

Научная статья

УДК 623.52, 544.452, 533.1

doi: 10.17223/19988621/93/13

Исследование горения высокоплотного топлива в условиях комбинированной схемы заряжания

Константин Сергеевич Рогаев¹, Алексей Сергеевич Дьячковский²,
Нина Михайловна Саморокова³, Александр Николаевич Ищенко⁴,
Алексей Дмитриевич Сидоров⁵, Антон Юрьевич Саммель⁶,
Валерий Арсеньевич Бураков⁷, Алена Сергеевна Шестопалова⁸

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ rogaev@ftf.tsu.ru

² lex_okha@mail.ru

³ Samorokova_nina@mail.ru

⁴ ichan@niipmm.tsu.ru

⁵ alex_sid92@mail.ru

⁶ anton_sammel@mail.ru

⁷ valera_buracov@mail.ru

⁸ shestopalova@ftf.tsu.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности диспергирования и горения высокоплотного пастообразного топлива в условиях модельной баллистической установки. Проведена серия экспериментальных исследований с включением в состав метательного заряда высокоплотных топлив. Выполнен газодинамический анализ картины метания при использовании классической и комбинированной схем заряжания с включением высокоплотных топлив. Получен прирост дульной скорости метаемого элемента при использовании комбинированной схемы заряжания в сравнении с классической схемой заряжания при сохранении максимального давления на дно ускорительного канала.

Ключевые слова: баллистический стенд, модельное топливо, пастообразное топливо, горение, комбинированная схема заряжания, газовая динамика, внутренняя баллистика

Благодарности: Экспериментальные исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10054, <https://rscf.ru/project/21-79-10054/>. Теоретические исследования выполнены при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Рогаев К.С., Дьячковский А.С., Саморокова Н.М., Ищенко А.Н., Сидоров А.Д., Саммель А.Ю., Бураков В.А., Шестопалова А.С. Исследование горения высокоплотного топлива в условиях комбинированной схемы заряжания // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 93. С. 160–171. doi: 10.17223/19988621/93/13

A study of high-density propellant combustion in the framework of a combined loading scheme

Konstantin S. Rogaev¹, Aleksey S. D'yachkovskiy², Nina M. Samorokova³, Aleksandr N. Ishchenko⁴, Aleksey D. Sidorov⁵, Anton Yu. Sammel⁶, Valeriy A. Burakov⁷, Alyona S. Shestopalova⁸

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ rogaev@ftf.tsu.ru

² lex_okha@mail.ru

³ Samorokova_nina@mail.ru

⁴ ichan@niipmm.tsu.ru

⁵ alex_sid92@mail.ru

⁶ anton_sammel@mail.ru

⁷ valera_buracov@mail.ru

⁸ shestopalova@ftf.tsu.ru

Abstract. This paper examines the application of high-density propellants as part of propellant charge. The design and scheme of a ballistic test setup with a packaged model ballistic installation are presented. A series of experimental studies is carried out with the use of high-density propellants as part of the propellant charge. Thus, the basic ballistic characteristics of projectile launching are obtained. Using gas-dynamic methods developed at the Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, the dispersion and combustion of a high-density propellant as part of a combined loading scheme are considered. A gas-dynamic analysis of the launching pattern is performed using the classical and combined loading schemes with the addition of high-density propellants. It is revealed that a portion of the high-density propellant is pushed out of the loading chamber into the accelerator channel following the projectile and burns in the space around the projectile. As a result, the pressure on the projectile bottom decreases at a slower rate. An increase in the muzzle velocity of the projectile is obtained when using a combined loading scheme compared with the classical scheme at the same maximum pressure on the bottom of the accelerator channel.

Keywords: ballistic test setup, model propellant, paste-like propellant, combustion, combined loading scheme, gas dynamics, internal ballistics

Acknowledgments: The experimental study was carried out at the expenses of the Russian Science Foundation (project No. 21-79-10054, <https://rscf.ru/project/21-79-10054/>). The theoretical study was financially supported by the Tomsk State University Development Program (Priority 2030).

For citation: Rogaev, K.S., D'yachkovskiy, A.S., Samorokova, N.M., Ishchenko, A.N., Sidorov, A.D., Sammel', A.Yu., Burakov, V.A., Shestopalova, A.S. (2025) A study of high-density propellant combustion in the framework of a combined loading scheme. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 93. pp. 160–171. doi: 10.17223/19988621/93/13

Введение

Перспективным в области ствольных систем метания является использование нетрадиционных схем заряжения с включением новых топлив для повышения начальной скорости метания [1–4]. Одна из таких схем – комбинированная схема заряжения, где топливо размещается в верхнем полузаряде [5–6]. Использование данной схемы обладает такими преимуществами, как повышение средней плотности заряжения (при использовании топлив, насыпная плотность которых превышает 1 г/см^3) и перераспределение энергии продуктов сгорания в заснарядном пространстве [7–8]. Для использования данных преимуществ на практике необходимо учитывать фундаментальные основы по горению и диспергированию данных топлив в процессе выстрела в заснарядном пространстве метательной установки.

Цель настоящего исследования – получение газодинамической картины выстрела в условиях модельной ствольной установки с применением комбинированной схемы заряжения. Комбинированная схема заряжения использует традиционный зерненный метательный заряд с модельным высокоплотным топливом, располагаемым в верхнем полузаряде.

Экспериментальные исследования

В качестве метательной установки использовалась модельная баллистическая установка калибром 12.7 мм с длиной канала ускорителя 89 см. Внешний вид и схема баллистического стенда с модульной модельной баллистической установкой представлены на рис. 1.

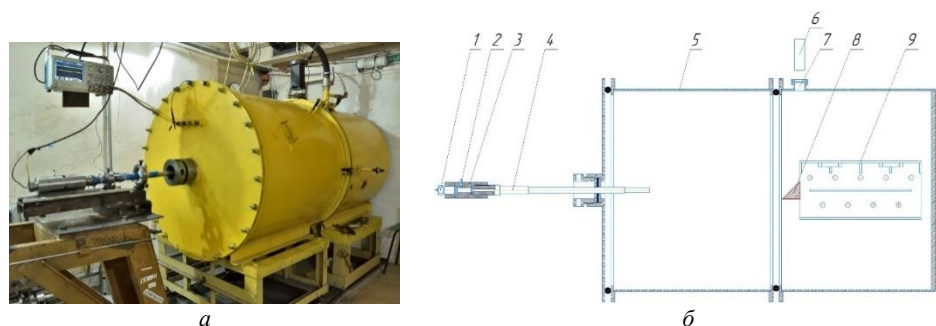


Рис. 1. Внешний вид (а) и схема (б) баллистического стенда с модульной модельной баллистической установкой: 1 – винтовой затвор с воспламенителем; 2 – датчик давления; 3 – камера заряжения; 4 – канал ускорителя; 5 – вакуумный глушитель; 6 – СВЧ-радар; 7 – иллюминатор; 8 – зеркало для СВЧ-радара; 9 – пулеприемник

Fig. 1. (a) Design and (b) scheme of a ballistic test setup with a packaged model ballistic installation: 1, screwed closure with igniter; 2, pressure sensor; 3, loading chamber; 4, accelerator channel; 5, vacuum suppressor; 6, microwave radar; 7, viewport; 8, mirror for microwave radar; and 9, bullet receiver

При проведении экспериментальных исследований регистрировались следующие параметры: давление газа, скорость, ускорение метаемого элемента (МЭ) и его положение в канале ускорителя. Зависимость давления в камере заряжения от времени измерялась при помощи пьезокварцевых датчиков 2Т6000 и комплек-

са аппаратуры «Нейва-10000», погрешность измерения согласно паспорту прибора составляет не более 3%. Для регистрации скорости МЭ в канале ускорителя в экспериментах использовался СВЧ-радар, принцип работы которого основан на эффекте Доплера, погрешность измерения согласно паспорту прибора составляет не более 1%. Регистрация момента вылета МЭ из ствола осуществлялась оптическим способом по наличию дульной вспышки при помощи фотодетектора, основанного на фотодиоде BPW34 и располагавшегося недалеко от дульного среза ускорителя. Регистрация и обработка всех сигналов осуществлялись на измерительно-регистрирующем комплексе НИИ ПММ ТГУ.

В работе рассматривались классическая и комбинированная схемы заряжания при использовании модельных высокоплотных топлив, представленные на рис. 2. Классическая схема заряжания использует в своем составе только традиционный зерненный одноканальный метательный заряд. Комбинированная схема заряжания с модельным высокоплотным топливом реализовывалась за счет замещения части традиционного заряда на пастообразное модельное высокоплотное топливо, располагаемое в камере заряжания.

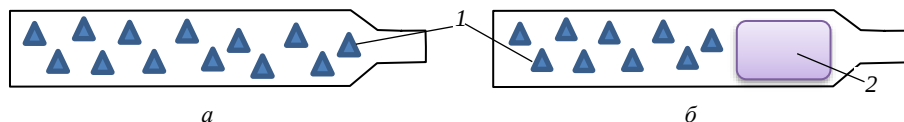


Рис. 2. Схемы заряжания: *а* – классическая схема заряжания; *б* – комбинированная схема заряжания; 1 – традиционный заряд; 2 – модельное высокоплотное топливо

Fig. 2. (a) Classical and (b) combined loading schemes: 1, traditional charge and 2, model high-density propellant

Для проверки работоспособности основных узлов и технических решений модельной баллистической установки и отработки систем измерений проведены эксперименты с применением классической схемы заряжания при использовании одноканального зернового заряда. При проведении экспериментов получены зависимости давления в камере заряжания и скорости МЭ от времени, отметка вылета МЭ из канала ускорителя.

Под модельным высокоплотным топливом понимается топливо, насыпная плотность которого составляет $\sim 1.5 \text{ г/см}^3$, что на 50% больше в сравнении с традиционными зерновыми зарядами (1 г/см^3). Применение высокоплотных топлив позволяет повысить энергетику выстрела без изменения геометрии камеры заряжания – за счет повышения плотности заряжания. Чтобы снизить максимальное давление в камере заряжания необходимо часть заряда воспламенить с некоторой задержкой. Для формирования некоторой величины задержки воспламенения модельного высокоплотного топлива, располагаемого около метаемой сборки, его помещали в полиэтиленовый картуз. На рис. 3 показан внешний вид традиционного метательного заряда, находящегося в бумажном картузе, и модельного высокоплотного топлива в полиэтиленовом картузе.

Так как топливо пастообразное, наличие деформируемого картуза позволяет части высокоплотного топлива во время выстрела переместиться в канал ускорителя непосредственно в заснарядное пространство, где и происходит его основное горение, локально повышающее давление. Перераспределение энергии в засна-

рядном пространстве позволяет повысить дульную скорость МЭ при сохранении уровня максимального давления в камере заряжания.



Рис. 3. Внешний вид картузов с традиционным зарядом (а) и модельным высокоплотным топливом (б)

Fig. 3. Cartridge bag design with (a) traditional charge and (b) model high-density propellant

Для правильного понимания всех процессов, происходящих во время выстрела с модельным высокоплотным топливом, проведен опыт, позволяющий разделить энергетический вклад зернового заряда и топлива в газодинамическую картину. Особенностью опыта является формирование условий горения зернового заряда, максимально близких к условиям применения высокоплотного топлива до момента его воспламенения. Для этого вместо исследуемого топлива в заряд помещается пастообразный инертный (не горящий) заряд, по физическим характеристикам максимально приближенный к исследуемому топливу. На рис. 4 представлены результаты экспериментов с одинаковой навеской с инертным составом и высокоплотными топливами марок Т1 и Т2.

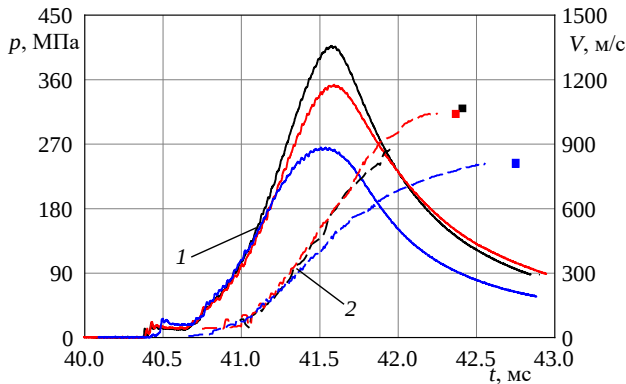


Рис. 4. Экспериментальные зависимости давления газа и скорости МЭ от времени:
■ – скорость в момент вылета МЭ; 1 – давление газа; 2 – скорость МЭ;
— — с инертным зарядом; — — с топливом Т1; — — с топливом Т2

Fig. 4. Experimental time dependences of gas pressure and projectile speed:
■ – projectile speed when leaving the barrel; 1, gas pressure; 2, projectile speed;
— — with inert charge; — — with T1 propellant; and — — with T2 propellant

Из рис. 4 можно наглядно увидеть, что на начальном этапе горения все зависимости давления в камере заряжания от времени совпадают, а начиная с опреде-

ленного (для каждого топлива своего) момента начинают расходиться. Момент расхождения восходящих кривых давления характеризует начало горения исследуемого топлива.

На рис. 5 показана зависимость дульной скорости от максимального давления для всех проведенных экспериментов. В опытах с высокоплотным топливом его масса одинакова, менялась масса зернового заряда. Из графика хорошо прослеживается зависимость влияния массы топлива на увеличение дульной скорости. Скорость в комбинированной схеме заряжания выше, чем в классической, при сохранении максимального давления. Также видно, что зависимость для опытов с топливом марки Т2 на графике находится выше, чем с топливом Т1, и имеет другой характер.

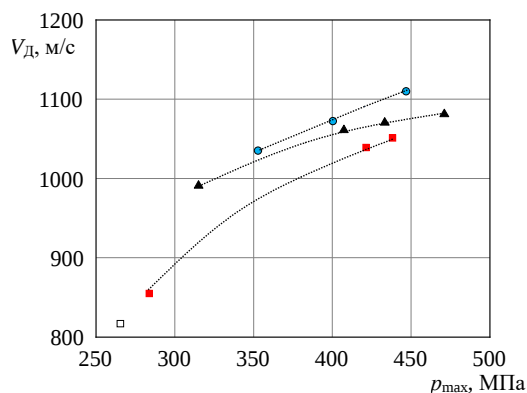


Рис. 5. Зависимость дульной скорости МЭ от максимально давления при использовании классической и комбинированной схемы заряжания:
 ■ – классическая схема заряжания; □ – комбинированная схема заряжания с инертным топливом; ▲ – комбинированная схема заряжания с топливом Т1; ● – комбинированная схема заряжания с топливом Т2

Fig. 5. Muzzle velocity of the projectile as a function of maximum pressure when using the classical and combined loading schemes:
 ■ – classical loading scheme; □ – combined loading scheme with inert propellant; ▲ – combined loading scheme with T1 propellant; and ● – combined loading scheme with T2 propellant

Выполнено экспериментальное исследование, направленное на изучение механизма диспергирования и горения высокоплотных топлив в составе комбинированной схемы заряжания для модельной баллистической установки.

Результаты экспериментально-теоретического исследования

Для численного моделирования процессов, происходящих в заснарядном объеме модельной ствольной системы, использовалась численная методика, разработанная в НИИ ПММ ТГУ [9]. В математической модели приняты следующие допущения, касающиеся поведения высокоплотного топлива в процессе выстрела. Считается что часть высокоплотного топлива, располагаемого в верхнем полузаряде, горит в режиме присоединенного заряда, а часть диспергируется на сферические частицы. В работах [7–8] было показано, что данный тип топлив имеет две стадии: медленное послойное горение и ускоренный режим горения. Переход

от одной стадии к другой в математической модели происходит по достижении импульса давления либо на фронте горения присоединенного заряда, либо в области расположения топлива в случае сферических частиц. Для каждой из частей высокоплотных топлив запишем импульс перехода от стадии медленного послойного горения в ускоренный режим горения: для диспергированных частиц

$$I_k = \int_{t_0}^t p dt \text{ — импульс давления в камере; } I_\phi = \int_{t_0}^t p_\phi dt \text{ — импульс давления на}$$

фронте горения, где t_0 — время начала расчета, p_ϕ — давление газа на фронте.

После воспламенения традиционного зернового заряда происходит процесс диспергирования высокоплотного, а также формирования присоединенного заряда до $I_k = I_1$. К этому моменту метаемый элемент проходит расстояние x_1 , считаем $L_{пз} = x_1$, масса присоединенного заряда $m_{пз} = \pi D^2/4 L \delta_{пт}$, остальное высокоплотное топливо диспергирует на частицы диаметром d . К моменту $I_k = I_2$ происходит воспламенение диспергированных частиц и присоединенного заряда. Для высокоплотного топлива Т2 послойные скорости горения частиц U_1 и присоединенного заряда $U_{пз}$ получены в замкнутом и полузамкнутом объемах [7–8]:

$$U_1 = \begin{cases} 2.7 \cdot 10^{-9} \cdot P^{2.2}, & \text{при } 0 < P < 80 \\ 8.0 \cdot 10^{-6} \cdot P, & \text{при } 80 \leq P < 200. \end{cases}$$

$$U_{пз} = U_1 \left(1 + \frac{2.679}{D} \right) = 1.2488 \cdot 10^{-5},$$

где $D = 1.27$ см — диаметр канала ускорителя и, соответственно, присоединенного заряда, $P = p/p_0$, $p_0 = 0.1$ МПа.

Для данного высокоплотного топлива в режиме присоединенного заряда характерен переход в конвективный режим горения, который реализуется при падении давления на фронте горения и достижении необходимой величины $dp/dt < 0$. Для этого момента определяется $I_\phi = I_3$, при $I_\phi > I_3$ присоединенный заряд горит со скоростью U_d с образованием частиц диаметром d и скоростью горения U_1 , при этом на фронте сгорает часть частицы, равная ψ_0 .

Величины I_1 , I_2 , I_3 , ψ_0 , d , U_d определяются на основании сравнения расчетных и экспериментальных результатов. В качестве параметров сравнения выступают основные баллистические параметры ($p_{\max}$ — максимальное давление в камере заряжания, V_d — дульная скорость МЭ) и временные зависимости $p(t)$ — давления в камере заряжания, $V(t)$ — скорости МЭ в канале ускорителя. Сравнение расчетно-экспериментальных данных при использовании классической (а) и комбинированной (б) схем заряжания представлено на рис. 6. Хорошее совпадение зависимостей давления в камере заряжания и скорости МЭ в канале ствольной системы говорит о том, что математическая модель и принятые допущения адекватно описывают происходящие процессы и могут быть использованы для газодинамического анализа выстрела с использованием классической и комбинированной схем заряжания.

Из газодинамического анализа получено, что использование высокоплотного топлива в составе метательного заряда увеличивает площадь под временной зависимостью давления в камере заряжания (рис. 7) при одинаковой величине $p_{\max}$. Данная особенность связана с большим и более длительным газоприходом от метательного заряда в процессе горения данного заряда.

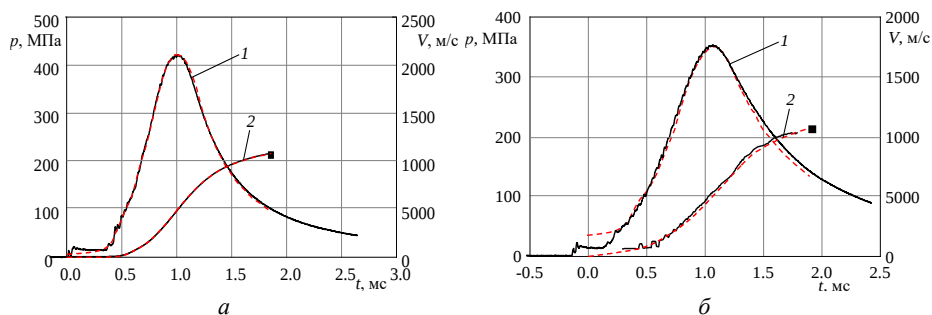


Рис. 6. Зависимость давления в камере заряжания и скорости от времени: *a* – классическая схема; *б* – комбинированная схема; ■ – скорость в момент вылета МЭ; 1 – давление газа; 2 – скорость МЭ; — – эксперимент; - - - - расчет

Fig. 6. Time dependences of the pressure in the loading chamber and projectile speed: (a) classical and (b) combined loading schemes: ■ – projectile speed when leaving the barrel; 1, gas pressure; 2, projectile speed; — – experiment and - - - - calculation

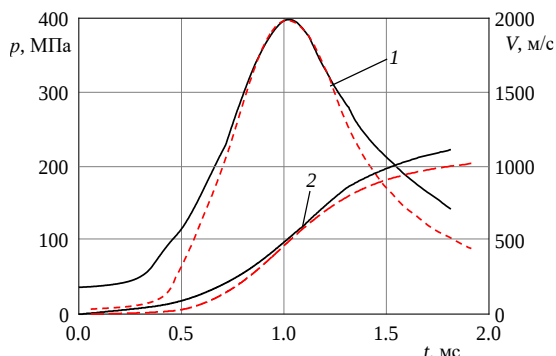


Рис. 7. Зависимость давления в камере заряжания и скорости от времени:

- - - - классическая схема; — – комбинированная схема;
1 – давление газа; 2 – скорость МЭ

Fig. 7. Time dependences of the pressure in the loading chamber and projectile speed:
- - - - classical loading scheme; — – combined loading scheme;
1, gas pressure and 2, projectile speed

Как уже было упомянуто выше, часть высокоплотного топлива выталкивается из камеры заряжания в канал ускорителя вслед за МЭ и горит в околоснарядном пространстве, вследствие чего происходит более медленное падение давления на дно МЭ (рис. 8).

На начальном участке канала ускорителя ($x < 15$ см) при использовании классической схемы заряжания давление на МЭ выше, что приводит к более быстрому набору скорости; при $x > 15$ см выше давление в случае комбинированной схемы, особенно при конвективном горении присоединенного заряда, что дает дополнительный прирост скорости.

Увеличение дульной скорости МЭ при использовании комбинированной схемы заряжания за счет включения модельного высокоплотного топлива составляет 56 м/с (5.6%) в сравнении с классической схемой заряжания при сохранении максимального давления.

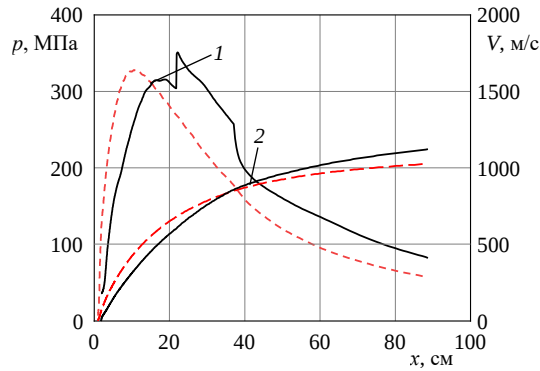


Рис. 8. Зависимость давления на дно МЭ и скорости МЭ от координаты МЭ:

--- классическая схема; ——— комбинированная схема;

1 – давление газа; 2 – скорость МЭ

Fig. 8. Pressure on the projectile bottom and projectile speed as the functions of projectile coordinates: --- classical loading scheme; ——— combined loading scheme; 1, gas pressure and 2, projectile speed

На рис. 9 представлена зависимость объемного содержания частиц метательного заряда в разные моменты времени. Использование комбинированной схемы заряжания приводит к перераспределению метательного заряда в процессе метания. В случае использования классической схемы заряжания элементы метательного заряда продвигаются в процессе движения по каналу ускорителя на 25 см и полностью сгорают при $t = 1.2$ мс, а при использовании в составе метательного заряда высокоплотных топлив частицы метательного заряда присутствуют на протяжении всего процесса и в области дна метаемого элемента, что снижает влияние эффекта насыщения.

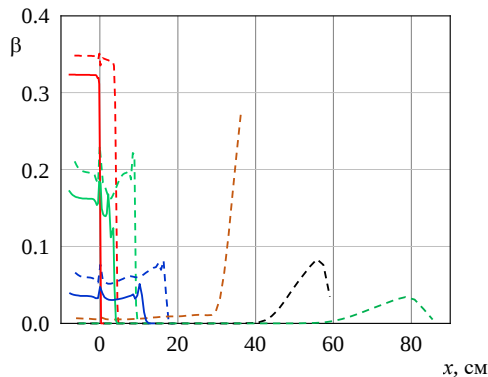


Рис. 9. Объемное содержание частиц метательного заряда в различные моменты времени:

——— классическая схема; ——— комбинированная схема

Fig. 9. Volumetric content of propellant charge particles at different time instants: ——— classical loading scheme and ——— combined loading scheme

Аналогично определялись параметры горения для серии опытов с топливом Т2. Основные отличия горения от топлива Т1 имеются на начальном этапе, здесь

чем выше давление в опыте, тем больше топлива диспергирует на частицы и, соответственно, меньше масса присоединенного заряда. Этим и объясняется меньший выигрыш по скорости при высоких давлениях (см. рис. 5). В опыте с $p_{\max} = 471$ МПа диспергирует все топливо на начальном этапе.

Заключение

В результате проведенного экспериментально-теоретического исследования горения высокоплотного топлива в условиях комбинированной схемы заряжания и модельной баллистической установки определены основные принципы диспергирования и горения данных топлив. Получена и проанализирована газодинамическая картина выстрела с использованием классической и комбинированной схем заряжания. Увеличение дульной скорости элемента при использовании комбинированной схемы заряжания за счет включения модельного высокоплотного топлива Т2 составляет 59 м/с (5.6%) в сравнении с классической схемой заряжания при сохранении максимального давления.

Список источников

1. 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.
2. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А., Романьков А.В., Храповский В.Е., Беляев А.А., Кроули А.Б. Конвективное горение блочных зарядов из семиканальных пороховых зерен, ингибированных поливинилбутиралем // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 5. С. 47–57.
3. Пенский О.Г., Русаков С.В. К расчету истечения пороховых газов из сосуда с соплом // Проблемы механики и управления. Нелинейные динамические системы : межвуз. сб. науч. тр. Пермь : Пермский гос. ун-т, 2007. Вып. 39. С. 184–196.
4. Новожилов Б.В., Каганова З.И., Беляев А.А. Нестационарные режимы горения пороха в полужамкнутом объеме // Химическая физика. 2009. Т. 28, № 12. С. 31–39.
5. Маршаков В.Н., Новожилов Б.В. Переходные режимы горения баллистического пороха в полужамкнутом объеме // Химическая физика. 2011. Т. 30, № 1. С. 25–37.
6. Иванов С.М., Цуканов Н.А. Оценка динамических характеристик нестационарного горения твердого топлива в полужамкнутом объеме по измерениям регулируемого давления // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 1. С. 80–91.
7. Rogaev K.S., Dyachkovskii A.S., Ishchenko A.N., Samorokova N.M., Shestopalova A.S. Assessment of the possibility of ignition of paste-like fuel in a nozzle bomb // Springer Proceedings in Physics. 2024. 1067 SPPHY. P. 276–282.
8. Розаев К.С., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Саморокова Н.М., Степанов Е.Ю., Гимаева Н.Р. Исследование особенностей зажигания и горения высокоплотных зарядов в условиях постоянного объема // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 81. С. 123–132. doi: 10.17223/19988621/81/11
9. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 256 с.

References

1. Ermolaev B.S., Sulimov A.A., Roman'kov A.V. (2013) Prisoedinyonnyy vysokoplotnyy zaryad konvektivnogo gorennya v kombinirovannoy skheme vystrela: Novye rezul'taty [Traveling high-density charge of convective burning in the hybrid configuration: new results]. *Gorenje i vzryv – Combustion and Explosion*. 6. pp. 206–210.

2. Ermolaev B.S., Sulimov A.A., Roman'kov A.V., Khrapovskiy V.E., Belyaev A.A., Crowley A.B. (2015) Convective burning of block charges prepared from seven-perforation propellant powder grains inhibited by polyvinyl butyral. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 9(3). pp. 375–384. doi: 10.7868/S0207401X15050040
3. Penskiy O.G., Rusakov S.V. (2007) K raschetu istecheniya porokhovyykh gazov iz sosudov s soplom [To the calculation of the outflow of powder gases from vessels with a nozzle]. *Problemy mekhaniki i upravleniya: Nelineynye ob"emnye sistemy*. 39. pp. 184–196.
4. Novozhilov B.V., Kaganova Z.I., Belyaev A.A. (2009) Unsteady regimes of propellant combustion in a semiclosed space. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 3(6). pp. 945–952.
5. Marshakov V.N., Novozhilov B.V. (2011) Transient modes of double-base propellant combustion in a semiclosed volume. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 5(1). pp. 45–56.
6. Ivanov S.M., Tsukanov N.A. (2002) Estimate of the dynamic characteristics of unsteady combustion of a solid propellant in a semi-closed volume from measurements of variable pressure. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 38(1). pp. 71–80.
7. Rogaev K.S., Dyachkovskii A.S., Ishchenko A.N., Samorokova N.M., Shestopalova A.S. (2024) Assessment of the possibility of ignition of paste-like fuel in a nozzle bomb. In: *Proceedings of the XII All Russian Scientific Conference on Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics. Springer Proceedings in Physics*. 1067. pp. 276–282. doi: 10.1007/978-981-97-1872-6_38
8. Rogaev K.S., D'yachkovskiy A.S., Ishchenko A.N., Samorokova N.M., Stepanov E.Yu., Gimaeva N.R. (2023) Issledovanie osobennostey zazhiganiya i goreniya vysokoplotnykh zaryadov v usloviyakh postoyannogo ob"ema [A study of the ignition and combustion of high-density charges under constant volume conditions]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 81. pp. 123–132. doi: 10.17223/19988621/81/11
9. Khomenko Yu.P., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z. (1999) *Matematicheskoe modelirovanie vnutriballisticheskikh protsessov v stvol'nykh sistemakh* [Mathematic simulation of intraballistic processes in barrel systems]. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Science.

Сведения об авторах:

Рogaев Константин Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: rogaev@ftf.tsu.ru.

Дьячковский Алексей Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: lex_okha@mail.ru

Саморокова Нина Михайловна – научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: Samorokova_nina@mail.ru.

Ищенко Александр Николаевич – доктор физико-математических наук, директор Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

Сидоров Алексей Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: alex_sid92@mail.ru

Саммель Антон Юрьевич – младший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: anton_sammel@mail.ru

Бураков Валерий Арсентьевич – научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: valera_buracov@mail.ru

Шестопалова Алена Сергеевна – техник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: shestopalova@ftf.tsu.ru

Information about the authors:

Rogaev Konstantin S. (Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: rogaev@ftf.tsu.ru

D'yachkovskiy Aleksey S. (Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: lex_okha@mail.ru

Samorokova Nina M. (Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: Samorokova_nina@mail.ru

Ishchenko Aleksandr N. (Doctor of Physics and Mathematics, Director, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

Sidorov Aleksey D. (Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: alex_sid92@mail.ru

Sammel' Anton Yu. (Junior Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: anton_sammel@mail.ru

Burakov Valeriy A. (Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: valera_buracov@mail.ru

Shestopalova Alyona S. (Laboratory Technician, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation) E-mail: shestopalova@ftf.tsu.ru

Статья поступила в редакцию 27.04.2024; принята к публикации 07.02.2025

The article was submitted 27.04.2024; accepted for publication 07.02.2025