

Copyright © 2022 by Cherkas Global University



Published in the USA  
Voennyi Sbornik  
Has been issued since 1858.  
E-ISSN: 2409-1707  
2022. 10(2): 112-120

DOI: 10.13187/vs.2022.2.112  
<https://vs.cherkasgu.press>



## Generalized Mathematical Model of Internal Ballistics of Pyrotechnic Systems

Daria A. Korepanova <sup>a, \*</sup>

<sup>a</sup> Kalashnikov's Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### Abstract

Pyrotechnic installations using the combustion energy of a powder charge and powder pressure accumulators are widely used in special devices used by law enforcement agencies and in production. In addition to single-acting automation elements, pyrotechnic devices are used to create pyrocommunications, as well as moderators and timers. Auxiliary systems are known, for example, pyrotechnic cutters and heaters.

In the literature, each type of these devices is characterized by its specific mathematical model, taking into account the characteristics of each device. The paper analyzes three types of mathematical models: the author's model of the internal ballistics of an underbarrel grenade launcher, which received state registration, as well as the internal ballistics model of cannon artillery and the internal ballistics of a rapid-firing aircraft gun. The main approaches to the formation of a complex model are formulated.

**Keywords:** device for special operations, pyrotechnic principle of operation, mathematical model, synthesis.

### 1. Введение

Традиционно считается, что впервые порох был изобретен в Китае. Хотя о том, где именно изобрели порох, спорят Индия, Китай, арабский мир и Западная Европа. Точную дату появления дымного пороха никто не знает, но в литературе распространено мнение, что это был примерно VIII в. до н.э. Долгое время дымный порох использовался только для фейерверков, пока в XIV в. не изобрели оружие на основе пороха. Самый ранний рисунок с изображением огнестрельного орудия, так называемой пушки Милемете, поддается точной датировке, относится к 1326 году ([Рисунок 1](#)).

Черным порохом заряжали все боевое оружие вплоть до конца XIX в., но при этом исследования по выработке альтернативного состава пороха начались уже в XVII в. Так, например, М.В. Ломоносов производил опыты, в результате которых установил рациональное соотношение всех составляющих пороховой смеси.

Новым шагом в истории пороха являлось получение нитроцеллюлозы, или пироксилина, химиком А. Браконо в 1832 г. Свойства пироксилина были исследованы многими исследователями, например, в 1848 г. А.А. Фадеевым и Г.И. Гессом было установлено, что данное вещество по своей мощности в несколько раз превосходит черный порох.

\* Corresponding author

E-mail addresses: [darya.korepanova.99@mail.ru](mailto:darya.korepanova.99@mail.ru) (D.A. Korepanova)



**Рис. 1.** Установка из рукописи Вальтера де Милемете и ее современная реконструкция

Получить бездымный порох из пироксилина впервые удалось французскому химику Полю Велли (или Вьелю) в 1884 г. На основе ряда теоретических и лабораторных исследований Велли спроектировал и изготовил из пластифицированного спиртоэфирным растворителем пироксилина, путем формования при прессовании из полученной пороховой массы пороховые элементы ленточной и пластинчатой формы. Основываясь на детальном лабораторном исследовании скорости горения полученного пороха, Велли рассчитал размеры ленточного пороха для 65-мм пушки, изготовил порох и получил при полигонных испытаниях практически результаты, показавшие полное соответствие с расчетными данными. Такое совпадение теоретических предпосылок с практическими результатами послужило основанием Парижской академии наук для присуждения Велли Высшей награды – премии Леконта.

Бездымный порох Велли был настоящим революционным открытием в области огнестрельного оружия, так как данный порох имел ряд преимуществ:

1) Порох почти не давал дыма, тогда как ранее используемый дымный порох после нескольких выстрелов значительно снижал поле видимости бойца;

2) Порох Велли позволял пуле вылететь со значительно большей скоростью, что повысило точность и дальность стрельбы;

3) Бездымный порох давал большую мощность, что позволило уменьшить количество его использования и облегчить боеприпасы;

4) Снаряжение патронов пироксилиновым порохом позволяло срабатывать им даже в мокром состоянии, тогда как черный порох было необходимо предохранять от влаги.

Вскоре исследователями было получено новое вещество – нитроглицериновый бездымный порох. В качестве пластификатора в данном случае служил тринитроглицерин. Такой порох оказался очень мощным и до сих пор находит свое применение в современной артиллерии.

В настоящее время порох, основанный на нитроцеллюлозе, используется в современном автоматическом и полуавтоматическом оружии. Кроме того в специальных устройствах, нашли широкое применение и пиротехнические установки, использующие энергию горения порохового заряда. Они являются необходимым элементом систем автоматики, например, ракетных (пусковые, отсечные клапана и др.) (Китаев, Глазырин, 2017) или авиационных систем разового срабатывания, например, катапультных устройств (Алексеев и др., 2018). Пиротехнические составы используются для создания пиросвязей между отдельными блоками сложных систем, в которых они также могут использоваться как пиротехнические замедлители или таймеры (Павлов и др., 2018). В боевых условиях они могут выступать интенсивным источником теплового излучения, для создания помех головкам самонаведения огневых средств противника, например, ПТКР «Javelin» (Евдокимов и др., 2018).

Из систем вспомогательного назначения для специальных операций нашли применение пиротехнические резакки (Павлов, Дудырев, 2018), в которых важными

качествами становятся легкость и компактность, в отличие от традиционных, например, газовых или электродуговых резаков. Эти же преимущества, по сравнению с устройствами других принципов действия, привели к применению пиротехнических обогревательных устройств, например, при эксплуатации бронетехники в условиях низких температур во время разогрева двигателя или его пуска (Шмаков, Телятников, 2014). Полезным оказываются также использование пиротехнических устройств в быстроактивируемых резервных источниках тока (Гришин и др., 2011) или, например, в системах пожаротушения (Алтухов и др., 2011).

Кроме того, пиротехнические установки могут использоваться в технологических процессах, например, для получения водорода (Комиссаров и др., 2009) или в оборудовании для проведения ударных испытаний (Соломенников и др., 2016).

Таким образом, совершенствование пиротехнических устройств является одним из приоритетных направлений развития техники специального назначения, а разработка математических моделей, описывающей всю особенность, протекающих в пиротехнической установке процессов, является актуальной.

## 2. Обсуждение и результаты

Обзор математических моделей пиротехнических устройств

Наиболее важной для модели пиротехнического устройства является зависимость скорости горения от давления. Для определения этой зависимости разными авторами были предложены формулы, носящие общее название закона скорости горения. Формула, предложенная Велли, имеет вид

$$U = Ap^{\nu},$$

где  $U$  – скорость горения,  $A$  и  $\nu$  – некоторые константы, отличающие одно топливо от другого,  $p$  – текущее давление пороховых газов.

Велли принимал для обычных дымных порохов величину  $\nu = 1/2$ , М.Е. Серебряков для медленногорящих дымных порохов –  $\nu = 1/5$ , а Г.А. Забудский для пироксилиновых порохов –  $\nu = 0,93$ .

Также при изучении горения пороха используются такие законы, как закон Мюруара:

$$U = Ap + B,$$

где  $A$  и  $B$  – некоторые константы, отличающие одно топливо от других.

Или закон Шарбонье:

$$U = U_1 p,$$

где  $U_1$  – скорость горения пороха при нормальном давлении.

Рабочие давления в камере сгорания РДТТ составляют обычно 5–15 МПа. Для этого диапазона наилучшую сходимость с экспериментом дает формула Велли. При горении порохов, камерное давление обычно превышает 30 МПа, в связи с чем наилучшую сходимость дает формула Шарбонье. Поэтому этот закон горения иногда называют артиллерийским. При значительных потерях тепла с радиационным тепловым потоком, лучше подходит формула Мюруара.

Константы, входящие в законы, отличают горение одной рецептуры порохов от другой. Например, при нормальных условиях (давление равно 0,1 МПа), скорость горения дымного ружейного пороха на порядок больше пироксилинового. Но при давлениях свыше 200 МПа она становится намного меньше.

Традиционно, задача внутренней баллистики решается с рядом допущений. В работе И.А. Балаганского они сформулированы следующим образом:

1. Горение порохового заряда подчиняется геометрическому закону горения.
2. Справедлив линейный закон скорости горения пороха.
3. Состав пороховых газов не изменяется.
4. Теплопередача от пороховых газов к стенкам ствола отсутствует.
5. Продукты горения – пороховые газы и несгоревший порох распределены равномерно в заснарядном пространстве.
6. Волновые процессы в продуктах горения не учитываются.
7. Воспламенитель не учитывается.

8. Сила сопротивления поступательному движению снаряда, а также разница между скоростью снаряда относительно ствола и баллистическим давлением, с одной стороны, и скоростью снаряда относительно Земли и давлением пороховых газов на дно снаряда, с другой стороны, учитываются с помощью коэффициента фиктивности.

9. Второстепенные работы, совершенные пороховыми газами, пропорциональны основной работе и учитываются с помощью коэффициента фиктивности.

10. Период форсирования не рассматривается, а сила сопротивления врезанию учитывается через начальные условия движения снаряда.

11. Параметр расширения пороховых газов не изменяется.

12. Процесс истечения пороховых газов не учитывается (Балаганский, 2017).

Предпочтительно использование уравнений при аргументе время  $t$ . В качестве альтернативы, можно, например, использовать такой аргумент, как координата  $l$  снаряда в канале ствола. Но, поскольку  $l$  и  $t$  пропорциональны, характер зависимостей меняется незначительно, а функции с аргументом  $t$  более естественные и наглядные. В других случаях более удобно за независимую переменную – аргумент взять один из остальных пиродинамических элементов.

Несмотря на, казалось бы, общую задачу внутренней баллистики, существует множество моделей применительно к каждому виду пиротехнической системы. Рассмотрим три подобных примера:

- математическая модель, сформулированная нами, применительно для гранаты подствольного гранатомета (Крауфорд и др., 2021),

- математическая модель, приведенная в учебном пособии по ствольной артиллерии (Балаганский, 2017),

- математическая модель, сформулированная для авиационной пушки (Бабаджанов и др., 2022).

Первое, что учитывается во всех трех работах – это уравнение скорости ( $l$  – координата снаряда или гранаты при движении по каналу ствола):

$$\frac{dl}{dt} = v.$$

Оно учитывает изменение координаты на всем протяжении ствола и, фактически является оператором для преобразования системы уравнений от аргумента в другой: от переменных по координате к переменным по времени и наоборот.

Второе – это уравнение закона горения. В нашей математической модели данное уравнение прописано в чистом виде. Учитывая связь скорости горения и горящего свода  $e$ , а также то, что для горения дымного пороха, наиболее уместен закон Шарбонье:

$$\frac{de}{dt} = Ap.$$

В уравнениях двух других авторов приводится следующее соотношение:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{p}{I_k'}$$

которое получается в результате дифференцирования уравнения скорости горения пороха  $de / dt = u$ , и введения в него относительной толщины сгоревшего пороха:  $z = e / e_1$ , а также величины конечного импульса  $I_k = e_1 / u_1$ .

Далее нами было записано уравнение движения гранаты в канале ствола, получающееся из закона Ньютона:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(p - p_h)F}{m} - g(\sin \alpha - f \cos \alpha),$$

где  $p$  – давление пороховых газов;  $p_h$  – давление окружающей среды;  $F$  – площадь сечения гранаты ( $F = 0,25 \pi d^2$ );  $m$  – масса гранаты;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\alpha$  – угол возвышения ствола гранатомета;  $f$  – коэффициент трения гранаты о канал ствола.

В двух других моделях процесс поступательного движения снаряда описывается следующим уравнением:

$$\frac{\varphi q}{g} \frac{dv}{dt} = Sp,$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения канала ствола,  $\varphi q$  – фиктивный вес снаряда,  $g$  – ускорение свободного падения.

Во всех случаях данные уравнения описывают изменение скорости в зависимости от давления пороховых газов, массы снаряда и площади проходного сечения.

И.А. Балаганский описывает процесс расширения пороховых газов следующим уравнением:

$$pS(l_\psi + l) = f\omega\psi - \frac{\theta\varphi q v^2}{2g},$$

где  $l_\psi$  – приведенная длина свободного объема камеры,  $f$  – сила пороха,  $\omega$  – вес порохового заряда,  $\theta$  – параметр расширения пороховых газов.

А.Б. Бабаджанов с соавторами приводят подобное уравнение:

$$pS(l_\psi + l) + v^2 \frac{\varphi q}{2g} (k - 1) = f\omega\psi.$$

Нами же было использовано уравнение для давления пороховых газов, оно вытекает из уравнения состояния, вывод которого был произведен в одной из наших работ (Митюков и др., 2020):

$$\frac{dp}{dt} = \frac{k-1}{V} \left( \rho \frac{de}{dt} S(e) c_v T - G_2 c_v T \right) - \frac{p}{V} \frac{dV}{dt},$$

где  $c_v$  – теплоемкость продуктов сгорания.

Следующим общим уравнением всех анализируемых моделей является уравнение приведенной длины свободного объема камеры. По И.А. Балаганскому это:

$$l_\psi = l_0 \left[ 1 - \frac{\Delta}{\delta} - \left( \alpha - \frac{1}{\delta} \right) \Delta \psi \right],$$

где  $l_0$  – приведенная длина камеры,  $\Delta$  – плотность заряжания,  $\delta$  – плотность пороха,  $\alpha$  – коволюм пороховых газов.

А.Б. Бабаджанов с соавторами находят ее так:

$$l_\psi = \frac{1}{S} \left[ W_{\text{кам}} - \frac{\omega}{\delta} (1 - \psi) - \alpha \psi \omega \right],$$

Мы в нашей математической модели определяем объем за гранатой, с учетом того, что граната движется и меняется сгоревший объем:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{de}{dt} S(e) + \frac{dl}{dt} S,$$

где  $S(e)$  – текущее значение поверхности горения, единственным аргументом которой является горящий свод  $e$ ;  $S$  – площадь канала ствола ( $S = 0,25 \pi D^2$ ). Начальный объем будет совпадать с объемом камеры:  $V_0 = V_k$ .

Кроме того, особенности каждой из технических систем определяют и набор уравнений, характерных только для данного случая.

В систему уравнений И.А. Балаганского входит уравнение относительного веса сгоревшего пороха  $\psi$ :

$$\psi = kz(1 + \lambda z),$$

где  $z = e / e_1$  – относительная толщина слоя сгоревшего пороха,  $e_1$  – половина толщины горящего свода пороха,  $k, \lambda$  – характеристики формы порохового заряда.

У А.Б. Бабаджанова с соавторами это уравнение имеет вид:

$$\psi = \chi z(1 + \lambda z + \mu z^2),$$

где  $\chi, \lambda, \mu$  – характеристики формы пороха.

Кроме того, А.Б. Бабаджанов с соавторами включают в систему еще несколько уравнений, тогда как И.А. Балаганский предполагает их справочными.

1. Уравнение относительной поверхности пороха:

$$\sigma = 1 + 2\lambda z + 3\mu z^2,$$

где  $\sigma$  – относительная поверхность пороха.

2. Уравнение относительной части сгоревшего пороха:

$$\frac{d\psi}{dz} = \chi\sigma,$$

где  $\psi$  – относительная часть сгоревшего пороха.

3. Поправку на температуру пороха:

$$\frac{T}{T_r} = 1 - \frac{B(k-1)}{2} \frac{x^2}{(\psi_0 + \chi\sigma_0 x + \chi\lambda x^2)}$$

где  $T_r$  – температура горения пороха,  $K$ ;  $B$  – параметр условий заряжания Дроздова;  $x$  – относительная толщина пороха, сгоревшего от начала движения снаряда;  $\psi_0$  – относительная часть пороха, сгоревшего к началу движения снаряда;  $\sigma_0$  – относительная поверхность пороха, сгоревшего к началу движения снаряда.

В нашей модели из-за плохой obtюрации гранаты в гранатомете пришлось учесть газ, прорывающийся по зазору. Это удалось сделать в уравнении для плотности пороховых газов:

$$\frac{d\rho_r}{dt} = \frac{1}{V} \left( \rho \frac{de}{dt} S(e) - G_2 \right) - \frac{\rho_r}{V} \frac{dV}{dt},$$

которое получилось из уравнения:

$$\frac{d\rho_r}{dt} = \frac{1}{V} \frac{dM}{dt} - \frac{M}{V^2} \frac{dV}{dt},$$

где  $\rho$  – плотность пороха,  $G_2$  – газорасход через серповидный зазор между гранатой и каналом ствола гранатомета:

$$G_2 = p F_k \sqrt{\frac{k}{RT} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

Кроме того, наша модель была сформулирована в адиабатической постановке, что невозможно для автоматических пушек, описанных в работе (Бабаджанов и др., 2022).

### 3. Заключение

Комплексная математическая модель пиротехнического устройства была апробирована на ряде существующих в настоящее время технических систем. Во всех случаях были получены удовлетворительные по точности результаты. Сама модель была реализована в программном продукте Delphi XE3 (Митюков, Корепанова, 2021). Она дает достаточно хорошую сходимость с натурными испытаниями, что делает ее использование обоснованным.

Кроме современных технических систем, модель использовалась в целях исторической реконструкции, позволившей уточнить ряд важных технических параметров для гладкоствольной артиллерии начала XIX в. (Crawford et al., 2022).

Таким образом, модель доработанная нами может использоваться в гладкоствольной артиллерии, как для проектирования нового оружия, так и для идентификации параметров старых образцов и их реконструкции.

### Литература

Алексеев и др., 2018 – Алексеев А.С., Беклемищев Ф.С., Лалабеков В.И., Правидло М.Н., Самсонович С.Л., Тихонов К.М. Построение математической модели источника энергии и исполнительного механизма адаптивного авиационного катапультного устройства // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018. № 7. С. 376-384.

Алтухов и др., 2011 – Алтухов О.И., Самборук А.Р., Фрыгин В.В. Разработка пиротехнического газогенерирующего элемента для порошковых огнетушителей // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13. № 6. С. 67-71.

Бабаджанов и др., 2022 – Бабаджанов А.Б., Подкопаев И.А., Подкопаев А.В., Должиков В.И. Комбинированная математическая модель внутренней и промежуточной баллистики авиационного артиллерийского оружия // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. № 4. С. 177-185.

Балаганский, 2017 – Балаганский И.А. Основы баллистики и аэродинамики. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. 200 с.

Гришин и др., 2011 – Гришин С.В., Каверин О.Н., Мамонтова Ю.Е., Стекольников Ю.А. Быстроактивируемый резервный источник тока на основе пиротехнического материала с высокой скоростью горения // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2011. Т. 17. № 3. С. 801-807.

[Евдокимов и др., 2018](#) – Евдокимов В.И., Сильников М.В., Алёшин А.С. Оценка возможности противодействия ПТРК FGM-148 Javelin средствами оптико-электронного противодействия // *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*. 2018. № 3-4 (117-118). С. 56-61.

[Китаев, Глазырин, 2017](#) – Китаев В.Н., Глазырин А.А. Пиротехнический клапан // *Надежность и качество*. 2017. № 2. С. 201-203.

[Комиссаров и др., 2009](#) – Комиссаров П.В., Ибрагимов Р.Х., Соколов Г.Н., Борисов А.А. Пиротехнический источник водорода на основе горения смесей алюминия с водой // *Горение и взрыв*. 2009. № 2. С. 73-77.

[Крауфорд и др., 2021](#) – Крауфорд К.Р., Митюков Н.В., Корепанова Д.А., Бусыгина Е.Л. О возможности сведения горения пороховых зерен неизвестной формы середины XIX века к закону горения сферического зерна // *Химическая физика и мезоскопия*. 2021. Т. 23. № 1. С. 18-26. DOI: 10.15350/17270529.2021.1.2

[Митюков и др., 2020](#) – Митюков Н.В., Корепанова Д.А., Бусыгина Е.Л. Проблема устойчивости решения математической модели пиротехнического устройства // *Вестник полиции*. 2020. № 7 (1). С. 10-18. DOI: 10.13187/vesp.2020.1.10

[Митюков, Корепанова, 2021](#) – Митюков Н.В., Корепанова Д.А. Программа численного моделирования внутренней баллистики подствольного гранатомета. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021614383, 24.03.2021. Заявка № 2021613341 от 15.03.2021.

[Основания..., 1976](#) – Основания устройства и конструкция орудий и боеприпасов наземной артиллерии / Под ред. Н.Н. Королькова. М.: Воениздат, 1976. 460 с.

[Павлов и др., 2018](#) – Павлов Б.Д., Дудырев А.С., Коваленко Е.П., Сула А.П., Новикова А.Д. Горение высокометаллизированных пиротехнических составов в герметизированных устройствах // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2018. № 45 (71). С. 20-24.

[Павлов, Дудырев, 2018](#) – Павлов Б.Д., Дудырев А.С. Разработка перспективных пиротехнических составов для пироструйных резаков // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2018. № 46 (72). С. 11-15.

[Соломенников и др., 2016](#) – Соломенников Н.Н., Митюков Н.В., Бусыгина Е.Л., Ким С.Л. Пиротехнический мобильный стенд для ударных испытаний // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2016. № 4. С. 42-45.

[Шмаков, Телятников, 2014](#) – Шмаков Е.А., Телятников Ю.Н. Совершенствование системы обслуживания силовой установки танка и поддержание боеспособности экипажей в зимних условиях // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2014. № 6. С. 47-49.

[Crawford et al., 2022](#) – Crawford K., Mitiukov N., Busyгина E., Korepanova D. Simulation of combustion of a powder sample with grains distributed according to the normal law / *AIP Conference Proceedings*. 2022. Т. 2503. Pap. № 050022. DOI: 10.1063/5.0099364.

## References

[Aleksienkov et al., 2018](#) – Aleksienkov, A.S., Beklemishchev, F.S., Lalabekov, V.I., Pravidlo, M.N., Samsonovich, S.L., Tikhonov, K.M. (2018). Postroenie matematicheskoi modeli istochnika energii i ispolnitel'nogo mekhanizma adaptivnogo aviatsionnogo katapul'tnogo ustroistva [Construction of a mathematical model of an energy source and an actuator for an adaptive aviation ejection device]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 7: 376-384. [in Russian]

[Altukhov et al., 2011](#) – Altukhov, O.I., Samboruk, A.R., Frygin, V.V. (2011). Razrabotka pirotekhnikeskogo gazogeneriruyushchego elementa dlya poroshkovykh ognnetushitelei [Development of a pyrotechnic gas-generating element for powder fire extinguishers]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2011. 13(6): 67-71. [in Russian]

[Babadzhanov et al., 2022](#) – Babadzhanov, A.B., Podkopaev, I.A., Podkopaev, A.V., Dolzhikov, V.I. (2022). Kombinirovannaya matematicheskaya model' vnutrennei i promezhutochnoi ballistiki aviatsionnogo artilleriiskogo oruzhiya [Combined mathematical model of internal and intermediate ballistics of aviation artillery weapons]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 4: 177-185. [in Russian]

[Balaganskii, 2017](#) – *Balaganskii, I.A.* (2017). Osnovy ballistiki i aerodinamiki [Fundamentals of ballistics and aerodynamics]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 200 p. [in Russian]

[Crawford et al., 2021](#) – *Crawford, K.R., Mitiukov, N.V., Korepanova, D.A., Busygina, E.L.* (2021). O vozmozhnosti svedeniya goreniya porokhovykh zeren neizvestnoi formy serediny XIX veka k zakonu goreniya sfericheskogo zerna [On the possibility of reducing the combustion of powder grains of an unknown form in the middle of the 19th century to the law of combustion of a spherical grain]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*. 23(1): 18-26. DOI: 10.15350/17270529. 2021.1.2 [in Russian]

[Crawford et al., 2022](#) – *Crawford, K., Mitiukov, N., Busygina, E., Korepanova, D.* (2022). Simulation of combustion of a powder sample with grains distributed according to the normal law. *AIP Conference Proceedings*. T. 2503. Pap. № 050022. DOI: 10.1063/5.0099364

[Evdokimov et al., 2018](#) – *Evdokimov, V.I., Sil'nikov, M.V., Aleshin, A.S.* (2018). Otsenka vozmozhnosti protivodeistviya PTRK FGM-148 Javelin sredstvami optiko-elektronnoogo protivodeistviya [Evaluation of the possibility of countering the FGM-148 Javelin anti-tank systems by means of optical-electronic countermeasures]. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu*. 3-4(117-118): 56-61. [in Russian]

[Grishin et al., 2011](#) – *Grishin, S.V., Kaverin, O.N., Mamontova, Yu.E., Stekolnikov, Yu.A.* (2011). Bystroaktiviruemyi rezervnyi istochnik toka na osnove pirotekhnicheskogo materiala s vysokoi skorost'yu goreniya [Quickly activated backup current source based on a pyrotechnic material with a high burning rate]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 17(3): 801-807. [in Russian]

[Kitaev, Glazyrin, 2017](#) – *Kitaev, V.N., Glazyrin, A.A.* (2017). Pirotekhnicheskii klap [Pyrotechnic valve]. *Nadezhnost' i kachestvo*. 2: 201-203. [in Russian]

[Komissarov et al., 2009](#) – *Komissarov, P.V., Ibragimov, R.Kh., Sokolov, G.N., Borisov, A.A.* (2009). Pirotekhnicheskii istochnik vodoroda na osnove goreniya smesei alyuminiya s vodoi [Pyrotechnic source of hydrogen based on the combustion of mixtures of aluminum with water]. *Gorenie i vzryv*. 2: 73-77. [in Russian]

[Mitiukov et al., 2020](#) – *Mitiukov, N.V., Korepanova, D.A., Busygina, E.L.* (2020). Problema ustoichivosti resheniya matematicheskoi modeli pirotekhnicheskogo ustroystva [The problem of stability of the solution of a mathematical model of a pyrotechnic device]. *Vestnik politsii*. 7(1): 10-18. DOI: 10.13187/vesp.2020.1.10 [in Russian]

[Mitiukov, Korepanova, 2021](#) – *Mitiukov, N.V., Korepanova, D.A.* (2021). Programma chislennogo modelirovaniya vnutrennei ballistiki podstvol'nogo granatomet [Program for numerical simulation of the internal ballistics of an underbarrel grenade launcher]. Certificate of registration of the computer program 2021614383, 03/24/2021. Application No. 2021613341 dated 03/15/2021.

[Osnovaniya..., 1976](#) – *Osnovaniya ustroystva i konstruktsiya orudii i boepripasov nazemnoi artillerii* [Foundations of the device and the design of guns and ammunition for ground artillery] / Ed. by N.N. Korol'kov. Moscow: Voenizdat, 1976. 460 p. [in Russian]

[Pavlov et al., 2018](#) – *Pavlov, B.D., Dudyrev, A.S., Kovalenko, E.P., Susla, A.P., Novikova, A.D.* (2018). Gorenie vysokometallizirovannykh pirotekhnicheskikh sostavov v germetizirovannykh ustroystvakh [Combustion of highly metallized pyrotechnic compositions in sealed devices] // *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)*. 4 (71): 20-24. [in Russian]

[Pavlov, Dudyrev, 2018](#) – *Pavlov, B.D., Dudyrev, A.S.* (2018). Razrabotka perspektivnykh pirotekhnicheskikh sostavov dlya pirostruinykh rezakov [Development of promising pyrotechnic compositions for pyrojet cutters]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)*. 46(72): 11-15. [in Russian]

[Shmakov, Telyatnikov, 2014](#) – *Shmakov, E.A., Telyatnikov, Yu.N.* (2014). Sovershenstvovanie sistemy obsluzhivaniya silovoi ustanovki tanka i podderzhanie boesposobnosti ekipazhei v zimnikh usloviyakh [Improving the maintenance system of the tank power plant and maintaining the combat capability of crews in winter conditions]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*. 6: 47-49. [in Russian]

[Solomennikov et al., 2016](#) – *Solomennikov, N.N., Mityukov, N.V., Busygina, E.L., Kim, S.L.* (2016). Pirotekhnicheskii mobil'nyi stend dlya udarnykh ispytaniy [Pyrotechnical mobile stand for shock tests]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*. 4: 42-45. [in Russian]

## **Обобщенная математическая модель внутренней баллистики пиротехнических систем**

Дарья Алексеевна Корепанова <sup>a, \*</sup>

<sup>a</sup> Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация

**Аннотация.** Пиротехнические установки, использующие энергию горения порохового заряда, и пороховые аккумуляторы давления нашли широкое применение в специальных устройствах, применяемых силовыми ведомствами и на производстве. Кроме элементов автоматики разового срабатывания, пиротехнические устройства применяются для создания пиросвязи, а также как замедлители и таймеры. Из систем вспомогательного назначения известны, например, пиротехнические резак и обогреватели. В литературе каждый вид этих устройств характеризуется своей специфической математической моделью, с учетом особенности каждого устройства. В работе произведен анализ трех видов математических моделей: авторской модели внутренней баллистики подствольного гранатомета, получившей государственную регистрацию, а также модели внутренней баллистики ствольной артиллерии и внутренней баллистики скорострельной авиационной пушки. Сформулированы основные подходы к формированию комплексной модели.

**Ключевые слова:** устройство для специальных операций, пиротехнический принцип действия, математическая модель, синтез.

---

\* Корреспондирующий автор  
Адреса электронной почты: [darya.korepanova.99@mail.ru](mailto:darya.korepanova.99@mail.ru) (Д.А. Корепанова)