



МИНОБРНАУКИ РФ  
Национальный исследовательский  
Томский государственный университет  
НИИ прикладной математики и механики  
Томского государственного университета  
Физико-технический факультет



**Материалы XI Всероссийской научной конференции  
с международным участием  
«Актуальные проблемы современной механики сплошных сред  
и небесной механики – 2021»**

г. Томск, 17–21 ноября 2021 г.

**Proceedings of the XI All-Russian Scientific Conference with international  
participation «Current issues of continuum mechanics and celestial  
mechanics – 2021», November, 17–21, 2021**

Томск-2022

УДК 539.3.004  
ББК 22.25; 22.251.22.62  
М43

**Материалы** XI Всероссийской научной конференции с международным участием М43 «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» 17–21 ноября 2021 г.: Материалы конференции / под ред. М.Ю. Орлова. – Томск. 2022. – 414 с.

ISBN 978-5-6047451-2-0

Представлены материалы конференции молодых ученых «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», прошедшей 17–21 ноября 2021 г.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов.

**УДК 539.3.004**  
**ББК 22.25; 22.251.22.62**

ISBN 978-5-6047451-2-0

© Томский государственный университет, 2022

Editor  
Maxim Yu. Orlov  
National Research Tomsk State University  
Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics  
36 Lenin prospect  
Tomsk, 634050  
Tomsk Region  
Russian Federation

E-mail: orloff\_m@mail.ru

To learn more about the Conference Proceeding, please visit the webpage:  
[www.cimcm.tsu.ru](http://www.cimcm.tsu.ru)

Proceedings of the XI All-Russian Scientific Conference with international participation «Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics – 2021», November, 17–21, 2021



EDITOR  
Maxim Yu. Orlov  
National Research Tomsk State  
University  
Research Institute of Applied  
Mathematics and Mechanics of Tomsk  
State University  
Tomsk, Russia

*Sponsoring organizations*

The Ministry of Education and Science Russia  
Russian Fund of Basic Research  
National Research Tomsk State University

© Tomsk State University  
Printed in the Russian Federation

Proceedings of the XI All-Russian Scientific Conference with international participation «Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics – 2021», November, 17–21, 2021. The conference proceedings / ed. M.Yu. Orlov. – Tomsk. 2022. – 414 p.

ISBN 978-5-6047451-2-0

For scientific worker, the teachers, graduate student and students.

© Tomsk State University, 2022

## References

1. *Baganov A.P., Butov V.G., Nosov G.V., Nosova M.G., Sinyaev S.V., Solonenko V.A.* Electro-magnetic catapult for launching heavy UAVs (drones) from small vessels. Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and mechanics. №71 .2021, pp. 25–34. DOI 10.17223/19988621/71/3.
2. *Volodymyr Chumakov, Oleksandr Stolarchuk.* Simulation and Comparative Analysis of Electrodynamic Railguns for Large Masses Acceleration: Railguns without Biasing System. American Journal of Aerospace Engineering. Vol. 4, No. 2, 2016, pp. 22–26.
3. *Zeyang Zhou, Jun Huang.* An optimization model of parameter matching for aircraft catapult launch. Chinese Journal of Aeronautics. - 2020. Vol. 33, Issue 1, p. 192–193.
4. *Knopfel G.* *Super-strong pulsed magnetic fields.* M.: Mir, 1972, 392 p.
5. *Afonin A.G., Butov V.G., Panchenko V.P., Sinyaev S.V., Solonenko V.A., Shvetsov G.A., Yakushev A.A.* Pulsed magnetohydrodynamic generator of high power on solid (powder) fuel of a new generation / PMTF 2018. Vol. 59, № 6, pp. 75–87.

## ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ВЫСТРЕЛА В УСЛОВИЯХ ИЗНОШЕННОЙ СТВОЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

**А.Д. Сидоров, А.Н. Ищенко, Н.М. Саморокова, Е.Ю. Степанов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: aleksid92@gmail.com

**Ключевые слова:** давление форсирования, дульная скорость, электротермохимический.

**Аннотация.** Проведены модельные расчеты базового выстрела при уменьшении давления форсирования, вызванным износом гладкоствольной системы. Это позволило смоделировать снижение дульной скорости поршня и максимального давления выстрела. Продемонстрирован положительный эффект применения электротермохимической технологии управления воспламенением и горением заряда в условиях пониженного давления форсирования. Определен уровень вводимой энергии для достижения необходимой дульной скорости поршня без превышения давления.

## POSSIBILITIES OF AN ELECTROTHERMAL CHEMICAL SHOT IN A WEARED OUT BARREL SYSTEM

**A. Sidorov, A. Ishchenko, N. Samorokova, E. Stepanov**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: aleksid92@gmail.com

**Keywords:** boost pressure, muzzle velocity, electrothermal chemical.

**Abstract.** Model calculations of the base shot with a decrease in boost pressure caused by wear of the smooth-bore system have been carried out. This made it possible to simulate a decrease in the muzzle velocity of the piston and the maximum pressure of the shot. The positive effect of using the electrothermochemical technology for controlling the ignition and combustion of a charge under conditions of a reduced boost pressure has been demonstrated. Determined the level of input energy to achieve the required muzzle velocity of the piston without overpressure.

**Введение.** Каждый артиллерийский ствол в процессе стрельбы постепенно изнашивается, что приводит к снижению баллистических парамет-

ров выстрела: максимального давления и дульной скорости поршня. При значительном падении скорости (5–10 %) ствол перестает быть частью боевой машины. В этом случае говорят, что ствол изношен, хотя вообще из него можно стрелять. Для проведения баллистических исследований важно сохранение дульной скорости поршня на лабораторном стволе при большом настреле. Существуют разные способы повышения износостойкости ствольных систем и продления срока службы орудия. Например, применение порохов с меньшей температурой горения, использование тугоплавких оружейных металлов, лейнирование канала ствола. Для уменьшения трения пары «снаряда – ствол» ведущие пояски снарядов изготавливают из керамических и пластичных материалов с малым коэффициентом трения [1]. Наиболее перспективным способом снижения трения в настоящее время считается использование специальных антифрикционных составов, активно применяемых в различных отраслях промышленности [2].

Для сохранения дульной скорости на изношенном стволе можно менять условия заряжания за счет использования камеры сгорания большего объема и увеличения навески пороха. В данной работе предложен новый способ продления срока службы орудия – применение электротермохимической (ЭТХ) технологии управления процессами газообразования путем введения электроразрядной плазмы (ЭП) в пороховой заряд вместо традиционного воспламенителя – капсюля. Данный способ не требует изменения условий заряжания: объема камеры сгорания и навески пороха.

Цель работы. Проведение теоретических исследований возможностей применения ЭТХ технологии управления воспламенением и горением порохового заряда в условиях изношенной баллистической установки. Для достижения поставленной цели требуется решения следующих задач. Смоделировать износ ствольной системы путем изменения величины давления форсирования. Определить уровень энерговодвда, позволяющий компенсировать снижение дульной скорости поршня.

Результаты параметрических исследований. Теоретические исследования проводились с использованием программного комплекса [3], в основе которого лежит математическая модель внутрибаллистических процессов в ствольных системах. В расчетах выбраны условия заряжания, соответствующие классической схеме выстрела. Модельная гладкоствольная баллистическая установка калибром 30 мм, масса поршня 100 г, плотность заряжания  $\Delta = 0.73 \text{ г/см}^3$ , начальная температура заряда  $T_0 = +20 \text{ }^\circ\text{C}$ , воспламенитель – капсюль. Считается, что горение заряда начинается сразу по всей поверхности с момента инициирования.

Износ ствола смоделирован при помощи снижения давления форсирования. Трение пары поршень – ствол постоянно. Начальное давление форсирования 40 МПа. Дульная скорость поршня из изношенного ствола упала на 5%. При этом давление форсирования снизилось на 75% до 10 МПа. Согласно лабораторной практике, такой износ ствола калибром 30 мм мо-

жет произойти при проведении более 400 экспериментов, при этом внутренний диаметр казенного среза (где располагается поршень) увеличится на величину порядка 0.4–0.5 мм. Кривые изношенного ствола «отстают» по времени от кривых нового ствола [4].

Результаты расчетов показали, что наибольшему износу подвержен торцевой казенный срез ствола, поскольку там развиваются максимальные нагрузки: температура и давление газа. Поэтому именно на этом участке требуется строгий контроль износа в процессе эксплуатации реальной установки. Наибольшие значения давления и температуры приходится на казенный срез по сравнению со всей длиной ствола, что подтверждает интенсивность износа. Полученные данные хорошо согласуются с исследованиями износа реальной пушки среднего калибра [5].

Для сохранения начальной дульной скорости поршня (1781 м/с) на изношенном стволе без изменения условий заряжания была применена ЭТХ-технология выстрела. Повысить дульную скорость получилось за счет повышения газообразования в камере, вызванного взаимодействием пороха и плазмы. Введение дополнительной энергии  $Q \approx 15$  кДж в заряд в виде ЭП позволило повысить дульную скорость поршня до начального значения без превышения максимального давления.

Дальнейшая эксплуатация установки также будет сопровождаться износом. При проведении определенного количества выстрелов введения 15 кДж в заряд будет недостаточно для сохранения начальной дульной скорости (1781 м/с). В этом случае для повышения газопритока необходимо увеличение уровня энерговода в заряд. Это позволит компенсировать снижение дульной скорости поршня. В частности, для компенсации снижения дульной скорости на  $\Delta V_d = 7.0$  % необходимо введение  $Q \approx 30$  кДж в заряд в виде ЭП.

Выводы. В данной работе продемонстрирован теоретический подход к продлению эксплуатации изношенной модельной установки калибром 30 мм путем применения ЭТХ-технологии управления воспламенением и горением заряда. Данный способ не требует изменение условий заряжания. Показано, что введение плазмы в заряд существенно не влияет на износ модельной установки. Определен уровень энерговода необходимого для компенсации снижения дульной скорости поршня, вызванного износом ствольной системы.

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

#### Литература

1. Повышение живучести стволов артиллерийского оружия путем использования полимеров в конструкции снарядов / А.М. Пушкарёв [и др.] // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. 2018. № 11. С. 145–153.
2. Карюкин С. Подход к обеспечению живучести стволов артиллерийских орудий / С. Карюкин, О. Митрохин // Военная мысль. 2012. №1. С. 72–78.

3. *Ищенко А.Н.* Математическая модель и программный комплекс для теоретического исследования внутрибаллистических процессов в ствольных системах / А.Н. Ищенко, В.З. Касимов. Томск: Издательский дом Том. гос. ун-та, 2015. 72 с.

4. *Агошков О.Г.* Динамика вылета снаряда полевого артиллерийского орудия с учетом износа канала ствола // О.Г. Агошков, В.Ф. Захаренков, И.Н. Паляничка // Сборник материалов Всероссийской конференции «Внутрикамерные процессы и горение в установках на твёрдом топливе и в ствольных системах (ICOC-2008)». 2008. С. 302–312.

5. *Букаси А.* Особенности учета износа канала ствола при моделировании процессов функционирования подсистемы «танковая пушка – снаряд» / А. Букаси // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2017. Т. 1. С. 172–174.

## References

1. *Pushkarev A.M.* (2018). Increasing the survivability of artillery weapon barrels by using polymers in the design of projectiles. News of TulGU. Ser.: Technical science, 11: 145–153.

2. *Karyukin S.* (2012). An approach to ensuring the survivability of artillery barrels. Military Thought, 1:72–78.

3. *Ishchenko A.N., Kasimov V.Z.* (2015). Mathematical model and software package for the theoretical study of intraballistic processes in stem systems. Tomsk State University Publishing House, Tomsk.

4. *Agoshkov O.G.* (2008). Dynamics of the launch of a projectile of a field artillery gun taking into account the wear of the bore. Collection of materials of the International Conference On Chelation (ICOC-2008): 302–312.

5. *Bukasi A.* (2017) Peculiarities of accounting for barrel bore wear in modeling the functioning of the "tank gun – projectile" subsystem. Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality". 1:172–174.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА НА ФОРМИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОГО ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТВЕРДОМ ГОРЮЧЕМ МАТЕРИАЛЕ

**Н.П. Скибина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: [uss.skibina@gmail.com](mailto:uss.skibina@gmail.com)

**Ключевые слова:** математическое моделирование, нестационарное течение, сопряженный теплообмен, аэродинамические испытания, легкоплавкое твердое горючее.

**Аннотация.** В работе изложены результаты комплексного экспериментально-теоретического исследования процессов, протекающих при взаимодействии сверхзвукового потока газа в канале с внутренней поверхностью твердого легкоплавкого горючего. Описаны проведенные аэродинамические испытания и особенности устройств, используемых для регистрации температуры и давления. Представлена физико-математическая модель для моделирования течения газа с учетом сопряженного теплообмена между потоком и твердым телом. Результаты экспериментов сопоставлены с соответствующими данными, полученными в ходе математического моделирования. Установлена связь между особенностями течения в пристеночной области, возникающими вследствие взаимодействия ударных волн, с формированием неоднородного поля температуры в твердом теле.