



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

эффицентов осевой силы и момента крена расчетные и экспериментальные. По итогам этого сравнения выбрана сетка с 6.3 млн ячеек. На рис. 3 приведены сходимость сетки при угле атаки  $\alpha=0^\circ$ .

Для проверки достоверности численного исследования проводились расчеты на разных углах атаки после того мы выбрали среднюю сетку. На рис. 4 приведены исследования для проверки достоверности.

В ходе выполнения работы проведено численное моделирование аэродинамики тестовой оперенной модели ракеты с использованием коммерческой программы Ansys-Fluent. Полученные результаты хорошо совпадают с данными испытаний в аэродинамической трубе. В дальнейшем планируется численное моделирование обтекания ракеты со свободно вращающимся хвостовым оперением.

#### Литература/References

1. Blair A.B. Wind-Tunnel Investigation at Supersonic Speeds of a Remote-Controlled Canard Missile with a Free-Rolling-Tail Brake Torque System," NASA, Virginia, 1985.
2. Erhan feyzioglu, "Roll characteristics and shape optimization of the free-rotate tail-fins on a canard-controlled missile", middle east technical university, 2014.
3. Jiawei Zhang, Juanmian Lei and Jianping Niu, "Numerical investigation of aerodynamic characteristics of free-spinning tail projectile with canards roll control", Proc IMechE Part G: J Aerospace Engineering, 2020.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОПЛОТНЫХ ТОПЛИВ В УСЛОВИЯХ МАНОМЕТРИЧЕСКОЙ БОМБЫ

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

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: rogaev@ftf.tsu.ru

**Ключевые слова:** горение топлив, высокоплотные топлива, манометрическая бомба, газодинамика, внутренняя баллистика.

**Аннотация.** Во внутренней баллистике ствольных систем перспективным является направление повышения дульной скорости снаряда за счет использования высокоэнергетических топлив, в составе метательного заряда. Для использования высокоэнергетических топлив в ствольных системах необходимо проведение манометрических исследований, направленных на изучение законов горения данных топлив в постоянном объеме и определение основных энергетических характеристик. В работе проведено теоретическое исследование, посвященное изучению горения высокоплотного топлива в манометрической бомбе. Рассмотрены различные геометрические компоновки контейнера для исследования высокоплотных топлив в постоянном объеме.

# THEORETICAL STUDY OF HIGH-DENSITY PROPELLANTS COMBUSTION UNDER CLOSED VESSEL CONDITIONS

K. Rogaev, V. Burkin, A. Diachkovskiy, A. Ishchenko, V. Kasimov,  
N. Samorokova, A. Sidorov, E. Stepanov

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: rogaev@ftf.tsu.ru

**Keywords:** propellants combustion, high-density propellants, closed vessel, gas dynamics, internal ballistics.

**Abstract.** In the internal ballistics of barrel systems, increasing the muzzle velocity of the projectile through the high-energy propellants, as part of the throwing charge, is promising. The use of high-energy propellants in barrel systems, it is necessary to conduct pressure studies aimed at burning laws of these propellants in a constant volume and determining the main energy characteristics. In this work, a theoretical study of high-density propellants combustion in a closed vessel was carried out. For research, it is assumed that the propellant disperses into particles that are burned out in a constant volume. Closed vessels of different geometrical arrangements for the study of high-density propellants in a constant volume are considered.

В области ствольных систем для повышения дульной скорости метаемого элемента перспективным является применение схемы заряжания с присоединенным зарядом, состоящим из модельных высокоэнергетических высокоплотных быстрогорящих топлив [1–2]. Схема выстрела с присоединенным зарядом при одинаковом максимальном давлении может обеспечить прирост скорости метаемого элемента, по сравнению с классической схемой выстрела. Для оптимальной реализации возможностей данной нетрадиционной схемы, необходима разработка как новых видов ствольных установок, так и новых топлив удовлетворяющим требованиям по энергетике и скорости горения.

Таблица 1. Результаты расчета манометрических испытаний

№	$\omega$ , г	$d_k$ , см	$l_k$ , см	$l_T$ , см	$\Delta$ , г/см <sup>3</sup>	$P_m$ , МПа
1	32	6	0.84	0.84	0.24	280.9
2	24	6	0.84	0.63	0.17	199.1
3	16	6	0.84	0.42	0.11	126.9
4	32	5	1.21	1.21	0.24	280.8
5	24	5	1.21	0.91	0.17	199.1
6	16	5	1.21	0.60	0.11	126.9
7	32	4	1.89	1.89	0.24	280.9
8	24	4	1.89	1.41	0.17	199.3
9	16	4	1.89	0.94	0.11	126.9
10	32	3	3.35	3.35	0.24	280.9
11	24	3	3.35	2.52	0.17	199.2
12	16	3	3.35	1.68	0.11	126.9

Для проверки разработанных топлив необходимо проведение предварительных испытаний в условиях постоянного объема (манометрическая

бомба). Горение топлив в условиях манометрической бомбы позволяет определить энергетику топлива (по аналогии с силой пороха), ударную адиабату и послынную скорость горения, а также оценить механизм образования поверхности.

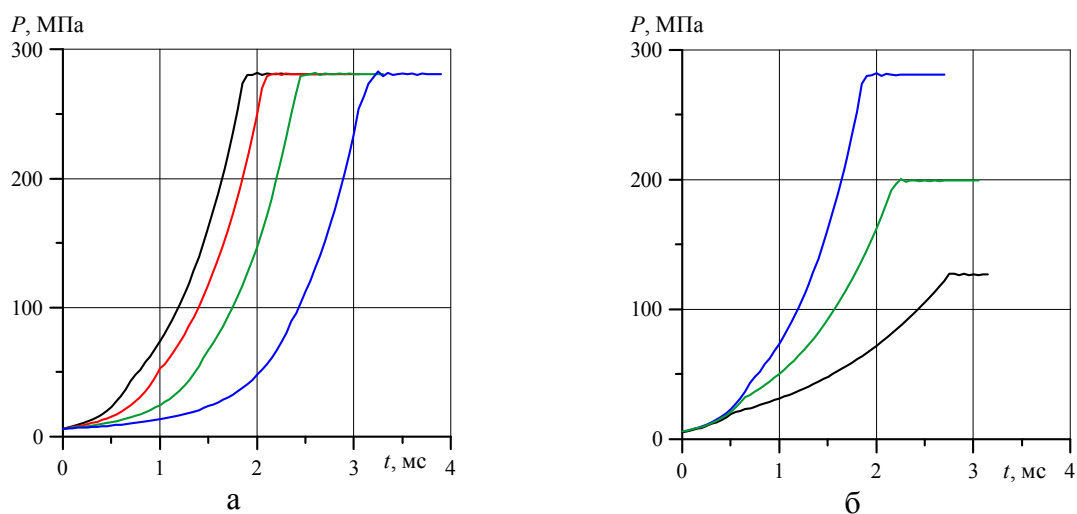


Рис. 1. Давление в камере заряжения от времени:  
 а – при использовании контейнеров разных диаметров : — — — —  $d_k = 3$  см; — — — —  $d_k = 4$  см;  
 — — — —  $d_k = 5$  см; — — — —  $d_k = 6$  см; б – при использовании разных плотностей заряжения: — — — —  
 $\Delta = 0.24$  г/см<sup>3</sup>; — — — —  $\Delta = 0.17$  г/см<sup>3</sup>; — — — —  $\Delta = 0.11$  г/см<sup>3</sup>

В данной работе проведено теоретическое манометрическое исследование горения высокоплотных топлив, позволившие определить, условия заряжения при использовании контейнеров различного диаметра.

Для математического моделирования использовался программный комплекс, разработанный в НИИ ПММ ТГУ. Он 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. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1.

В исследовании рассмотрена манометрическая бомба с камерой заряжения объемом 165 см<sup>3</sup>. Модельное высокоплотное топливо располагается в несгораемом контейнере, суммарный объем занимаемый контейнером и топливом массой 32 г составлял 29 см<sup>3</sup>. При уменьшении количества топлива в контейнере объем занимаемый контейнером оставался неизменным. Коэффициенты в законе горения были определены в работе [4] и были использованы при определении условий заряжения.

Как показал газодинамический анализ, уменьшение диаметра контейнера, в котором размещается топливо при сохранении плотности заряжения, приводит к увеличению длительности горения топлива, что позволяет более точно определить такие параметры как скорость послынного горения частиц и скорость диспергирования образца (рис. 1, а). Использование раз-

личной плотности заряжения позволит определить энергетику топлива (по аналогии с силой пороха) и ударную адиабату (рис. 1, б).

В результате проведенного теоретического параметрического исследования определены условия заряжения при использовании высокоплотного топлива в манометрической бомбе при различных плотностях заряжения и диаметрах контейнеров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10054, <https://rscf.ru/project/21-79-10054/>

### Литература

1. *Xin Lu, Yanhuang Zhou, Yonggang Yu* // Experimental and numerical investigations on traveling charge gun using liquid fuels // *J. Appl. Mech.* 2011. Вып. 78. № 5. С. 051002-1–051002-6.
2. *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.
3. *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*, 2021. № 69. С. 127–138.

### References

1. *Xin Lu, Yanhuang Zhou, Yonggang Yu.* Experimental and numerical investigations on traveling charge gun using liquid fuels. *J. Appl. Mech.* 2011. Vol. 78, Is. 5. P. 051002-1–051002-6.
2. *Ermolaev B.S., Roman'kov A.V., Sulimov A.A.* Ballistic similarity for gun shots with a traveling charge. *Combustion and Explosion.* 2019. Vol. 12, Is. 4. P. 138–144. (in Rus.)
5. *Rogaev K.S., Ishchenko A.N., Burkin V.V., D'yachkovskiy A.S., Sidorov A.D., Stepanov E.Yu.* A study of the combustion of high-density propellants in a model ballistic installation. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika.* 2021. Is. 69. P. 127–138.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РЕЛЬСОВОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ КАТАПУЛЬТЫ ДЛЯ ЗАПУСКА ТЯЖЕЛЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**В.А. Светлицкая, С.В. Синяев, Т.А. Тишина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: [ssv@niipmm.tsu.ru](mailto:ssv@niipmm.tsu.ru)

**Ключевые слова:** многорельсовый ускоритель, комбинированный источник энергии, допустимое ускорение, длина разгона, газодинамическое торможение якоря.

**Аннотация.** Представлены результаты математического моделирования работы оригинальной схемы электромагнитной катапульти для запуска беспилотного летательного аппарата (дрона). Ее основными элементами являются: многорельсовый ускоритель с разгоняющим дрон металлическим якорем, комбинированный источник энергии на основе мощного импульсного МГД-генератора, повышающего ток трансформатора и устройства торможения якоря после запуска дрона. Модель описывает поэтапную работу катапульти с момента включения импульсного МГД-генератора, разгона дрона и до последующего газодинамического торможения якоря, утилизации остаточной электромагнитной энергии в накопителе и ускорителе.