

Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского КФУ  
Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН  
Научно-образовательный математический центр Приволжского федерального округа  
Академия наук Республики Татарстан  
Российский национальный комитет по теоретической и прикладной механике

---

**Всероссийская научная конференция  
с международным участием  
«Актуальные проблемы механики сплошной среды – 2020»,  
посвященная 120-летию Х.М. Муштари, 110-летию К.З. Галимова,  
110-летию Г.Г. Тумашева, 100-летию М.С. Корнишина, 90-летию И.Г. Терегулова**

*(28 сентября – 2 октября 2020 г., Казань)*

**Материалы докладов**

---



Казанский (Приволжский) федеральный университет

2020

*Издание осуществлено за счет средств программы развития Регионального научно-образовательного математического центра Приволжского федерального округа, соглашение № 075-02-2020-1478.*

**УДК 531/534**

**ББК 22.2**

**Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы механики сплошной среды — 2020», 28 сентября — 2 октября 2020 г., Казань. — Казань: Казанский университет; изд-во Академии наук РТ, 2020. — 475 с.**

Сборник содержит материалы докладов, представленных на Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы механики сплошной среды — 2020».

Материалы сборника предназначены для научных сотрудников, аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов, специализирующихся в области механики, прикладной математики и математического моделирования.

**УДК 531/534**

**ББК 22.2**

## **Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы механики сплошной среды — 2020»**

Сборник включает в себя материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы механики сплошной среды — 2020».

### **Организаторы конференции**

- Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского Казанского федерального университета
- Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН
- Научно-образовательный математический центр Приволжского федерального округа
- Академия наук Республики Татарстан
- Российский национальный комитет по теоретической и прикладной механике

### **Организационный комитет конференции**

**Сопредседатели:** Губайдуллин Д.А., Коноплев Ю.Г., Салахов М.Х.

**Заместители сопредседателей:** Аганин А.А., Поташев К.А., Султанов Л.У., Тазюков Б.Ф.

**Члены комитета:** Великанов П.Г., Галимов Н.К., Гафиятов Р.Н., Гиниятуллин Р.Р., Давлетшин А.И., Камалутдинов А.М., Марданов Р.Ф., Никифоров А.А., Нуриев А.Н., Саченков О.А., Скворцова З.В., Ткаченко Л.А., Турилова Е.А., Фахрутдинов Л.Р., Федоров Ю.В., Якупов Н.М., Якупов С.Н.

**Технический секретарь:** Вильданова Н.Р.

### **Программный комитет конференции**

Губайдуллин Д.А., Коноплев Ю.Г., Нигматулин Р.И., Фомин В.М., Аганин А.А., Аннин Б.Д., Бабешко В.А., Баженов В.Г., Бережной Д.В., Бураго Н.Г., Буренин А.А., Газизов Р.К., Гайфуллин А.М., Галиев Ш.У., Ганиев Р.Ф., Гильманов А.Н., Горячева И.Г., Губайдуллин А.А., Егоров А.Г., Ильгамов М.А., Индейцев Д.А., Каюмов Р.А., Крайко А.Н., Крысько В.А., Куликовский А.Г., Левин В.А., Липанов А.М., Ломакин Е.В., Мазо А.Б., Маклаков Д.В., Матвеев В.П., Морозов Н.Ф., Мулюков Р.Р., Паймушин В.Н., Поташев К.А., Ребров А.К., Робинсон Н., Роговой А.А., Серазутдинов М.Н., Султанов Л.У.

15. Буренин А.А. О согласовании механизмов роста необратимых деформаций полого шара при всестороннем сжатии / А.А. Буренин, К.Н. Голимзянова, Л.В. Ковтанюк, Г.А. Панченко // ДАН. – 2018. – Т. 482, №4. – С.403-406.

#### ON ENSURING THE CONTINUITY OF IRREVERSIBLE DEFORMATIONS AT THE ADVANCING BOUNDARIES OF PLASTIC FLOW REGIONS

A.A. Burenin

*The problem of ensuring the continuity of irreversible deformations at the elastoplastic boundary arises when irreversible deformations grow in the deformation regions preceding the plastic flow, due to taking into account the viscous properties of the deformable material in the form of creep deformations. In this way, creep strains turn out to be the initial irreversible strains with their further growth during plastic flow. Thus, the elastic-plastic boundaries turn out to be a place where the mechanism of the production of irreversible deformations changes from viscous (creep) to plastic (flow) and vice versa during unloading. Ensuring the continuity of irreversible strains and their rates of change is a nontrivial task of the theory of large strains. The message discusses some approaches to solving this problem.*

Keywords: creep, plate, large deformations.

УДК 531.57

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВЫСТРЕЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОПЛОТНЫХ ТОПЛИВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСТАНОВКАМ СРЕДНЕГО КАЛИБРА

В.В. Буркин<sup>1</sup>, А.С. Дьячковский<sup>2</sup>, А.Н. Ищенко<sup>3</sup>, К.С. Рогаев<sup>4</sup>, А.Д. Сидоров<sup>5</sup>,  
Е.Ю. Степанов<sup>6</sup>

<sup>1</sup> v.v.burkin@mail.ru; НИ ТГУ

<sup>2</sup> lexokha@mail.ru; НИ ТГУ

<sup>3</sup> ichan@niipmm.tsu.ru; НИ ТГУ

<sup>4</sup> rogaev@ftf.tsu.ru; НИ ТГУ

<sup>5</sup> aleksid92@gmail.com; НИ ТГУ

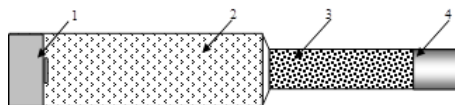
<sup>6</sup> stepanoveu@mail.ru; НИ ТГУ

*Проведены параметрические исследования возможностей выстрела с использованием высокоплотного топлива в режиме присоединенного заряда. Определены геометрические параметры перспективного образца ствольной системы, позволяющего использовать высокоплотное топливо в режиме присоединенного заряда. Представлены рекомендации по модернизации высокоплотного топлива для получения дополнительного прироста дульной скорости метаемого элемента. Определены условия заряжания, позволяющие добиться максимального повышения дульной скорости метаемого элемента при использовании модельного высокоплотного топлива по сравнению с выстрелом по классической схеме заряжания.*

**Ключевые слова:** внутренняя баллистика, высокоплотное топливо, горение топлива.

Исследование новых перспективных схем заряжания является одним из основных направлений внутренней баллистики позволяющим повысить дульную скорость метаемого элемента (МЭ). Наличие «эффекта насыщения» ограничивает ско-

рость МЭ в классической схеме выстрела при использовании порохового метательного заряда (МЗ), поскольку максимальная скорость метания при сгорании МЗ определяется предельной скоростью разлета пороховых газов в вакууме. Традиционные способы повышения скорости МЭ 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 соединенным зарядом (ПЗ), используемым в выстреле вместе с основным зарядом [2]. ПЗ представляет из себя моноблочный высокоэнергетический дополнительный заряд, состоящий из новых высокоэнергетических топлив и располагаемый за МЭ в стволе (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема выстрела с применением ПЗ. 1 – воспламенитель; 2 – МЗ; 3 – ПЗ; 4 – МЭ

Включение в заряд высокоплотного топлива позволяет увеличить суммарную массу заряда и, как следствие, повысить среднюю плотность заряжения. В процессе выстрела сначала происходит инициирование МЗ. Спустя время, определяемое импульсом давления на фронте горения, воспламеняется ПЗ, горение происходит в торцевом режиме при движении по каналу ствола МЭ. Применение схемы выстрела с ПЗ приводит к перераспределению энергии продуктов сгорания в заснарядном пространстве, что позволяет повысить давление на МЭ без увеличения давления в камере сгорания. При использовании схемы с ПЗ появляется возможность реактивного подгона МЭ в стволе. Перечисленные преимущества позволяют повысить дульную скорость МЭ без повышения максимального давления на дно канала ствола [3]. Целью данной работы является повышение дульной скорости МЭ при сохранении максимального давления на дно канала ствола путем применения высокоплотных топлив в виде ПЗ в условиях выстрела для модельной баллистической установки калибром 120 мм. Для исследования возможностей повышения скорости метания использован теоретический подход. Исследования проводились с использованием программного комплекса, в основе которого лежит математическая модель газодинамического расчета внутрибаллистических процессов в ствольных системах, разработанная в НИИ ПММ ТГУ [4]. В НИИ ПММ ТГУ на лабораторной баллистической установке малого калибра [5] проведена серия экспериментов с применением высокоплотных топлив в режиме ПЗ. По итогам анализа результатов серии экспериментов определены законы горения топлива. Спрогнозированы баллистические характеристики горения высокоплотного топлива применительно к гладкоствольной баллистической установке среднего калибра. Данное исследование направлено на демонстрацию положительного эффекта использования модельного высокоплотного топлива в артиллерийских ствольных системах на примере модельной гладкоствольной баллистической установки калибром 120 мм. В качестве начальной точки исследования по повышению дульной скорости МЭ принят следующий базовый выстрел: масса МЭ 9 кг, масса МЗ 7.9 кг, максимальное давление в канале ствола 560 МПа, дульная скорость 1575 м/с. Используемое высокоэнергетическое топли-

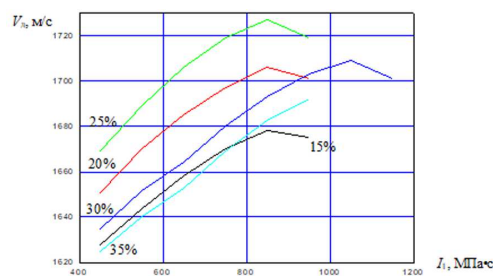
во загорается в процессе движения по каналу ствола через некоторое время после воспламенения МЗ, определяемое импульсом давления на фронте горения  $I_1$ . Закон горения топлива выглядит следующим образом:

$$U = B_1 P^v$$

при  $I > I_1$ , где  $B_1$  – коэффициент закона скорости горения,  $P$  – давление,  $v$  – показатель степени. Считается, что при горении топлива на фронте помимо газообразных продуктов горения образуются частицы. Начальная степень превращения топлива в газ  $\Psi = 0.1$ . Для частиц задается степенной закон горения:

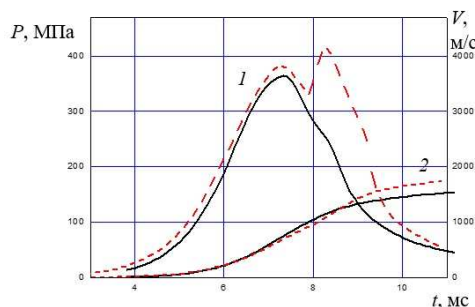
$$V = V_1 P^v$$

где  $V_1$  – единичная скорость горения,  $v$  – показатель степени закона горения. Параметрические исследования проведены с учетом следующих допущений. МЗ состоит из зерненого семиканального и трубчатого одноканального пороха, равномерно расположенных по объему камеры сгорания. Начальная температура заряда  $T_0 = +21^\circ \text{C}$ . Горение высокоплотного топлива происходит в одну стадию. Топливо полностью сгорает в стволе за время выстрела. Массы топлива и частей МЗ и импульс давления на фронте горения топлива подбирались таким образом, чтобы реализовывалось базовое давление 560 МПа. Масса топлива варьируется: 15, 20, 25, 30 и 35 % от общей массы МЗ. Импульс меняется от 450 до 1150 МПа·с. В качестве ствольных системы использовалась модельная гладкоствольная установка калибром 120 мм. Результаты теоретических параметрических исследований представлены на рис. 2. Установлено, что наибольшее повышение дульной скорости достигается при 25 % доле массы высокоплотного топлива от массы МЗ. Дальнейшее увеличение массы высокоплотного топлива за счет снижения массы МЗ и перераспределение масс его частей (для сохранения базового давления) приводит к недогоранию топлива за время выстрела в стволе. При этом масса МЭ увеличивается на массу недогоревшего топлива, что не дает возможности дальнейшего повышения дульной скорости.

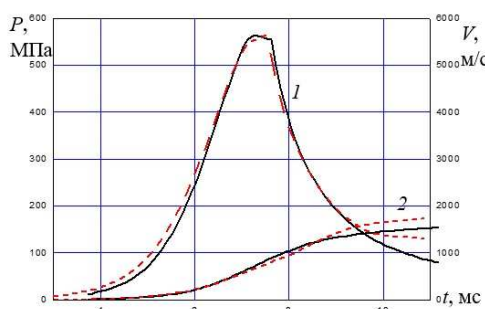


**Рис. 2.** Зависимости дульной скорости от импульса давления на фронте горения

Изменение импульса давления на фронте горения (задержка воспламенения), позволяет регулировать процесс зажигания высокоплотного топлива. Воспламенение топлива после пика давления в камере сгорания позволяет перераспределить энергию в заснарядном пространстве и повысить дульную скорость. Дальнейшее увеличение времени задержки воспламенения приводит к недогоранию топлива в канале ствола и уменьшению дульной скорости (рис.2). На рис. 3 представлены временные зависимости давления газа на дне МЭ и скорости МЭ. На рис. 4 временные



**Рис. 3.** Временные зависимости давления газа на дне МЭ (1) и скорости МЭ (2)



**Рис. 4.** Временные зависимости давления газа в камере сгорания (1) и скорости МЭ (2)

зависимости давления газа в камере сгорания и скорости МЭ для выстрела по классической схеме заряжания и для выстрела с ПЗ с импульсом  $I_1=850$  МПас массой 25 % от массы МЗ (достижение максимальной дульной скорости). Второй всплеск давления после порохового максимума говорит о начале горения топлива (рис. 3).

В работе проведены теоретические параметрические исследования схемы выстрела с ПЗ, состоящего из высокоплотного топлива. Показана возможность повышения дульной скорости МЭ в условиях установки калибром 120 мм. Наибольшее повышение дульной скорости МЭ до 12.7 % получено при использовании ПЗ, где масса топлива составляет 25 % от массы МЗ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-00028).

## Литература

1. Horst A. W. *A Brief Journey Through the History of Gun Propulsion* / A. Horst. – ARL-TR-3671, 2005.
2. Дьячковский А. С. Особенности диспергирования и горения пастообразного топлива в баллистических экспериментах / А. С. Дьячковский [и др.] // Сборник материалов IX Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», посвященной 55-летию полета Ю. А. Гагарина, г. Томск. – 2016. – С. 157–158.
3. Ермолаев Б. С. Присоединенный высокоплотный заряд конвективного горения в комбинированной схеме выстрела: Новые результаты / Б. С. Ермолаев, А. А. Сулимов, А. В. Романьков // Горение и взрыв. – 2013. – № 6. – С. 206–210.
4. Ищенко А. Математическая модель и программный комплекс для теоретического исследования внутрибаллистических процессов в ствольных системах / А. Ищенко, В. Касимов. – Томск : Издательский дом Томского гос. ун-та, 2015. – 72 с.

5. Буркин В. В. *Баллистический ударный стенд* / В. В. Буркин [и др.] // Патент на полезную модель. – Заявка № – 2018111538 от 30.03.2018.

#### DETERMINATION OF ULTIMATE CAPABILITIES OF A SHOT USING HIGH-DENSITY PROPELLANTS IN RELATION TO MEDIUM-CALIBER INSTALLATIONS

V.V. Burkin, A.S. Diachkovskiy, A.N. Ishchenko, K.S. Rogaeв, A.D. Sidorov, E.Yu. Stepanov

*Parametric studies of the capabilities of a shot using high-density fuel in the attached charge mode have been carried out. The geometrical parameters of a promising sample of the barrel system, allowing the use of high-density fuel in the attached charge mode, have been determined. Recommendations for the modernization of high-density fuel to obtain an additional increase in the muzzle velocity of the projectile are presented. The loading conditions have been determined, which make it possible to achieve the maximum increase in the muzzle velocity of the projectile when using a model high-density fuel in comparison with a shot according to the classical loading scheme.*

Keywords: internal ballistics, high-density propellant, propellant combustion.

УДК 539.3

#### ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТОВ БУТАДИЕН – СТИРОЛЬНОГО КАУЧУКА С НЕОРГАНИЧЕСКИМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

Х.Х. Валиев<sup>1</sup>, Ю.В. Корнев<sup>2</sup>, А.Н. Власов<sup>3</sup>, Ю.Н. Карнет<sup>4</sup>, Н.А. Семенов<sup>5</sup>,  
О.Б. Юмашев<sup>6</sup>

<sup>1</sup> [hvvlv@mail.ru](mailto:hvvlv@mail.ru); Институт прикладной механики РАН, Москва

<sup>2</sup> –; Институт прикладной механики РАН, Москва

<sup>3</sup> –; Институт прикладной механики РАН, Москва

<sup>4</sup> –; Институт прикладной механики РАН, Москва

<sup>5</sup> –; Институт прикладной механики РАН, Москва

<sup>6</sup> –; Институт прикладной механики РАН, Москва

*Исследованы синтезированные композиты бутадиен – стирольного каучука СКС – 30 АРК с углерод – силикатными наполнителями. Методами атомно – силовой микроскопии изучена микроструктура поверхности, размеры, формы и распределение наполнителей в матрице эластомеров. Проведена корреляция полученных данных с результатами исследования физико – механических свойств этих гетерогенных материалов. Обсуждаются механизмы взаимодействий нано и микроразмерных агрегатов наполнителей с матрицей и между собой, приводящие к эффектам усиления деформационно – прочностных характеристик изученных композитов.*

**Ключевые слова:** композиты, бутадиен – стирольный каучук, атомно – силовая микроскопия, деформационно – прочностные свойства.

#### 1. Введение

Эластомерные композиты – одни из наиболее перспективных конструкционных материалов, изделия из которых широко востребованы и применяются в автомобильной, авиационной, космической, нефтеперерабатывающей и др. промышленности. При создании эластомерных композитов, конструкций и изделий из них