

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ ПОРШНЯ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСТАНОВКЕ СРЕДНЕГО КАЛИБРА

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

*Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики, Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация  
E-mail: aleksid92@gmail.com*

Представлены результаты теоретического исследования нетрадиционной схемы выстрела с применением электротермохимической технологии воспламенения в условиях установки среднего калибра. Адаптирован закон горения порохов к условиям выстрела с электротермохимической технологией воспламенения порохового заряда применительно к модельной баллистической установке среднего калибра. За основу приняты расчетные данные, полученные на лабораторной баллистической гладкоствольной установке малого калибра. Проведены теоретические параметрические исследования, направленные на определение возможностей выстрела с применением электротермохимической технологии воспламенения комбинированного порохового заряда в широком диапазоне вводимой энергии при разной начальной температуре порохового заряда. Температурный градиент по дульной скорости поршня при начальных температурах порохового заряда  $-40$  и  $+20$  °С без дополнительного энерговода составил 4 %. Для его компенсации необходимо введение дополнительной энергии 60 кДж в пороховой заряд. Определены условия заряжания исследуемой баллистической установки, позволяющие добиться максимального повышения дульной скорости поршня по сравнению с базовым выстрелом по классической схеме заряжания с применением традиционных воспламенителей. Проведена теоретическая модернизация порохового заряда для достижения большего прироста дульной скорости поршня.

*Ключевые слова: внутренняя баллистика; выстрел; электротермохимический; скорость горения; повышение дульной скорости.*

### Введение

Существует проблема повышения дульной скорости метаемого элемента или поршня, являющаяся одной из основных задач внутренней баллистики. Традиционные способы повышения дульной скорости выстрела по классической схеме заряжания не позволяют добиться значительного результата. В связи с повышением характеристик защищенности бронированных целей поиск путей повышения скорости поршня не утратил своей актуальности и в настоящее время. Для этого требуются исследования нетрадиционных схем метания, позволяющих повысить дульную скорость поршня. Перспективным направлением в области высокоскоростного метания является нетрадиционная схема выстрела с применением электротермохимической (ЭТХ) технологии воспламенения пороха. Она применяется для повышения интенсивности газообразования в камере, что обусловлено высокой температурой электроразрядной плазмы (ЭП), образующейся при высоковольтном разряде. При помощи ЭП удастся существенно сократить длительность периода воспламенения порохового заряда, стабилизировать его характеристики и уменьшить влияние начальной температуры пороха на баллистические параметры выстрела по сравнению с капсюльным инициированием пороха [1].

Целью данной работы является проведение теоретических исследований возможностей выстрела с целью повышения дульной скорости поршня при использовании ЭТХ технологии воспламенения применительно к модельной баллистической установке среднего калибра.

## Интерпретация режима повышенного газообразования

Расчетно-теоретический анализ схемы выстрела выполнен с использованием программного комплекса [2], в основе которого лежит математическая модель внутрибаллистических процессов в ствольных системах, базируемая на основных допущениях механики многофазных сред.

Параметры модельной установки: средний калибр (120 мм), масса поршня 7,8 кг. Заряд состоит из зернового семиканального и трубчатого порохов (рис. 1). Плазматрон типа «флейта» [3] расположен внутри насыпной семиканальной части метательного заряда.

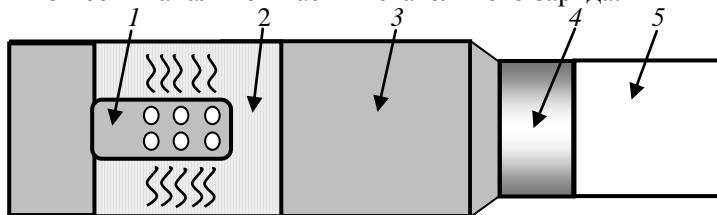


Рис. 1. Схема расположения пороха в камере ЭТХ выстрела:  
1 – плазматрон; 2 – семиканальный порох; 3 – трубчатый порох; 4 – поршень; 5 – ствол

Поскольку программный комплекс [2] позволяет использовать произвольное количество фракций пороха, введение ЭП в порох учтено при помощи введения отдельной фракции – условного быстрогорящего топлива [4]. Это позволяет смоделировать время и характер разряда. Введение ЭП с энергией  $Q$  вызывает неравномерное воспламенение и горение пороха. В связи с этим режим повышенного газообразования смоделирован следующим образом. Фракция семиканального пороха, окружающая плазматрон (первая фракция), воспламеняется в момент начала электроввода и горит в режиме ускоренного газообразования. В общем случае увеличение газообразования может быть связано не только с дополнительным прогревом пороха, но и с частичной деструкцией пороховых зерен и увеличением поверхности горения. Образовавшийся газ спустя некоторое время воспламеняет вторую фракцию, которая горит в обычном режиме. Данное предположение согласуется с результатами экспериментов с введением ЭП в полиэтиленовые гранулы в замкнутом объеме, моделирующие зерновой порох в камере сгорания (рис. 2). Результаты показали, что часть гранул, расположенная вблизи «флейты», сгорела, а другая часть лишь обуглилась. Поэтому в расчетах семиканальный порох делится на две фракции с разными параметрами горения: масса, единичная скорость горения и время воспламенения [5].



Рис. 2. Результат введения электроразрядной плазмы в гранулированный полиэтилен

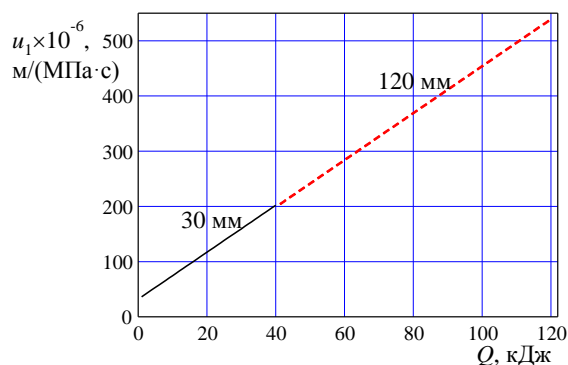
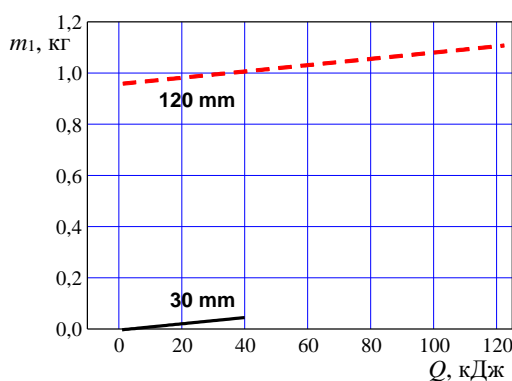


Рис. 3. Зависимость массы первой фракции (а) и единичной скорости горения (б) от энерговвода

Адаптация режима повышенного газообразования к модельной установке калибром 120 мм проведена на основе расчетных данных, полученных на баллистической установке калибром 30 мм [6]. При смене калибра с 30 на 120 мм предполагается, что в плазмотроне увеличивается количество отверстий и размеры: длина и диаметр, что позволяет воспламенить большее количество пороха на этапе разряда. Это приводит к возрастанию значения массы первой фракции пороха. Зависимости массы первой фракции от уровня введенной энергии для 30 и 120 мм установок имеют линейную форму и расположены параллельно друг к другу на графике (рис. 3, а). Зависимости единичной скорости горения  $u_1$  и времени воспламенения второй фракции  $t_2$  не изменятся, поскольку отличие порохов для 30 и 120 мм выстрелов – только в размере зерна (рис. 3, а и 4). Полученные в [5] зависимости для 30 мм установки экстраполируются в сторону больших значений энергии для 120-мм выстрела.

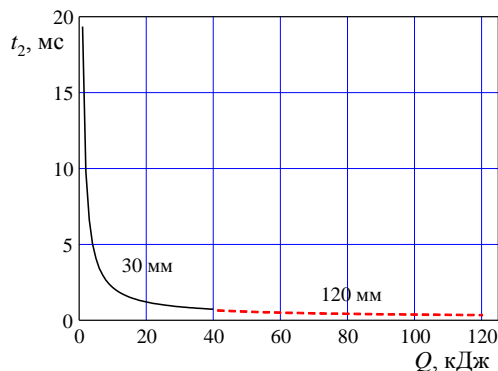


Рис. 4. Зависимость времени воспламенения второй фракции от уровня введенной энергии

#### Параметрические исследования

На основе полученного режима повышенного газообразования было проведено параметрическое исследование по определению возможностей выстрела с использованием ЭТХ-технологии воспламенения применительно к модельной установке калибром 120 мм, являющейся аналогом Rh120 [7], в широком диапазоне уровня введенной энергии  $Q = 20\text{--}120$  кДж. Для определения прироста дульной скорости в качестве базовых точек использованы данные трех выстрелов по классической схеме заряжания с применением традиционных воспламенителей (далее базовый выстрел) при разных начальных температурах:  $-40$ ,  $+20$  и  $+40$  °С.

Расчеты проведены с учетом ряда предположений. Начальная температура заряда равна  $+20$  °С. Трение поршня о канал ствола и давление форсирования не зависят от уровня энерговода. Сила  $f$  и относительная поверхность горения  $\sigma(\psi)$  второй фракции семиканального пороха не зависят от энерговода. Вторая фракция семиканального пороха и трубчатый порох воспламеняются одновременно. Весь пороховой заряд горит по геометрическому закону. Параметры горения трубчатого пороха не зависят от энерговода. Порох полностью сгорает за время выстрела. В условиях ЭТХ-воспламенения рост газоприхода учитывается при помощи увеличения единичной скорости горения первой фракции семиканального пороха.

Согласно полученным результатам, введение 120 кДж (около 1 % от общей потенциальной энергии всего заряда) в семиканальный порох позволяет повысить дульную скорость на 5,2 % (кривая 2, рис. 5) по сравнению с базовым выстрелом. При этом доля первой фракции достигает 65 % от общей массы семиканального пороха. В области высоких значений введенной энергии (100–120 кДж) наблюдается снижение прироста давления газа (кривая 2, рис. 5, б), которое вызвано преждевременным форсированием поршня и увеличением объема заряжания, что приводит к снижению прироста дульной скорости поршня. Точками указаны расчетные данные базового выстрела при разных начальных температурах.

Известно, что изменение начальной температуры пороха влияет на баллистические параметры выстрела: дульную скорость поршня и максимальное давление [8]. Поэтому отдельно рассмотрены разные начальные температуры порохов:  $-40$  и  $+40$  °С (рис. 6). Температурный градиент выстрела по дульной скорости поршня при температурах  $-40$  и  $+20$  °С без дополнительного энерговода составляет 4 %. Введение 60 кДж в пороховой заряд при начальной температуре  $T_0 = -40$  °С позволяет компенсировать температурный градиент по дульной скорости поршня до

## Механика

уровня базового выстрела (с применением традиционных воспламенителей) при температуре  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Введение 120 кДж в пороховой заряд при  $T_0 = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$  позволяет максимально повысить дульную скорость на 6,5 %, в порох ( $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) – на 5 %.

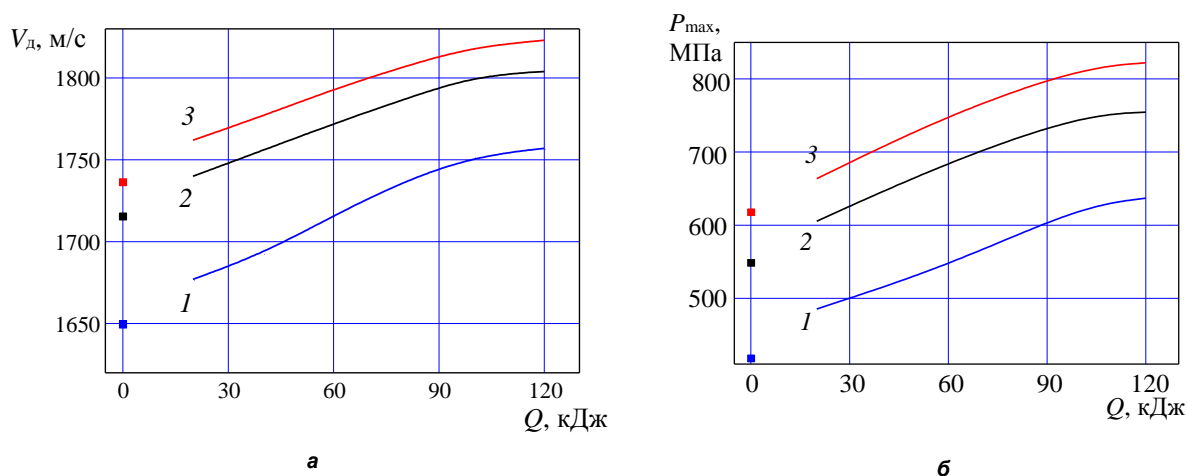


Рис. 5. Зависимость дульной скорости поршня (а) и максимального давления газа (б) от уровня введенной энергии: 1 –  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ■ – данные выстрелов по классической схеме заряжания

Для получения большего прироста дульной скорости поршня за счет использования ЭТХ воспламенителя были рассмотрены пороха с разными толщинами горящего свода при начальной температуре  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 6). А именно: размер горящего свода семиканального и трубчатого порохов меньше (кривая 3) и больше (кривая 1) на 10 %, чем у стандартных порохов (кривая 2). Порох, имеющий меньший размер, позволил добиться большего прироста дульной скорости. В первом случае введение 120 кДж позволяет повысить дульную скорость на 6,6 %, во втором случае на 3,6 %.

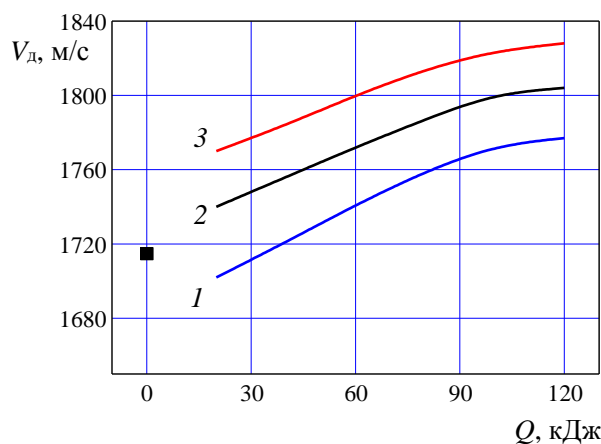


Рис. 6. Зависимость дульной скорости поршня от уровня введенной энергии: 1 – утолщенный (+10 % к размеру); 2 – стандартный; 3 – утонченный (–10 % к размеру) ■ – данные выстрела по классической схеме заряжания

## Заключение

В работе представлены результаты теоретического исследования схемы выстрела с применением ЭТХ-технологии воспламенения в условиях модельной установки среднего калибра. Для проведения параметрических исследований режим повышенного газообразования, полученный на баллистической установке калибром 30 мм, был адаптирован к условиям модельной баллистической установки калибром 120 мм. Полученные результаты продемонстрировали положительный эффект применения ЭТХ-технологии воспламенения заряда при разных начальных температурах пороха. Введение 60 кДж пороховой заряд при  $T_0 = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$  повышает дульную скорость поршня на 4 %. Это позволяет компенсировать температурный градиент выстрела при начальных температурах  $-40$  и  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Максимальный прирост дульной скорости поршня по сравнению с

базовым выстрелом при температуре  $T_0 = -40$  °С получен при введении 120 кДж пороховой заряд и составил 6,5 %. Дальнейшее повышение уровня энерговода в порох вызывает преждевременное форсирование поршня со снижением баллистических параметров выстрела. Показано, что порох с меньшей толщиной горящего свода позволяет добиться большего прироста дульной скорости (на 6,6 %).

*Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0032.*

### **Литература**

1. Michalski, J. Closed Vessel Investigation of Propellant Ignition Process with Using Capillary Plasma Generator / J. Michalski, Z. Leciejewski // Problems of mechatronics armament, aviation, safety engineering. – 2015. – Vol. 6, no. 1 (19). – P. 19–26.

2. Ищенко, А. Математическая модель и программный комплекс для теоретического исследования внутрибаллистических процессов в ствольных системах / А. Ищенко, В. Касимов. – Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2015. – 72 с.

3. Пат. 149459 Российская Федерация МПК В23К 10/00. Инжектор плазмы для инициирования заряда взрывчатого вещества (ВВ) / А.Н. Ищенко, В.В. Буркин, В.А. Бураков и др. – № 2013151732/02; опубл. 10.01.2015. – 13 с.

4. Исследование схемы электротермохимического управления баллистическими параметрами выстрела / А.Д. Сидоров, В.В. Буркин, А.Н. Ищенко и др. // Сборник материалов IX Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», 21–25 сентября 2016 года, НИИ ПММ ТГУ, г. Томск. – Томск: Томский государственный университет, 2016. – С. 163–165.

5. Анализ горения метательного заряда в условиях электротермохимической технологии метания / В.В. Буркин, А.Н. Ищенко, В.З. Касимов, Н.М. Саморокова, А.Д. Сидоров // Сборник материалов X Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», 3–5 сентября 2018 года, г. Томск. – Томск: Томский государственный университет, 2018. – С. 30–32.

6. Beyer, R.A. Plasma Ignition in a 30-mm Cannon / R.A. Beyer, A.L. Brant // IEEE transactions on magnetics. – 2007. – Vol. 43, no. 1. – P. 294–298.

7. Dursun, T. Effects of projectile and gun parameters on the dispersion / T. Dursun // Defense Science Journal. – 2020. – Vol. 70, no. 2. – P. 166–174.

8. Boulkadid, M.K. Temperature sensitivity of propellant combustion and temperature coefficients of gun performance / M.K. Boulkadid, M. Lefebvre // Central European Journal of Energetic Materials. – 2016. – Vol 13, no 4. – P. 1005–1022.

*Поступила в редакцию 1 июня 2021 г.*

### **Сведения об авторах**

Буркин Виктор Владимирович – кандидат физико-математических наук, зав. сектором прикладной электродинамики, научно-исследовательский институт прикладной математики и механики, Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация.

Дьячковский Алексей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, научно-исследовательский институт прикладной математики и механики, Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация.

Ищенко Александр Николаевич, доктор физико-математических наук, директор научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, г. Томск, Российская Федерация.

Касимов Владимир Зинатович, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией прикладной газодинамики, научно-исследовательский институт прикладной математики и механики, Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация.

Саморокова Нина Михайловна, научный сотрудник, научно-исследовательский институт прикладной математики и механики, Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация.

Сидоров Алексей Дмитриевич, инженер-исследователь, научно-исследовательский институт прикладной математики и механики, Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация, e-mail: aleksid92@gmail.com

Степанов Евгений Юрьевич, научный сотрудник, научно-исследовательский институт прикладной математики и механики, Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация.

---

*Bulletin of the South Ural State University  
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"  
2021, vol. 13, no. 4, pp. 37–43*

---

DOI: 10.14529/mmph210405

### INVESTIGATION OF THE POSSIBILITIES OF INCREASING THE PROJECTILE VELOCITY UNDER THE CONDITIONS OF ELECTROTHERMAL-CHEMICAL IGNITION TECHNOLOGY AS APPLIED TO A MEDIUM-CALIBER INSTALLATION

**V.V. Burkin, A.S. D'yachkovskiy, A.N. Ishchenko, V.Z. Kasimov, N.M. Samorokova, A.D. Sidorov, E.Yu. Stepanov**

*Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

*E-mail: aleksid92@gmail.com*

This paper presents the results of a theoretical study of an unconventional shot scheme using electrothermal-chemical ignition technology in a medium-caliber installation. The law of combustion of propellants has been adapted to the conditions of a shot with the electrothermal-chemical technology of ignition of a propellant charge as applied to a model ballistic machine of medium caliber. The calculated data obtained on a laboratory ballistic smooth-bore installation of small caliber are taken as a basis. Theoretical parametric studies are carried out aimed at determining the capabilities of a shot using the electrothermal-chemical technology of ignition of a combined powder charge in a wide range of input energy at different initial temperatures of the powder charge. The temperature gradient of the muzzle velocity of the projectile at the initial temperatures of the powder charge of  $-40$  and  $+20$  °C without additional energy input has been 4 %. To compensate for it, it is necessary to introduce an additional energy of 60 kJ into the powder charge. The conditions for loading the investigated ballistic installation are determined, which make it possible to achieve a maximum increase in the muzzle velocity of the projectile in comparison with the base shot according to the classical loading scheme using traditional igniters. The theoretical modernization of the powder charge has been carried out to achieve bigger increase in the muzzle velocity of the projectile.

*Keywords: interior ballistics; shot, electrothermal-chemical; combustion rate; increasing muzzle velocity.*

#### References

1. Michalski J., Leciejewski Z. Closed Vessel Investigation of Propellant Ignition Process with Using Capillary Plasma Generator. *Problems of mechatronics armament, aviation, safety engineering*, 2015, Vol. 6, no. 1 (19), pp. 19–26.
2. Ishchenko A., Kasimov V. *Matematicheskaya model' i programmnyy kompleks dlya teoreticheskogo issledovaniya vnutriballisticheskikh protsessov v stvol'nykh sistemakh* (A mathematical model and a software package for a theoretical study of intraballistic processes in barrel systems). Tomsk, Izdatel'skiy dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta Publ., 2015, 72 p. (in Russ.).
3. Ishchenko A.N., Burkin V.V., Burakov V.A., Korol'kov L.V., Stepanov E.Yu., Agafonov S.V. *Inzhektor plazmy dlya initsirovaniya zaryada vzryvchatogo veshchestva (VV)* (Plasma Injector for Initiating an Explosive Charge (Explosive)). Patent RU 149459 U1 Russian Federation, published 10.01.2015, p. 13. (in Russ.).
4. Sidorov A.D., Burkin V.V., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z., Samorokova N.M. *Issledovanie skhemy elektrottermokhimicheskogo upravleniya ballisticheskimi parametrami vystrela* (Study of the scheme of electrothermochemical control of ballistic parameters of a shot). *Sbornik materialov IX Vserossiyskoy konferentsii "Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoy mekhaniki"*, 21–25 sentyabrya 2016 goda, NII PMM TGU, g. Tomsk (Proc. IX All-Russian Conference "Fundamental and

applied problems of modern mechanics”, September 21–25, 2016, Research Institute of PMM TSU, Tomsk), Tomsk, Tomskiy gosudarstvennyy universitet, 2016, pp. 163–165. (in Russ.).

5. Burkin V.V., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z., Samorokova N.M., Sidorov A.D. Analiz goreniya metatel'nogo zaryada v usloviyakh elektrotermokhimicheskoy tekhnologii metaniya (Analysis of the combustion of the propellant charge under the conditions of the electrothermochemical technology of throwing). *Sbornik materialov X Vserossiyskoy konferentsii "Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoy mekhaniki"*, 3–5 sentyabrya 2018 goda, g. Tomsk (Proc. X All-Russian Conference “Fundamental and applied problems of modern mechanics”, September 3–5, 2018, Research Institute of PMM TSU, Tomsk), Tomsk, Tomskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2018, pp. 30–32. (in Russ.).

6. Beyer R.A., Brant A.L. Plasma Ignition in a 30-mm Cannon. *IEEE transactions on magnetics*, 2007, Vol. 43, no. 1, pp. 294–298. DOI:10.1109/TMAG.2006.887689

7. Dursun T. Effects of projectile and gun parameters on the dispersion. *Defense Science Journal*, 2020, Vol. 70, no. 2, pp. 166–174. DOI: 10.14429/dsj.70.14922

8. Boulkadid M.K., Lefebvre M. Temperature sensitivity of propellant combustion and temperature coefficients of gun performance. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2016, Vol. 13, no. 4, pp. 1005–1022.

Received June 1, 2021

### Information about the authors

Burkin Viktor Vladimirovich, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Applied Electrodynamics Sector, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.

D'yachkovskiy Aleksey Sergeevich, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Senior Staff Scientist, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8553-6645>

Ishchenko Aleksandr Nikolaevich, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Head of Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.

Kasimov Vladimir Zinatovich, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.

Samorokova Nina Mikhailovna, Staff Scientist, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.

Sidorov Aleksey Dmitrievich, research engineer, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8054-6390>, e-mail: [aleksid92@gmail.com](mailto:aleksid92@gmail.com)

Stepanov Evgeniy Yur'evich, Staff Scientist, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.