



УДК 517.958:531.72  
doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-2-13



Open  
Access

RESEARCH  
ARTICLE

## Моделирование быстропротекающих процессов с целью получения зависимостей внутрибаллистических параметров от времени

**Анастасия Олеговна Вагенлейтнер**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
vagenleytner2019@mail.ru

**Егор Андреевич Шаталин**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
egorcaminecraft@mail.ru

**Алексей Алексеевич Авдеев**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
aius@pnzgu.ru

**Аннотация.** Проводится анализ существующих методов решения основной задачи внутренней баллистики, выбирается наиболее подходящий для вычисления временных функций основных параметров. На базе выбранного метода реализуется программный комплекс, позволяющий решать основную задачу внутренней баллистики для различных начальных условий.

**Ключевые слова:** основная задача внутренней баллистики, численные методы, моделирование, проектирование

**Для цитирования:** Вагенлейтнер А. О., Шаталин Е. А., Авдеев А. А. Моделирование быстропротекающих процессов с целью получения зависимостей внутрибаллистических параметров от времени // Инжиниринг и технологии. 2024. Т. 9 (2). С. 1–5. doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-2-13

## Modeling of fast-flowing processes in order to obtain dependencies of intra-ballistic parameters on time

**Anastasiya O. Wagenleitner**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
vagenleytner2019@mail.ru

**Egor A. Shatalin**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
egorcaminecraft@mail.ru

**Alexei A. Avdeev**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
aius@pnzgu.ru

**Abstract.** In this article, an analysis of existing methods for solving the main problem of internal ballistics is carried out, and the most suitable one for calculating the time functions of the main parameters is selected. On the basis of the chosen method, a software package is implemented that allows you to solve the MPIB for various initial conditions.

**Keywords:** the main task of internal ballistics, numerical methods, modeling, design

**For citation:** Wagenleitner A.O., Shatalin E.A., Avdeev A.A. Modeling of fast-flowing processes in order to obtain dependencies of intra-ballistic parameters on time. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2024;9(2):1–5. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-2-13

Решение основной задачи внутренней баллистики (ОЗВБ) является одной из ключевых задач при проектировании вооружения. Оно дает проектировщику возможность, с одной стороны – понять, какие процессы происходят при выстреле, что необходимо, к примеру, при подборе материалов корпуса



снарядов и самого ствола, их расчете на прочность, а с другой стороны – получить числовые значения сил, действующих на боеприпас на протяжении выстрела, что может послужить начальными данными при расчете механизмов взрывателя на безопасность и взводимость.

В настоящее время единого и удобного программного комплекса для решения ОЗВБ не существует. Представлен достаточно разрозненный материал, как в части методов решения, так и в используемых программных средах. Проектировщики ствольной артиллерии решают данную задачу относительно перемещения снаряда и длины канала ствола орудия. При проектировании же взрывателей и их механизмов предпочтительнее решать ОЗВБ относительно времени, поскольку тогда появится возможность анализировать действие различных механических узлов в динамике.

Готовые программные комплексы с пользовательским интерфейсом представлены в основном закрытыми программами для практического применения и основаны на более грубых методах, со значительной долей использования эмпирических зависимостей.

Исходя из вышесказанного, было предложено обобщить существующие методы решения ОЗВБ, выбрать наиболее подходящий для получения требуемых выходных характеристик, с учетом его достаточной точности и возможности программной реализации.

На сегодняшний день основными методами решения ОЗВБ являются [1]:

– точный метод. Позволяет получить самые точные характеристики выстрела, однако требует определенных допущений и сложного математического аппарата. Сложно реализуем в программной среде;

– эмпирические методы решения. Решают основное уравнение движения снаряда с использованием зависимостей, полученных опытным путем. Характеризуются достаточно большими погрешностями;

– табличные методы решения. Часто применяются на практике, поскольку позволяют быстро производить нужные вычисления. Заключаются в применении таблиц или простых формул эмпирического происхождения;

– численные методы. Позволяют решать систему дифференциальных уравнений, вычисляя последовательно каждое следующее значение переменной на основе предыдущего. Обладают наибольшей универсальностью, поскольку применимы к любой гипотезе о характере сгорания пороха, закону сопротивления движению и т.д. Дают достаточно точные результаты.

Таким образом, численный метод наиболее применим для решения поставленной задачи в современных условиях. В данной работе был выбран численный метод Рунге – Кутты четвертого порядка [2], поскольку он является наиболее простым для программной реализации и способен обеспечить достаточную точность расчетов.

Основой разрабатываемого программного комплекса будет служить система обыкновенных дифференциальных уравнений относительно переменной  $t$  [3, 4].

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

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

$$\frac{dv}{dt} = \frac{sp}{\varphi q}; \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{p}{l_{\psi} + l} \cdot \left\{ \frac{f \omega}{s} \cdot \left( \frac{k}{I_k} \right) \cdot (1 + 2\lambda z + 3\mu z^2) \left[ 1 + \left( \alpha_2 - \frac{1}{\delta} \right) \frac{p}{f} \right] - v(1 + \theta) \right\};$$

$$\frac{d\Psi}{dt} = k \frac{(1 + 2\lambda z + 3\mu z^2) \cdot p}{I_k}.$$

Приведенный математический аппарат был реализован в программной среде *MatLab* (*MATrix LABoratory* – матричная лаборатория) [5]. По обилию функций и скорости вычислений *MatLab* превосходит большинство подобных систем и является бесспорным лидером в области численных расчетов и математического моделирования различных систем и устройств. Кроме того, в данной среде широко представлены встроенные функции для решения систем дифференциальных уравнений (ДУ)



различными методами. Присутствует также возможность создания пользовательского интерфейса для удобства дальнейшей работы с программой.

Программный комплекс будет состоять из следующих частей:

- 1) основной блок ввода исходных данных для системы ствол – снаряд – заряд;
- 2) блок расчета предварительного периода (до начала движения снаряда);
- 3) блок расчета первого пиродинамического периода до момента, когда сгорит метательный заряд;
- 4) подпрограмма выхода из первого пиродинамического периода при достижении относительной толщины сгоревшего слоя  $z = 1$ ;
- 5) блок расчета второго пиродинамического периода до момента, когда снаряд покинет канал ствола, выйдя за дульный срез;
- 6) подпрограмма выхода из второго баллистического периода при достижении снарядом дульного среза.

Программный пакет *Matlab* дает возможность создать приложение, которое позволит решать ОЗВБ пользователям без обращения к программированию. При разработке приложения упор производился именно на удобство работы и на простоту интерфейса. Главное рабочее окно программы комплекса представлено на рис. 1.

При запуске приложение считывает созданные заранее библиотеки данных орудий и порохов, а также позволяет добавлять новые в процессе работы.

По окончании работы программа графически выводит баллистические кривые для первого и второго периодов с возможностью их совместного рассмотрения на одном графике (рис. 2).

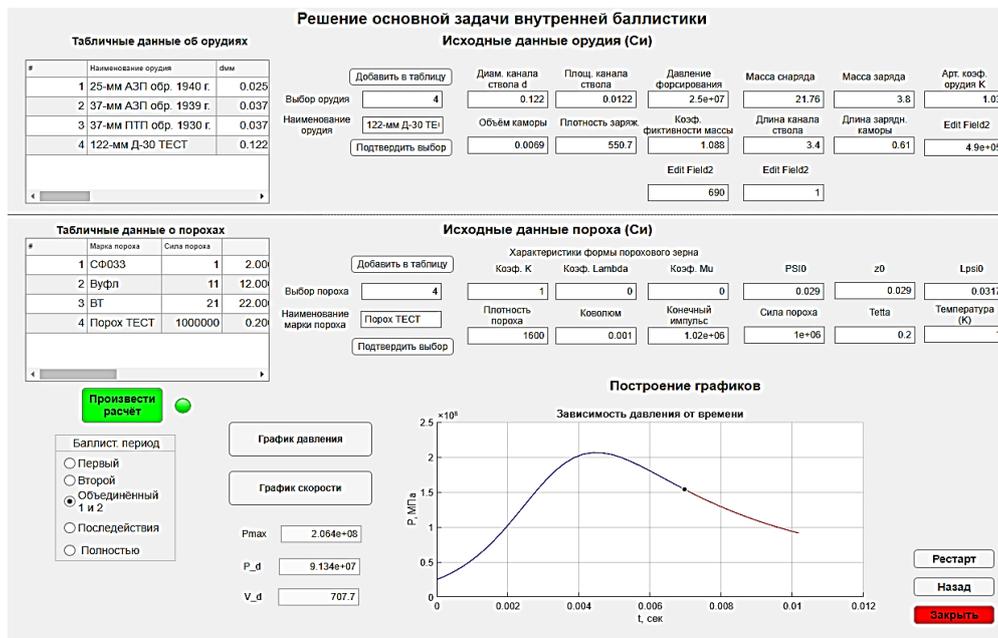


Рис. 1. Главное рабочее окно приложения

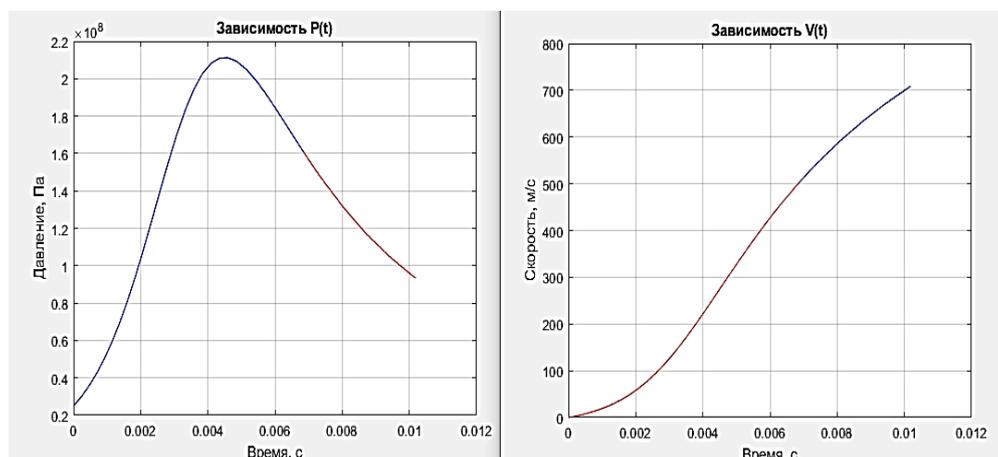


Рис. 2. Графическое отображение зависимостей баллистических параметров от времени для гаубицы Д-30



Выходные параметры, полученные при решении ОЗВБ, в большей мере совпадают с выходными параметрами от других способов решений, при различиях до 15 %, что позволяет утверждать о правильности функционирования алгоритма расчета. Сравнение параметров представлено на рис. 3, где сплошной линией отображено решение по предлагаемой методике, пунктирной линией – решение по МГТУ, а штрих-пунктирной линией – классическое решение.

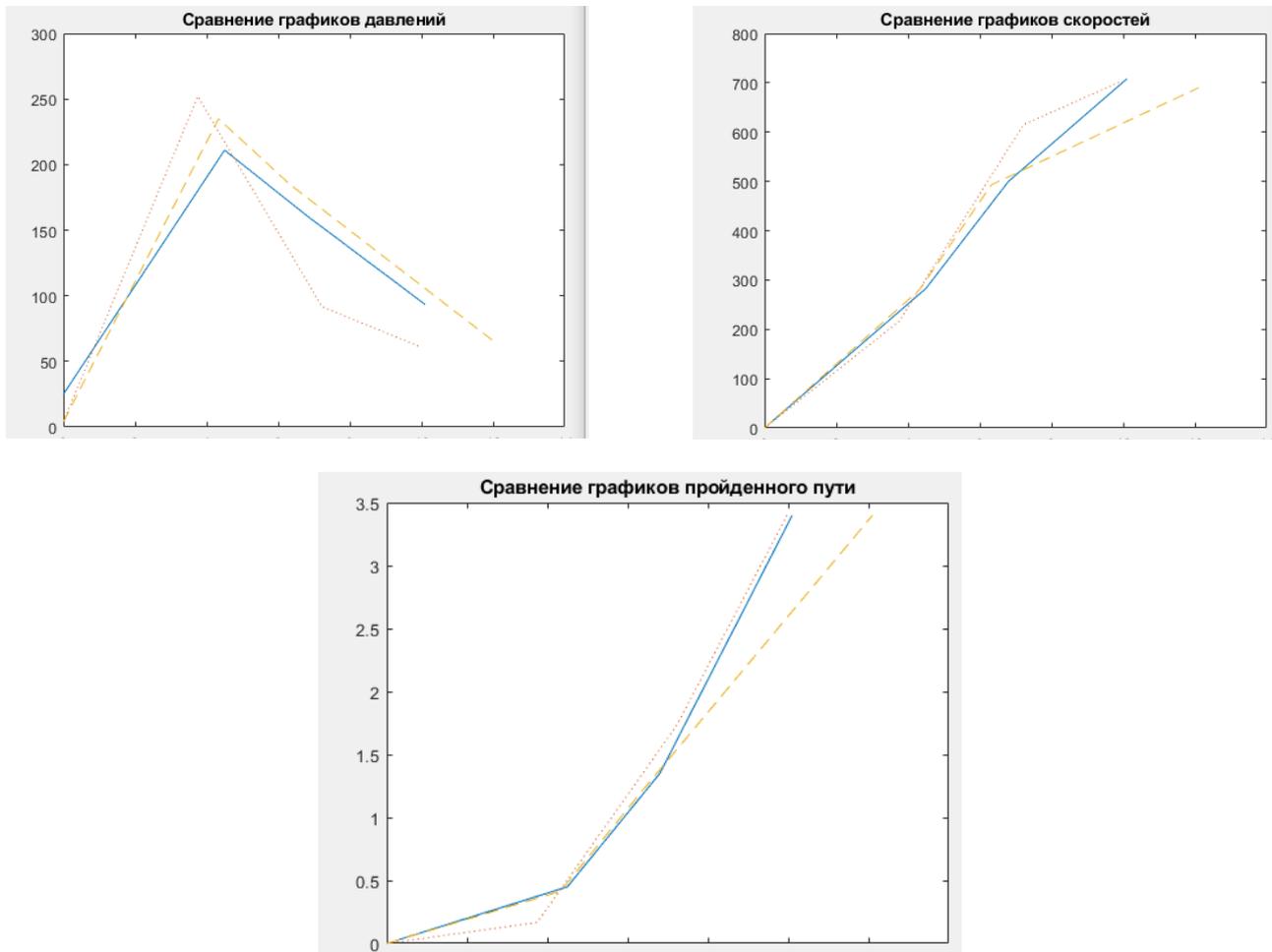


Рис. 3. Сравнение выходных параметров решения ОЗВБ различными методиками

В результате проделанной работы был подобран математический аппарат для решения ОЗВБ, получена система ДУ при аргументе  $t$  и произведен расчет необходимых характеристик в среде *MatLab*. Практическое применение предлагаемой методики проиллюстрировано примером расчета давления и скорости для 122-мм гаубицы Д-30, который в дальнейшем может быть использован для динамического анализа механизмов взрывателя при выстреле.

### Список литературы

1. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика : учеб. пособие. М. : Изд-во оборонной промышленности, 1939. 594 с.
2. Арушанян О. Б., Залеткин С. Ф. Решение систем обыкновенных дифференциальных уравнений методами Рунге-Кутты : учеб. пособие. М. : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2014. 58 с.
3. Чурбанов Е. В. Внутренняя баллистика // Военная артиллерийская ордена Ленина краснознаменная академия им. М. И. Калинина. Ленинград, 1975. С. 94–102.
4. Захаренков В. Ф. Внутренняя баллистика и автоматизация проектирования артиллерийских орудий. СПб. : БГТУ «Военмех», 2010. С. 127–128.
5. Сидорик В. В., Погирницкая С. Г. Практикум по моделированию в среде MATLAB : учеб.-метод. пособие. Минск : Изд-во БНТУ, 2012. 117 с.
6. Ефремов А. К., Соболева Н. С. Исследование процесса выстрела из артиллерийского орудия с учётом врезания ведущего пояса снаряда в нарезы // Наука и Образование. 2017. № 6. С. 20–23.



## References

1. Serebrjakov M.E. *Vnutrennjaja ballistika: ucheb. posobie = Internal ballistics : studies. stipend.* Moscow: Izd-vo oboronnoj promyshlennosti, 1939:594. (In Russ.)
2. Arushanjan O.B., Zaletkin S.F. *Reshenie sistem obyknovennyh differencial'nyh uravnenij metodami Runge-Kutta: ucheb. posobie = Solving systems of ordinary differential equations by Runge-Kutta methods : textbook. stipend.* Moscow: MGU im. M.V. Lomonosova, 2014:58. (In Russ.)
3. Churbanov E.V. *Internal ballistics. Voennaja artillerijskaja ordena Lenina krasnoznamjonnaja akademija im. M.I. Kalinina = Military Artillery of the Order of Lenin Red Banner Academy named after M. I. Kalinin.* Leningrad, 1975:94–102. (In Russ.)
4. Zaharenkov V.F. *Vnutrennjaja ballistika i avtomatizacija proektirovanija artillerijskih orudij = Internal ballistics and automation of artillery design.* Saint Petersburg: BGTU «Voenmeh», 2010:127–128. (In Russ.)
5. Sidorik V.V., Pogirnicksaja S.G. *Praktikum po modelirovaniju v srede MATLAB: ucheb.-metod. posobie = Workshop on modeling in the MATLAB environment : studies.- the method. stipend.* Minsk: Izd-vo BNTU, 2012:117. (In Russ.)
6. Efremov A.K., Soboleva N.S. Investigation of the process of firing an artillery piece, taking into account the embedding of the leading belt of the projectile into the rifling. *Nauka i Obrazovanie = Science and Education.* 2017;(6): 20–23. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 13.03.2024

Принята к публикации / Accepted 13.04.2024