорости снаряда, уменьшению прицельной дальности орудия и ухудшению кучности стрельбы.

Заключение

Проведено теоретическое исследование возможностей повышения дульной скорости снаряда путем применения высокоэнергетического топлива в режиме ПЗ на установке среднего калибра. Закон горения топлива, полученный расчетно-

экспериментальным путем в условиях установки малого калибра, был адаптирован к условиям среднего калибра (120 мм). Показана возможность повышения дульной скорости снаряда при использовании высокоэнергетического топлива в режиме ПЗ при сохранении максимального давления на дно канала ствола. При варьировании массы ПЗ и импульса давления на фронте горения, отвечающего за начало горения топлива, наибольшее повышение дульной скорости снаряда составило 10%. Получено оно было при использовании топлива с импульсом $I_1 = 950$ МПа·с и массой 20% от массы всего заряда.

Для получения дополнительного прироста дульной скорости снаряда на установке среднего калибра проведены расчеты с использованием топлива с измененными параметрами: коэффициента закона скорости горения B_1 и силы f , при фиксированном значении импульса давления на фронте $I_1 = 950$ МПа·с. Применение модернизированного топлива с повышенной силой f (на 20%) и пониженным коэффициентом закона скорости горения B_1 (на 15%) позволило повысить дульную скорость снаряда на 15.7% с сохранением максимального давления на дно канала ствола.

ЛИТЕРАТУРА

1. Horst A.W. A Brief Journey Through the History of Gun Propulsion. ARL-TR-3671 November 2005.
2. Lu X., Zhou Y., Yu Y. Experimental and numerical investigations on traveling charge gun using liquid fuels // J. Appl. Mech. 2011. V. 78. Iss. 5. P. 051002-1–051002-6.
3. Liang T., Lv B., Ma Z., Zhong-liang Xiao. The research on energy releasing control of traveling charge // International Conference on Computer Science and Electronic Technology (ICCSET 2014). 2014. P. 67–70.
4. 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.
5. Рогаев К.С., Ищенко А.Н., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Сидоров А.Д., Степанов Е.Ю. Исследование горения высокоплотных топлив в условиях модельной баллистической установки // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2021. № 69. С. 127–138.
6. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 256 с.
7. Колган В.П. Применение принципа минимальных значений производной к построению конечноразностных схем для расчета разрывных решений газовой динамики // Уч. зап. ЦАГИ. 1974. Т. 3. № 6. С. 68–77.
8. Bogdanoff D.W., Miller R.J. New Higher-Order Godunov Code for Modelling Performance of Two-Stage Light Gas Guns. NASA TM – 110363, September 1995. 45 p.
9. Leciejewski Z., 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.
10. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М.: Оборонгиз, 1962. 703 с.

Статья поступила 25.12.2020 г.

Burkin V.V., D'yachkovskiy A.S., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z., Rogaev K.S., Sidorov A.D., Stepanov E.Yu. (2021) ESTIMATION OF ULTIMATE CAPABILITIES OF A SHOT WITH THE USE OF HIGH-DENSITY PROPELLANTS FOR AN INCREASE IN PROJECTILE MUZZLE VELOCITY. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 74. pp. 71–78

DOI 10.17223/19988621/74/8

Keywords: internal ballistics, barrel systems, gas dynamics, high-energy propellants, travelling charge, combustion of propellants.

Theoretical studies aimed at demonstrating efficiency of using high-density high-energy propellants in an artillery round are carried out. Parametric studies on shot capabilities are performed using the special software package based on a mathematical model of intraballistic processes. The shot is fired using a model high-density propellant with a traveling charge placed in the bore behind the shell in addition to the main propellant charge in a medium-caliber model ballistic setup. The propellant burning law obtained by calculations and experiments on a small-caliber setup is adapted to a medium-caliber one. Charging conditions are determined to achieve the highest increase in the projectile muzzle velocity with the use of propellants as compared with a classical charging scheme of the shot at a maintained level of the required pressure. Recommendations for upgrading high-density propellants resulting in an additional increase in the projectile muzzle velocity are presented.

Financial support. The study was carried out at the expenses of the grant from the Russian Science Foundation (project No. 19-79-00028).

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

Aleksey D. SIDOROV (Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: aleksid92@gmail.com

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

REFERENCES

1. Horst A.W. (2005) *A Brief Journey Through the History of Gun Propulsion*. Army Research Laboratory. DOI: 10.21236/ada441021.
2. Lu X., Zhou Y., Yu Y. (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.

3. Liang T., Lv B., Ma Z., Zhong-liang Xiao (2015) The research on energy releasing control of travelling charge. *Proceedings of the 2014 International Conference on Computer Science and Electronic Technology*. pp. 67–70. DOI: 10.2991/iccset-14.2015.15.
4. Ermolaev B.S., Sulimov A.A., Roman'kov A.V. (2013) Prisoedinyonnyy vysokoplotnyy zaryad konvektivnogo goreniya v kombinirovannoy skheme vystrela: Novye rezul'taty [Traveling high-density charge of convective burning in the hybrid configuration: new results]. *Gorenie i vzryv – Combustion and Explosion*. 6. pp. 206–210.
5. Rogaev K.S., Ishchenko A.N., Burkin V.V., D'yachkovskiy A.S., Sidorov A.D., Stepanov E.Yu. (2021) Issledovanie goreniya vysokoplotnykh topliv v usloviyakh model'noy ballisticheskoy ustanovki [A study of the combustion of high-density propellants in a model ballistic installation]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 69. pp. 127–138. DOI: 10.17223/19988621/69/10.
6. 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.
7. Kolgan V.P. (1974) Primenenie printsipa minimal'nykh znacheniy proizvodnoy k postroeniyu konechnoraznostnykh skhem dlya rascheta razryvnykh resheniy gazovoy dinamiki [Application of the principle of minimizing the derivative to the construction of finite-difference schemes for computing discontinuous solutions of gas dynamics]. *Uchenye zapiski TSAGI – TsAGI Science Journal*. 6. pp. 68–77.
8. Bogdanoff D.W., Miller R.J. (1995) *New Higher-Order Godunov Code for Modelling Performance of Two-Stage Light Gas Guns*. NASA TM.
9. Leciejewski Z., Surma Z. (2009) Investigation of influence of propellant charge temperature on gun firing phenomenon. *Materiały Wysokoenergetyczne – High-Energetic Materials*. 1. pp. 42–47.
10. Serebryakov M.E. (1962) *Vnutrennyaya ballistika stvol'nykh sistem i porokhovykh raket* [Internal ballistics of barrel systems and powder rockets]. Moscow: Oborongiz.

Received: December 25, 2020