

Научная статья

УДК 533.17, 536.46, 662.612

doi: 10.17223/19988621/84/9

Исследование особенностей горения высокоплотных топлив в условиях сопловой установки

Алексей Сергеевич Дьячковский¹, Константин Сергеевич Рогаев²,
Александр Николаевич Ищенко³, Нина Михайловна Саморокова⁴,
Алексей Дмитриевич Сидоров⁵, Евгений Юрьевич Степанов⁶,
Анастасия Денисовна Кодякова⁷

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ lex_okha@mail.ru

² rogaev@ftf.tsu.ru

³ ichan@niipmm.tsu.ru

⁴ Samorokova_nina@mail.ru

⁵ alex_sid92@mail.ru

⁶ stepanov_eu@mail.ru.

⁷ ssstasya.kod@mail.ru

Аннотация. Рассмотрено горение высокоплотных топлив в условиях манометрической бомбы и сопловой установки. Исследованы некоторые особенности истечения продуктов сгорания пороха и топлива через различные конфигурации соплового блока. Предложены некоторые способы открытия соплового блока. Получены законы горения исследуемых топлив в условиях замкнутого и полужамкнутого объема при истечении газа через сопло.

Ключевые слова: сопловая установка, закон горения, истечение, высокоплотное топливо, пастообразное топливо

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

Для цитирования: Дьячковский А.С., Рогаев К.С., Ищенко А.Н., Саморокова Н.М., Сидоров А.Д., Степанов Е.Ю., Кодякова А.Д. Исследование особенностей горения высокоплотных топлив в условиях сопловой установки // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 84. С. 109–122. doi: 10.17223/19988621/84/9

Original article

A study of combustion features of high-density propellants in a nozzle test facility

Aleksey S. D'yachkovskiy¹, Konstantin S. Rogaev²,
Aleksandr N. Ishchenko³, Nina M. Samorokova⁴, Aleksey D. Sidorov⁵,
Evgeniy Yu. Stepanov⁶, Anastasiya D. Kodyakova⁷

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

¹ lex_okha@mail.ru

² rogaev@ftf.tsu.ru

³ ichan@niipmm.tsu.ru

⁴ Samorokova_nina@mail.ru

⁵ alex_sid92@mail.ru

⁶ stepanov_eu@mail.ru.

⁷ ssstasya.kod@mail.ru

Abstract. This paper considers the combustion of high-density propellants with the use of a manometric bomb and a nozzle test facility. The propellant combustion within the manometric bomb is explored at ignition pressures of 18, 50, and 100 MPa. The study results for the propellant combustion in the laboratory nozzle test facility, including a set of nozzles with throat diameters varying from 8 to 20 mm, are presented. The nozzle cluster allows one to adjust the opening pressure up to about 200 MPa. A microwave radar is used to detect the moment of nozzle opening. Some features of the outflow of gunpowder and propellant combustion products are revealed at various geometric dimensions of the nozzle cluster and its opening methods. The laws of propellant combustion along the end face in closed and semi-closed volumes with the gas outflow from a nozzle are obtained. Good agreement is observed in terms of the pressure curve shapes on the ascending and descending branches. The discrepancy in the maximum pressure is less than 5%. The parametric study results for the end combustion of high-density propellants at various nozzle diameters are presented. It is shown that the considered propellants can be used to maintain constant pressure in a semi-closed volume.

Keywords: nozzle test facility, burning law, outflow, high-density propellant, paste-like propellant

Acknowledgments: This research was supported by the Russian Science Foundation (project No. 21-79-10054).

For citation: D'yachkovskiy, A.S., Rogaev, K.S., Ishchenko, A.N., Samorokova, N.M., Sidorov, A.D., Stepanov, E.Yu., Kodyakova, A.D. (2023) A study of combustion features of high-density propellants in a nozzle test facility. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 84. pp. 109–122. doi: 10.17223/19988621/84/9

Введение

В настоящее время одним из перспективных направлений исследований повышения скорости артиллерийских снарядов является использование нетрадицион-

ной схемы выстрела с присоединенным зарядом [1–3]. Для проведения натурных испытаний перспективных зарядов необходимы знания об особенностях горения новых высокоплотных топлив в условиях, приближенных к реальным. Условия, реализуемые в сопловой установке, являются близкими к реальному выстрелу из ствольной системы, в отличие от манометрической бомбы [4–8]. Сопловая установка позволяет воспроизвести газодинамические параметры, а также компоновку заряда и среднюю плотность заряжения, как в условиях ствольной системы. В таких устройствах практически отсутствует теплообмен с окружающей средой, и можно считать процесс истечения адиабатным. Ранее было получено, что для пироксилиновых порохов происходит снижение скорости горения частицы при резком спаде давления, реализуемом, например, при выходе снаряда из ствола или открытии соплового канала [9].

Цель данной работы – исследование горения модельных высокоэнергетических высокоплотных топлив в условиях замкнутого и полузамкнутого объема и определение режимов работы сопловой установки.

Экспериментальное исследование закона горения высокоплотного топлива в условиях манометрической бомбы

В серии предварительных экспериментов исследована зависимость закона горения высокоплотных топлив в условиях манометрической бомбы (марок Т1 и Т2) для различных уровней давления воспламенения. Исследуемые составы Т1 и Т2 отличаются по своим физико-химическому составу и скорости горения. Начальное давление воспламенения необходимо высокоплотному топливу для перехода от медленного горения, которое реализуется при низких давлениях (до 10 МПа), к ускоренному режиму, приближенному к номинальному (рабочему).

Начальное давление воспламенения 18, 50 и 100 МПа создавалось массой порохового воспламенителя 2,5, 7 и 14 г соответственно. Несмотря на то, что весь пороховой заряд успевает сгореть полностью до начала момента горения исследуемого топлива, для более точного определения закона горения высокоплотного топлива ранее в серии предварительных экспериментов уточнен закон горения пороха [10]. На рис. 1 показаны зависимости давления от времени для высокоплотных топлив Т1 и Т2 при различной массе порохового воспламенителя.

Из рис. 1 видно, что при наименьшем давлении воспламенения (18 МПа) для топлива марки Т1 от начала воспламенения до момента полного сгорания заряда проходит около 500 мс, а для топлива марки Т2 – более чем в два раза дольше – 1 100 мс. Для обоих составов наблюдается рост скорости горения с увеличением давления. Увеличение давления воспламенения до 100 МПа сокращает общее время горения топлив примерно до 100 мс.

Полученные для исследуемых топлив зависимости давления от времени при различных начальных давлениях воспламенителя хорошо дополняют друг друга, образуя единую кривую горения заряда. Хорошее совпадение кривых на пересекающихся участках свидетельствует о том, что скорость горения исследуемых топлив не зависит от уровня давления воспламенения. Для проверки данного предположения проведена обработка экспериментальных зависимостей. Зависимость послойной скорости горения $u(P)$, где безразмерное давление $P = p/p_0$, $p_0 = 0.1$ Мпа, определяется аналогично [11].

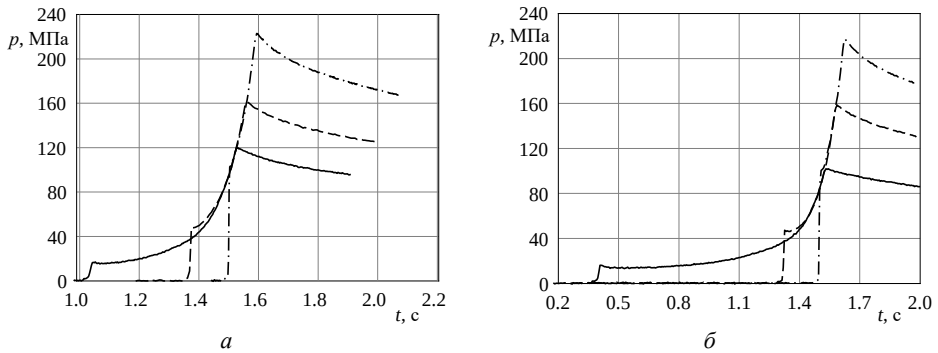


Рис. 1. Экспериментальная зависимость давления от времени для высокоплотных топлив T1 (а) и T2 (б) при массе порохового воспламенителя: — — 2.5 г; — — — — 7.0 г; — · — · — 14.0 г

Fig. 1. Experimental time dependence of pressure for (a) T1 and (b) T2 high-density propellants at powder igniter masses of: — — 2.5 g; — — — — 7.0 g; and — · — · — 14.0 g

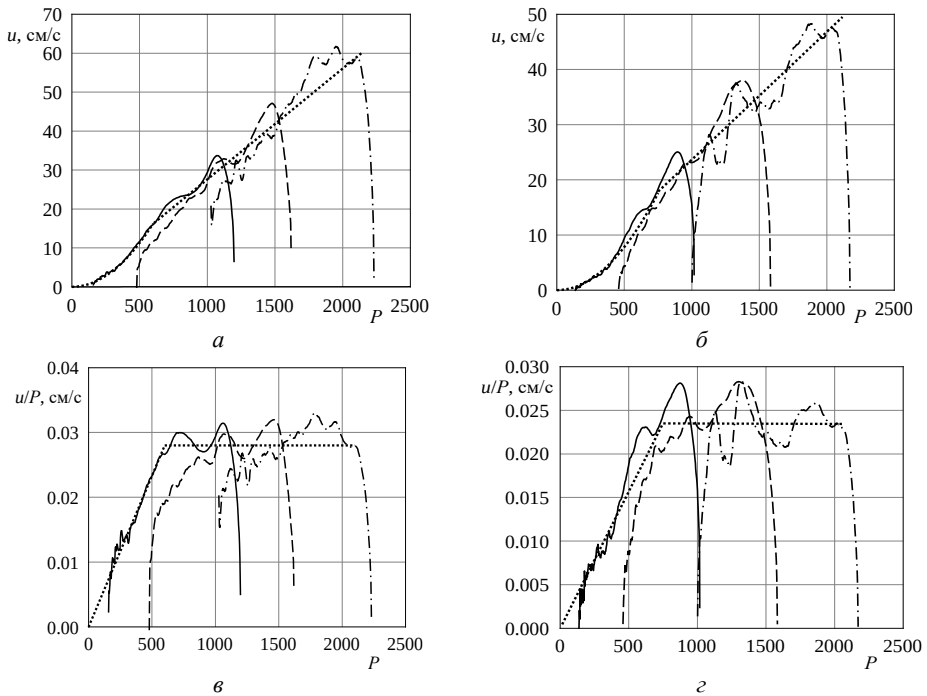


Рис. 2. Полученные зависимости скорости горения (а, б) и скорости горения, деленной на давление (в, г), от давления для высокоплотных топлив T1 (а, в) и T2 (б, г) при массе порохового воспламенителя: — — 2.5 г; — — — — 7.0 г; — · — · — 14.0 г (..... — полученный закон горения)

Fig. 2. The obtained pressure dependences of the (a, b) burning rate and (c, d) burning rate divided by pressure for (a, c) T1 and (b, d) T2 high-density propellants at powder igniter masses of: — — 2.5 g; — — — — 7.0 g; and — · — · — 14.0 g (the dotted line denotes the obtained burning law)

На рис. 2 показаны полученные зависимости скорости горения u (а, б) и отношения скорости горения к давлению u/P (в, г) от давления для высокоплотных топлив Т1 и Т2 при различных начальных уровнях давления воспламенения заряда в условиях манометрической бомбы.

На рис. 2, в, г можно увидеть некоторые закономерности при горении топлив в исследованном диапазоне давлений, показывающие, что на начальном этапе с ростом давления идет «разгорание» топлив до определенного значения (600–750), а после можно считать, что величина $u(P)/P$ постоянна и не зависит от давления. Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что закон горения для топлив марок Т1 и Т2 практически не зависит от начального давления, создаваемого воспламенителем, а законы горения топлив удобно аппроксимировать двучленной зависимостью. Для топлива марки Т1 (см. рис. 2, а, в) зависимость $u/P(P)$ можно представить в виде:

$$\begin{cases} u/P(P) = 4.66 \cdot 10^{-5} P & (0 < P < 600), \\ u/P(P) = 2.83 \cdot 10^{-2} & (P \leq 600). \end{cases}$$

Тогда закон горения исследуемого топлива $u(P)$ будет иметь вид (размерность см/с):

$$\begin{cases} u(P) = 4.66 \cdot 10^{-5} P^2 & (0 < P < 600), \\ u(P) = 2.83 \cdot 10^{-2} P & (P \leq 600). \end{cases} \quad (1)$$

Аналогичные зависимости получены для топлива марки Т2 (см. рис. 2, б, г):

$$\begin{cases} u/P(P) = 3.128 \cdot 10^{-5} P & (0 < P < 750), \\ u/P(P) = 2.344 \cdot 10^{-2} & (P \leq 750), \\ u(P) = 3.128 \cdot 10^{-5} P^2 & (0 < P < 750), \\ u(P) = 2.344 \cdot 10^{-2} P & (P \leq 750). \end{cases} \quad (2)$$

Представленные законы горения использовались для определения условий зажигания сопловой баллистической установки.

Экспериментальная сопловая установка для исследования горения высокоплотных топлив

В исследовании использовалась лабораторная сопловая установка с возможностью замены сопла с диаметром критического сечения до 20 мм и свободным объемом камеры сгорания 118 см³ (рис. 3). На рис. 3 показано расположение основных элементов установки: в корпусе установки (1) имеется камера сгорания, в которой располагаются исследуемое топливо (2) и пороховой воспламенитель (3). Для зажигания используется воспламенительное устройство (5), а для регистрации давления в камере сгорания применяется пьезоэлектрический датчик давления 2Т6000 (4) совместно с комплексом аппаратуры регистрации давления «Нейва-10000». В сопловом блоке (7) располагается сопло (6) с вышибным снарядами-заглушкой, позволяющим удерживать давление в сопловой камере до определенного значения, называемого «давлением форсирования». Для отслеживания момента форсирования снаряда-заглушки и открытия сопла используется СВЧ-радар. Точность регулировки уровня давления, при котором вскрывается сопло, напря-

мую зависит от точности выведения диаметра снаряда-заглушки для обеспечения посадки с натягом. В случае изготовления снаряда-заглушки из текстолита ее диаметр контролируется с точностью до 0.01 мм.



Рис. 3. Схема сопловой установки (а) и ее внешний вид (б): 1 – корпус, 2 – место расположения исследуемого топлива в камере сгорания, 3 – место расположения порохового заряда, 4 – датчик давления, 5 – воспламенительное устройство, 6 – сопло со снарядом-заглушкой, 7 – сопловой блок

Fig. 3. (a) Layout and (b) design of a nozzle test facility: 1, casing; 2, location of the studied propellant in a combustion chamber; 3, location of a powder charge; 4, pressure sensor; 5, igniter; 6, nozzle with a plug-like projectile; and 7, nozzle cluster

В установке возможно реализовать несколько способов открытия сопла; наиболее частыми являются три способа с различными конструкциями снаряда-заглушки: из полиэтиленовой пробки, полиэтиленовой пробки с «утяжелителем» и текстолитовой пробки. Полиэтиленовая пробка, запрессованная в сопло, обеспечивает его открытие (форсирование снаряда-заглушки) при давлении в камере заряжения до 40 МПа. Полиэтилен является радиопрозрачным материалом для электромагнитного излучения, поэтому для регистрации движения такой пробки на торец крепилась алюминиевая фольга. Во втором случае использовался «утяжелитель» для увеличения времени выхода полиэтиленового снаряда-заглушки из сопла. Для этого к торцу снаряда-заглушки крепился «утяжелитель» в виде стального стержня, располагаемый в сопловом блоке сразу за соплом. Увеличение массы утяжелителя приводит к более медленному движению снаряда-заглушки по соплу, тем самым увеличивая максимальное давление, развиваемое в камере сгорания при изменении внутреннего объема. Другим вариантом увеличения давления в камере сгорания может быть увеличение трения снаряда-заглушки при движении по соплу и величины давления форсирования. Замена материала снаряда-заглушки с полиэтилена на текстолит позволяет увеличить (регулировать) величину давления форсирования снаряда-заглушки вплоть до 200 МПа. В экспериментальных исследованиях в качестве материала снаряда-заглушки использовался текстолит.

Экспериментальные исследования горения высокоплотного топлива в условиях сопловой установки

В условиях сопловой установки исследовано горение топлива марки Т2. В качестве воспламенительного заряда использовался порошок массой 2.0 г, формирующий давление воспламенения в камере сопловой установки до 17 МПа. Внутри

установки высокоэнергетическое топливо располагалось в полиэтиленовых контейнерах с внутренним диаметром 20 мм. Внешний вид контейнера с топливом, подготовленным к эксперименту, представлен на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид топлива в полиэтиленовом контейнере, подготовленного к эксперименту: (а) вид сверху; (б) вид сбоку

Fig. 4. Arrangement of the propellant in a polyethylene container prepared for the experiment: (a) top and (b) side views

На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости давления от времени для высокоплотного топлива Т2 для различных диаметров критического сечения сопла (8, 12, 17 и 20 мм). До момента открытия сопла сопловую установку можно рассматривать как манометрическую бомбу и аналогичным образом получить закон горения топлива. Картина горения топлива Т2 в условиях сопловой установки представлена на рис. 5, а. В начале кривой наблюдается быстрый рост давления до определенного значения, формируемого пороховым воспламенительным зарядом. Имеется небольшой разброс во времени воспламенения топлива, однако наблюдается хорошее совпадение кривых на участке горения топлива; основное различие наблюдается в максимальном давлении, соответствующем моменту открытия соплового блока.

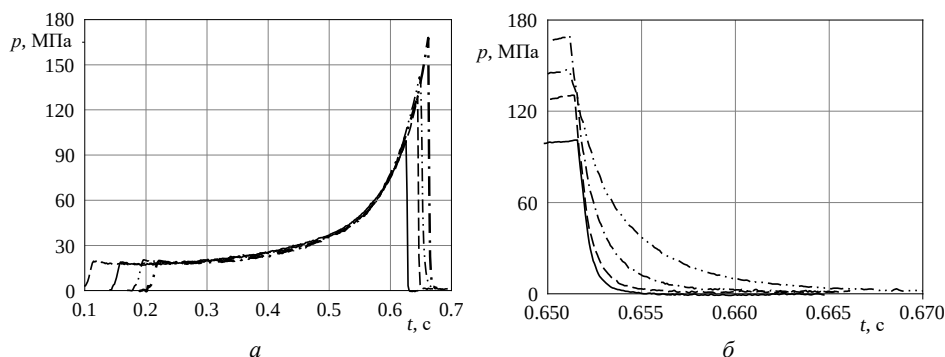


Рис. 5. Экспериментальные зависимости давления от времени для высокоплотного топлива Т2 для различных диаметров критического сечения сопла:
 — 20 мм; - - - - - 17 мм; - · - · - 12 мм; · · · · · 8 мм

Fig. 5. Experimental time dependences of pressure for T2 high-density propellant at various nozzle throat diameters: — 20 mm; - - - - - 17 mm; - · - · - 12 mm; and · · · · · 8 mm

Рассмотрим более детально кривые давления в момент открытия соплового блока. На рис. 5, б представлены экспериментальные зависимости давления от времени в момент открытия соплового блока для различных диаметров критического сечения сопла. Из рис. 5, б видно, что уменьшение диаметра критического сечения сопла, как и ожидалось, приводит к более медленному падению давления внутри сопловой установки. В такой конфигурации газоприход, получаемый при сгорании топлива, позволит поддерживать давление до уровня 10 МПа после открытия соплового блока всего 1.2 мс. Уменьшение площади сопла в 6.2 раза (до диаметра 8 мм) увеличило время истечения продуктов горения до аналогичного давления в камере до 9.0 мс.

На рис. 6 показаны полученные зависимости скорости горения $u(P)$ (см. рис. 6, а) и отношения скорости горения к давлению $u/P(P)$ (см. рис. 6, б) от давления для высокоплотного топлива марки Т2 для различных диаметров критического сечения. Сравнивая полученные для Т2 зависимости $u(P)$ и $u/P(P)$ с аппроксимацией, полученной ранее для экспериментов, проведенных в манометрической бомбе (пунктирные линии), видим достаточно хорошее совпадение. Возможные особенности закона горения исследуемого топлива в условиях сопловой установки при открытии сопла можно получить путем математической обработки кривых давления.

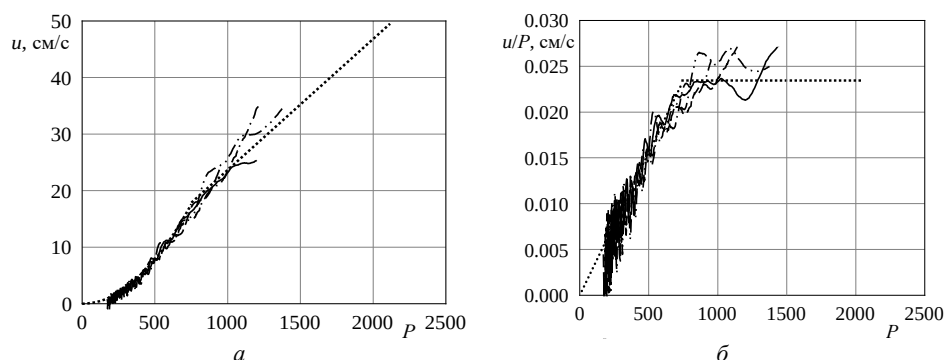


Рис. 6. Зависимости скорости горения (а) и отношения скорости горения к давлению (б) от давления для высокоплотного топлива Т2 для различных диаметров критического сечения сопла: — — 20 мм; - - - - 17 мм; - · - · - 12 мм; · · · · · 8 мм (· · · · · — полученный закон горения)

Fig. 6. Pressure dependences of the (a) burning rate and (c) burning rate divided by pressure for T2 high-density propellant at various nozzle throat diameters: — — 20 mm; - - - - 17 mm; - · - · - 12 mm; and · · · · · 8 mm (the dotted line denotes the obtained burning law)

Из рис. 6, а видно, что для топлива марки Т2 в различных экспериментах наблюдается небольшое отличие в значениях скорости горения. Аналогично результатам манометрических исследования для топлива Т2 (см. рис. 6, б) также наблюдается период разгорания с выходом на постоянную скорость горения, не зависящую от давления, а значит, торцевой закон горения топлива марки Т2 можно оставить в виде (2).

Эксперименты с топливом марки Т1 в условиях сопловой бомбы не проводились, так как анализ горения топлива Т2 в торцевом режиме показал, что при горении топлива марки Т1 в аналогичных условиях диаметр сопла будет отли-

чаться незначительно и существенно не изменит картину газоприхода при спаде давления после открытия сопла.

Параметрическое исследование горения высокоплотных топлив для различных сопел

Проведя обработку экспериментальных данных с использованием полученных законов горения, решая прямую задачу внутренней баллистики с движением поршня и истечением газо-пороховой смеси, получаем хорошее согласование формы расчетных и экспериментальных зависимостей кривых давления от времени на всех участках (при росте и снижении давления). На рис. 7 представлен результат согласования расчетной и экспериментальной зависимостей давления от времени при сгорании топлива Т2 в условиях сопловой установки.

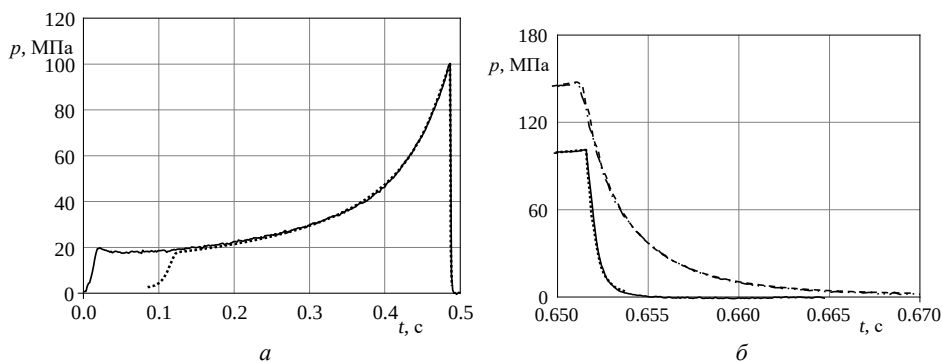


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные зависимости давления от времени для различных диаметров критического сечения сопла: 20 мм (— — эксперимент, — расчет);

8 мм (· · · · · — эксперимент, — — — — — расчет)

Fig. 7. Calculated and experimental time dependences of pressure at various nozzle diameters: 20 mm (— — experiment, — calculation) and 8 mm (· · · · · — experiment, — — — — — calculation)

Обработка экспериментальных результатов проводилась с применением аппарата математического моделирования [12]. Получено хорошее согласование по форме кривой давления на восходящей и нисходящей ветвях. Рассогласование по величине максимального давления не превысило 5%. Это свидетельствует о том, что закон скорости горения при падении давления не изменяется в данном диапазоне давлений.

С применением данного закона горения топлива марки Т2 проведено параметрическое исследование влияния диаметра критического сечения сопла на формирование картины газоприхода в камере сопловой установки. На рис. 8 представлены результаты расчетного параметрического исследования в виде зависимостей давления от времени для различных диаметров критических сечений сопла. Из графиков видно, что для каждого типа топлива можно подобрать такой диаметр истечения, при котором давление в камере сопловой установки будет повышаться или оставаться постоянным в период горения заряда.

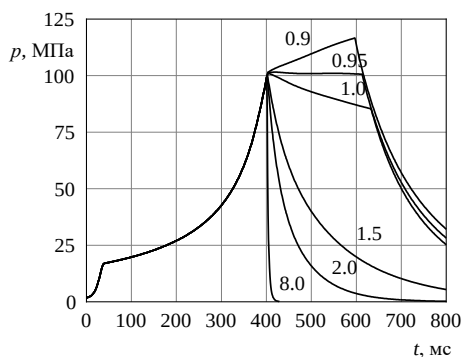


Рис. 8. Расчетные зависимости давления от времени для различных режимов истечения сопла; диаметры критических сечений: 8.0, 2.0, 1.5, 1.0, 0.9 мм при давлении 100 МПа
Fig. 8. Calculated time dependences of pressure at various nozzle flow regimes with nozzle throat diameters of: 8.0; 2.0; 1.5; 1.0; and 0.9 mm at a pressure of 100 MPa

На рис. 9 показаны расчетные зависимости давления в сопловой камере от времени для различных режимов истечения сопла. Рассмотрим диаметры критического сечения сопла 0.9 и 1.0 мм при режимах форсирования снаряда-заглушки, соответствующих давлению 100, 150 и 200 МПа.

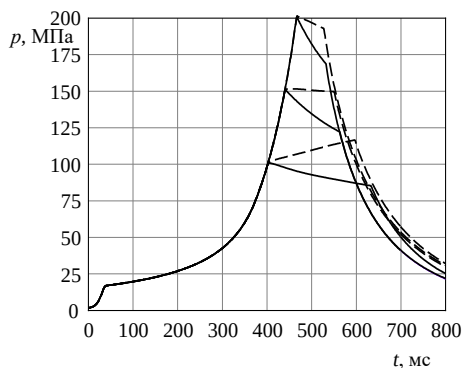


Рис. 9. Расчетные зависимости давления от времени для различных режимов истечения сопла:
 - - - - - 0.9 мм при давлении 100 МПа, 150 МПа, 200 МПа
 ——— 1.0 мм при давлении 100 МПа, 150 МПа, 200 МПа
Fig. 9. Calculated time dependences of pressure at various nozzle flow regimes:
 - - - - - a nozzle diameter of 0.9 mm at pressures of 100, 150, and 200 MPa;
 ——— a nozzle diameter of 1.0 mm at pressures of 100, 150, and 200 MPa

Из рис. 9 видно, что при истечении из сопла с диаметром 1.0 мм при любом давлении открытия сопла в интервале 100–200 МПа газоприход от горящего в торцевом режиме топлива не превышает расход газа через сопло, тем самым давление в сопловом блоке постоянно понижается. Уменьшение диаметра сопла до 0.9 мм при давлении открытия сопла 100 МПа позволяет получить газоприход от горящего в торцевом режиме топлива, превышающий расход газа через сопло, тем самым повышая давление в сопловом блоке. Однако при увеличении давле-

ния открытия сопла до 150 и 200 МПа роста давления в сопловой камере уже не наблюдается, а присутствует его некоторое снижение, что говорит о необходимости регулировки уровня газоприхода от топлива или изменения критического диаметра сопла для поддержания равномерной тяги.

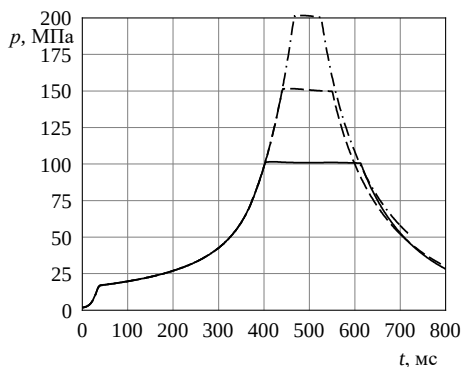


Рис. 10. Расчетные зависимости давления от времени для различных режимов истечения из сопла:

——— — 0.95 мм (100 МПа); — — — — — 0.9 мм (150 МПа); — · — · — — — — — 0.87 мм (200 МПа)

Fig. 10. Calculated time dependences of pressure at various nozzle flow regimes:

——— — 0.95 mm (at 100 MPa); — — — — — 0.9 mm (at 150 MPa); and — · — · — — — — — 0.87 mm (at 200 MPa)

На рис. 10 представлены расчетные зависимости давления от времени для нескольких вариантов диаметров критического сечения сопла (0.87, 0.9, 0.95 мм), позволяющие поддерживать одинаковый уровень давления в сопловой камере при различных давлениях в камере сопловой установки (100, 150 и 200 МПа) без изменения величины газоприхода от топлива. Другим вариантом поддержания равномерного давления в сопловой камере может быть управление поверхностью пастообразного топливного элемента. Тем самым показано, что используемые высокоплотные топлива могут быть использованы для поддержания давления в полузамкнутом объеме.

Заключение

Рассмотрены некоторые особенности истечения продуктов сгорания пороха и топлива через различные конфигурации соплового блока. Предложены различные способы открытия соплового блока. Получены законы горения исследуемых высокоплотных топлив в условиях замкнутого объема и при истечении газа через сопло. Определены диаметры сечения сопла, позволяющие поддерживать одинаковый уровень давления в сопловой камере при различных давлениях в камере сопловой установки. Показано, что используемые высокоплотные топлива могут быть использованы для поддержания давления в полузамкнутом объеме. В результате расчетов получено, что при горении топлива Т2 в торцевом режиме для поддержания уровня давления в камере сопловой установки 100 МПа после открытия сопла необходимо иметь диаметр критического истечения равным 0.95 мм.

Список источников

1. Lu X., Zhou Y., Yu Y. Experimental and numerical investigations on traveling charge gun using liquid fuels // J. Appl. Mech. 2011. V. 78, is. 5. P. 051002-1– 051002-6.
2. Liang T., Lv B., Ma Z., Zhong-liang Xiao. The research on energy releasing control of travelling charge // International Conference on Computer Science and Electronic Technology (ICCSET 2014). 2014. P. 67–70.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Новожилов Б.В., Каганова З.И., Беляев А.А. Нестационарные режимы горения пороха в полузамкнутом объеме // Химическая физика. 2009. Т. 28, № 12. С. 31–39.
7. Маршаков В.Н., Новожилов Б.В. Переходные режимы горения баллиститного пороха в полузамкнутом объеме // Химическая физика. 2011. Т. 30, № 1. С. 25–37.
8. Иванов С.М., Цуканов Н.А. Оценка динамических характеристик нестационарного горения твердого топлива в полузамкнутом объеме по измерениям регулируемого давления // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 1. С. 80–91.
9. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М. : Оборонгиз, 1962. 703 с.
10. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Саморокова Н.М. Интегриродифференциальный метод определения законов скорости горения конденсированных систем в условиях постоянного объема // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 1. С. 67–71.
11. Рогаев 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
12. 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. Lu X., Zhou Y., Yu Y. (2011) Experimental and numerical investigations on traveling charge gun using liquid fuels. *Journal of Applied Mechanics*. 78(5). Article 051002. pp. 1–6. doi: 10.1115/1.4004292
2. Liang T., Lv B., Ma Z., Xiao Z. (2015) The research on energy releasing control of travelling charge. *Proceedings of the 2014 International Conference on Computer Science and Electronic Technology*. pp. 67–70. doi: 10.2991/iccset-14.2015.15
3. Ermolaev B.S., Sulimov A.A., Roman'kov A.V. (2013) Prisoedinyonnyy vysokoplotnyy zaryad konvektivnogo gorenija v kombinirovannoy skheme vystrela: Novye rezul'taty [Traveling high-density charge of convective burning in a hybrid configuration: new results]. *Gorenie i vzryv – Combustion and Explosion*. 6. pp. 206–210.
4. Ermolaev B.S., Sulimov A.A., Roman'kov A.V., Khrapovskiy V.E., Belyaev A.A., Krouli A.B. (2015) Konvektivnoe gorenije blochnykh zaryadov iz semikanal'nykh porokhovyykh zeren, inhibirovannykh polivinilbutiralem [Convective combustion of block charges from seven-channel powder grains inhibited by polyvinyl butyral]. *Khimicheskaya fizika – Russian Journal of Physical Chemistry*. 34(5). pp. 47–57.

5. 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.
6. Novozhilov B.V., Kaganova Z.I., Belyaev A.A. (2009) Nestatsionarnyye rezhimy goreniya porokha v poluzamknutom ob"eme [Non-stationary modes of gunpowder combustion in a semi-closed volume]. *Khimicheskaya fizika – Russian Journal of Physical Chemistry*. 28(12). pp. 31–39.
7. Marshakov V.N., Novozhilov B.V. (2011) Perekhodnye rezhimy goreniya ballisticheskogo porokha v poluzamknutom ob"eme [Transitional modes of ballistic powder combustion in a semi-closed volume]. *Khimicheskaya fizika – Russian Journal of Physical Chemistry*. 30(1). pp. 25–37.
8. Ivanov S.M., Tsukanov N.A. (2002) Otsenka kharakteristik nestatsionarnogo goreniya tverdogo topliva v poluzamknutom ob"eme po izmereniyam reguliruemogo davleniya [Evaluation of dynamic characteristics of non-stationary combustion of solid fuel in a semi-closed volume by measuring controlled pressure]. *Fizika goreniya i vzryva – Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 38(1). pp. 80–91.
9. Serebryakov M.E. (1962) *Vnutrennyaya ballistika stvol'nykh sistem i porokhovyykh raket* [Internal ballistics of barrel systems and powder rockets]. Moscow: Oborongiz.
10. Khomenko Yu.P., Ishchenko A.N., Samorokova N.M. (1999) Integrodifferentsial'nyy metod opredeleniya zakonov skorosti goreniya kondensirovannykh sistem v usloviyakh postoyannogo ob"ema [Integral and differential method for determining the laws of the burning rate of condensed systems under constant volume conditions]. *Fizika goreniya i vzryva – Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 35(1). pp. 67–71.
11. Rogaev K.S., D'yachkovskiy A.S., Ishchenko A.N., Samorokova N.M., Stepanov E.Yu., Gimaeva N.R. (2023) Issledovanie priznakov zazhiganiya i goreniya vysokoplotnykh zaryadov v usloviyakh postoyannoy obstanovki [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
12. Khomenko Yu.P., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z. (1999) *Matematicheskoe modelirovanie vntriballisticheskikh protsessov v stvolovykh sistemakh* [Mathematical modeling of intra-ballistic processes in barrel systems]. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN.

Сведения об авторах:

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

Рогаев 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

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

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

Степанов Евгений Юрьевич – младший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: stepanov_eu@mail.ru

Кодякова Анастасия Денисовна – студент физико-технического факультета Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: ssstasya.kod@mail.ru

Information about the authors:

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

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

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

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

Stepanov Evgeniy Yu. (Junior Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: stepanov_eu@mail.ru

Kodyakova Anastasiya D. (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ssstasya.kod@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.04.2023; принята к публикации 10.07.2023

The article was submitted 17.04.2023; accepted for publication 10.07.2023