

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Национальный исследовательский
Томский государственный университет
НИИ прикладной математики и механики ТГУ



**X Всероссийская научная конференция с международным участием
«Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и
небесной механики – 2020», 18–20 ноября 2020**

**X All-Russian Scientific Conference with international participation
«Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics – 2020»,
November 18–20, 2020**

Томск
2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПРИСОЕДИНЕННОГО ЗАРЯДА ИЗ ПАСТООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В БАЛЛИСТИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

**Бураков В.А., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Касимов В.З.,
Рогаев К.С., Саморокова Н.М.**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

E-mail: rogaev@ftf.tsu.ru

Ключевые слова: горение топлив, пастообразные топлива, ствольные системы, газодинамика, внутренняя баллистика, присоединенный заряд

Аннотация: Проведено экспериментально-теоретическое исследование, посвященное изучению горения пастообразного топлива при использовании его в качестве присоединенного заряда. В работе принято, что топливо диспергирует на частицы, которые догорают в заснарядном объеме. Для скорости диспергирования топлива рассмотрен эмпирический закон как функция ускорения метаемой сборки (снаряд+присоединенный заряд). Показан метод определения параметров этого закона как единых параметров согласования расчетных и экспериментальных данных для серии опытов с различными массами снаряда и типами порохового заряда. Проведено сравнение с известным общепринятым законом, где скорость диспергирования зависит от давления в газе.

THE RESEARCH OF THE COMBUSTION OF A TRAVELLING CHARGE MADE OF PASTE-LIKE PROPELLANT DURING A BALLISTIC EXPERIMENT

**Valery A. Burakov, Viktor V. Burkin, Alexei S. Diachkovskiy, Aleksandr N. Ishchenko,
Vladimir Z. Kasimov, Konstantin S. Rogaeв and Nina M. Samorokova**

National research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: rogaev@ftf.tsu.ru

Keywords: propellants combustion, paste-like propellants, barrel systems, gas dynamics, internal ballistics, travelling charge

Abstract: Experimental and theoretical research was conducted which was dedicated to studying paste-like propellant combustion when the propellant is used as a travelling charge. In the work it is accepted that the propellant disperses into particles which burn out in the space behind the shot. The empirical law as an acceleration function of a throwing assembly (charge + attached charge) is considered for the propellant dispersion velocity. The method of identifying these parameters is shown as integrated parameters of matching calculating and experimental data for the series of experiments with different charge masses and types of powder charge. The comparison with well-known conventional law is made in which the dispersion velocity depends on gas pressure.

Использование в выстреле присоединенного заряда (ПЗ) из высокоэнергетического пастообразного топлива является одним из перспективных способов повышения дульной скорости метаемого элемента (МЭ) [1, 2]. Для эффективного и безопасного использования топлива необходимо проведение прогнозных расчетов и изучение газодинамической картины выстрела. Достоверность расчетов определяется тем насколько точно описывается в математической модели горение топлива.

Одним из способов получения закона горения топлива – получение параметров закона диспергирования на основании баллистического экспериментов. В проведенных экспериментах использовались МЭ трех масс $q = 100, 200$ и 400 г и три вида порохового метательного заряда с разной толщиной горящего свода ($2e$) $0.22, 0.4, 0.6$ мм с целью обеспечения различных условий разгона и нагрузки ПЗ. При проведении экспериментов измерялись давление в камере заряжания $P(t)$, скорость МЭ $V(t)$ в стволе и скорость МЭ на дульном срезе V_d . Масса порохового заряда выбрана так, чтобы максимальное давление в камере заряжания составляло 230 ± 10 МПа.

Коэффициенты в законе горения определяются как параметры согласования расчетных и экспериментальных данных при решении прямой задачи внутренней баллистики. В серии расчетов эти параметры меняются в определенном диапазоне с целью достижения максимально возможного совпадения экспериментальных и расчетных величин P_{\max} и V_d , и формы кривых $P(t)$ и $V(t)$. В этом случае важную роль играет выбор изменяемых коэффициентов и вида исследуемой зависимости.

Для математического моделирования использовался программный комплекс, разработанный в НИИ ПММ ТГУ [3]. 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. Соответствующими условиями динамической совместности связаны параметры справа и слева от фронта. Топливо на фронте диспергирования частично превращается в газ (в данном случае 10%), а частично распадается на частицы, которые горят в послыном режиме [3, 4].

$$U_c = U_1 \frac{P}{P_{\text{атм}}}$$

где U_1 – коэффициент, зависящий от химической природы топлива,
 P – давление в газе,
 $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление,
 толщина горящего свода частиц считалась равной 0.3 мм.

Считаем, что ПЗ начинает гореть позже порохового заряда. Характеристикой начала

диспергирования ПЗ является импульс давления на фронте горения $I = \int P dt$. Данный параметр использовался как параметр согласования расчетно-экспериментальных данных.

Принято считать, что скорость диспергирования ПЗ зависит от давления в газе на фронте горения [4]. Однако в работе [5] показано, что ПЗ горит медленнее с тяжелым снарядом. Так как чем тяжелее снаряд, тем меньше перепад давления по длине ПЗ dP_s/dl при одинаковом давлении на фронте горения P_{s1} и длине ПЗ l , предположено существование зависимости скорости диспергирования U_s от dP_s/dl . Если считать, что плотность топлива $\rho = \text{const}$, то

$$\frac{dP_s}{dl} = \frac{P_{s1} - P_{s2}}{l} = \frac{(P_{s1} - P_{s2})S}{m} \rho = \frac{dV}{dt} \rho$$

где P_{s2} – давление на правой границе ПЗ,
 S – площадь поперечного сечения ПЗ,
 m – масса ПЗ.

То есть можно использовать зависимость скорости диспергирования от ускорения метаемой сборки МЭ+ПЗ как более удобное в данной математической модели

$$U_s = 0, \text{ при } I < I_1,$$

$$U_s = A_s \frac{dV/dt}{g}, \text{ при } I \geq I_1. \quad (1)$$

где I_1 – импульс начала диспергирования ПЗ,

A_s – коэффициент в законе скорости диспергирования,

g – ускорение свободного падения.

В результате для всей серии опытов при коэффициенте скорости диспергирования ПЗ $A_s = 1.05$ мм/с и послыного горения частиц $U_l = 0.05$ мм/с получено практически полное совпадение расчетных и экспериментальных временных зависимостей, рассогласование расчетных и экспериментальных данных составляет не более 2 % по давлению и не более 1 % по дульной скорости. Закон диспергирования имеет универсальный характер не только при различных массах снаряда [5], но и при различных типах порохового заряда.

Построив для данной серии опытов зависимость скорости диспергирования от давления (рисунок 1) видим, что при одном давлении величина скорости диспергирования различна для разных типов пороха и масс МЭ, что свидетельствует о влиянии динамики нарастания давления на фронте горения ПЗ. Можно сделать вывод, что не существует единый закон для скорости диспергирования в зависимости от давления. Зависимость от P может быть определена использована при одном типе порохового заряда и фиксированной массе МЭ, когда изменения давления P и ускорения dV/dt примерно пропорциональны.

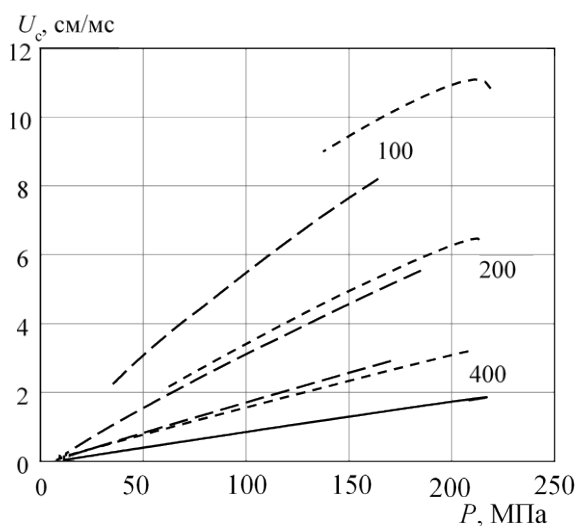


Рис. 1 Зависимость скорости диспергирования ПЗ от давления в газе на фронте в опытах с МЭ массой соответственно 100, 200 и 400 г:
- - - - порошок $2e = 0.22$; - - - - порошок $2e = 0.4$; — — порошок $2e = 0.6$

В данной работе рассмотрен закон горения и диспергирования пастообразного топлива как зависимость от ускорения метаемой сборки применимый в достаточно широком диапазоне параметров выстрела. Предложен метод определения параметров этого закона как параметров согласования расчетных и экспериментальных данных для серии опытов с различными массами МЭ и различными типами порохового заряда.

В настоящей работе использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 8.2.09.2018 Программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского государственного университета.

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. Б.С. Ермолаев, А.В. Романьков, А.А. Сулимов Баллистическое подобие для выстрелов с присоединенным зарядом // Горение и взрыв, 2019. Том 12. № 4 стр.138-144.

3. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 256 с.
4. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. – М.: Оборонгиз, 1962. – 703с.
5. Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Касимов В.З., Рогаев К.С., Саморокова Н.М. Особенности диспергирования и горения пастообразного топлива в баллистических экспериментах // Сборник материалов IX Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», посвященной 55-летию полета Ю. А. Гагарина, г. Томск, 21-25 сентября 2016 г. – Томск, 2016 – С. 157-158.

References

1. *Xin Lu, Yanhuang Zhou, Yonggang Yu.* Experimental and numerical investigations on traveling charge gun using liquid fuels. *J. Appl. Mech.* 2011. V. 78, Issue 5, Pp. 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. V.12, Issue 4. Pp. 138–144. (rus)
3. *Khomenko Yu.P., Ishchenko A.N. and Kasimov V.Z.* Mathematical modeling of processes in the internalballistics barrel systems. *Novosibirsk: Publication of SB RAS.*1999. 256 P. (rus)
4. *Serebryakov M.E.* Internal ballistics of barrel systems and powder rockets. *Moscow: Oborongiz.* 1962. 703 P. (rus)
5. *D'yachkovskiy A.S., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z., Rogaev K.S., Samorokova N.M.* Features of dispersion and combustion of paste-like propellant in ballistic experiments. *Proceedings of the IX All-Russian Conference "Fundamental and Applied Problems of Modern Mechanics"*, Tomsk: RIAMM. Pp. 157–158. (rus)