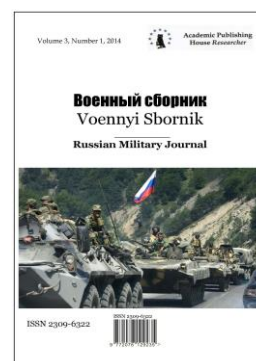


Copyright © 2020 by Academic Publishing House Researcher s.r.o.



Published in the Slovak Republic
Voennyi Sbornik
Has been issued since 1858.
E-ISSN: 2409-1707
2020, 8(2): 39-46

DOI: 10.13187/vs.2020.2.39

www.ejournal6.com

The Problem of Creating a Model of a Muzzle-Loading Smooth-Bore Gun

Kent R. Crawford ^a, Nicholas W. Mitiukov ^{b, c, *}, Darya A. Korepanova ^d, Elena L. Busygina ^{d, e}

^a Gunnery Fire Control Group, Indianapolis (IN), USA

^b International Network Center for Fundamental and Applied Research, Washington (DC), USA

^c Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russian Federation

^d Kalashnikov's Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

^e Moscow Institute of Psychoanalysis, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper provides an overview of the current state of the problem of creating a mathematical model of a muzzle-loading smooth-bore gun, which is necessary for the historical reconstruction of the ballistic parameters of this weapon. Due to the low accuracy of the initial data, characteristic of the historical documents of the 19th century, the high accuracy of the model and methods for its solution seems to be excessive. In 2012, a model was proposed in an adiabatic setting. Comparison of its results with those obtained by the model in a three-dimensional non-stationary setting showed a discrepancy of no more than 1.5 %. A series of numerical experiments was carried out to determine the air section coefficient in the sickle-shaped gap, which is characteristic of a smoothbore gun, but is absent in modern reference books. The dependence of this coefficient on the Reynolds number is obtained.

Due to the rigidity of the problem accompanying the initial stage of ignition, the proposed model has problems with the stability of the solution. Apparently, this problem can be overcome by using integration methods with automatic step selection. As a result, the predicted accuracy of the model is about 10 %.

The developed model was verified on modern samples and, in general, confirmed the declared accuracy. But the comparison with historical materials showed a discrepancy of almost an order of magnitude. This circumstance allows us to conclude that our understanding of the ballistics of medieval weapons needs correction, and possibly a significant revision. Most likely, it developed under the influence of incorrect interpolation of experimental data from the second half of the 19th century.

Keywords: mathematical model, smooth-bore gun, accuracy, verification.

1. Введение

Несколько лет назад «Gunnery Fire Control Group» предприняла усилия по созданию базы данных по баллистике нарезной крупнокалиберной артиллерии. Эта база оказалась востребована для создателей компьютерных игр, но кроме индустрии развлечений, она дала возможность близко подойти к решению некоторых загадок истории (Mitiukov, Crawford, 2015). Дальнейший логический шаг виделся в идентификации параметров гладкоствольной

* Corresponding author

E-mail addresses: nico02@mail.ru (N.W. Mitiukov)

артиллерии. Но реализация этого проекта показала, что существует много вопросов, как технических, так и исторических, преодолеть которые оказалось совсем не тривиальной задачей.

Дело в том, что как техническая система, нарезная артиллерия, безусловно, более сложная, чем гладкоствольная. Но в настоящее время проделана большая работа множеством организаций, занимающихся разработкой артиллерийских систем, чтобы создать апробированные и хорошо описывающие физику процесса математические модели. В то время как для гладкоствольных систем таких организаций нет. Поэтому уже готовых элементов математических моделей и эмпирических данных для них просто не существует и их приходится разрабатывать самостоятельно.

Кроме того, как удалось установить, имеющаяся в литературе информация о внутренней баллистике гладкоствольных орудий, была получена либо умозрительно, либо на основе некорректной интерполяции проведенных во второй половине XIX в. экспериментов. Несмотря на то, что эта информация повторяется во множестве работ, ее корректность вызывает большие сомнения.

Хотелось бы обратить внимание на один парадокс, характерный для моделирования в истории, не всегда понимаемый специалистами по математическому моделированию, занимающимися решением современных задач. Точность математического моделирования складывается из трех составляющих: точность получения исходных данных, точность математического метода, с помощью которого будет производиться моделирование и точность самой математической модели. Применительно к современным техническим системам для получения исходных данных используется самое современное измерительное оборудование, позволяющее получать требуемые параметры с очень высокой точностью. Сама математическая модель также формулируется с учетом всех нюансов и учитывает максимальное количество факторов. Поэтому вопрос обычно стоит в разработке адекватных этим точностям математических методов (для этого применяются, например, методы параллельных вычислений и другие высокоэффективные методы). А для проверки получающихся по моделям прогнозов ставятся новые эксперименты, дающие еще более уточненные данные.

В задачах исторического моделирования парадигма другая. Здесь изначально точность исходных данных невысока и сильно зависит от достоверности исторического источника; использовавшейся два века назад измерительной аппаратуры и т.п. Поэтому высокая точность математической модели для данного случая просто теряет всякий смысл, как и высокая точность метода ее решения. Но самое важное, данные, получаемые в результате моделирования, направлены не во вне (для научного прогноза), а во внутрь, для уточнения исходных данных, для коррекции или детализации исторического источника.

2. Результаты и обсуждение

Математическая модель гладкоствольного орудия

Математическая модель гладкоствольного орудия ранее нами уже обсуждалась в ряде работ ([Митюков, Крауфорд, 2012](#)).

Ядро, находящееся в канале ствола можно представить материальной точкой, движущейся со скоростью v , подчиняющейся закону Ньютона ([Рисунок 1, а](#)):

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

где p – давление пороховых газов; p_h – давление окружающей среды; F – площадь сечения ядра ($F = \pi d^2 / 4$); m – масса ядра; g – ускорение свободного падения; α – угол возвышения орудия; f – коэффициент трения.

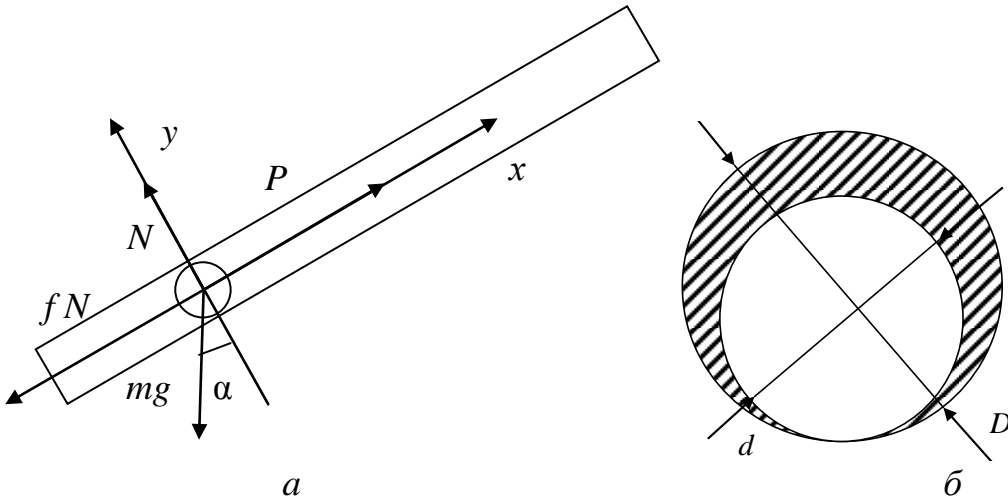


Рис. 1. Расчетная схема действующих на пушечное ядро сил (а) и схема серповидного зазора в канале ствола (б)

Давление пороховых газов определяется из уравнения состояния:

$$p = \frac{MRT}{V},$$

где M – текущая масса пороховых газов; RT – «сила пороха»; V – объем за ядром: $V = V_k + S\ell + V_s$, V_k – объем камеры; V_s – объем сгоревшего пороха; S – площадь канала ствола ($S = 0,25 \pi D^2$); ℓ – текущая координата ядра при движении по каналу ствола: $\frac{d\ell}{dt} = v$.

Текущая масса пороховых газов:

$$\frac{dM}{dt} = G_1 - G_2,$$

где G_1 – газоприход (в случае прогорания зерна он обнуляется); G_2 – газорасход.

Газорасход определяется по известным законам газовой динамики, и для сверхкритического перепада он определится как:

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

где k – показатель адиабаты продуктов сгорания; F_k – площадь прохода между ядром и каналом ствола (Рисунок 1, б): $F_k = \varphi \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$, φ – коэффициент живого сечения.

Газоприход можно определить по законам внутренней баллистики:

$$G_1 = \frac{de}{dt} S(e) \rho,$$

где de/dt – скорость горения; $S(e)$ – поверхность горения; ρ – плотность пороха. При этом скорость горения можно определить, считая закон горения артиллерийским: $\frac{de}{dt} = Ap$, где A – постоянная скорости горения.

Если принять пороховое зерно в виде шара радиусом R , то поверхность горения $S(e)$ как функция от горящего свода e определится как $S(e) = N4\pi(R - e)^2$. Здесь N – количество зерен, которое можно определить зная общую пороховую навеску m_n :

$$N = \frac{m_n}{\frac{4}{3} \pi R^3 \rho}.$$

В общем случае, уже с XIX века начали применяться гранулы пороха самой причудливой формы: призматические, шестигранные, типа «макаронины» и другие. Таким образом, сфера – это всего лишь частный случай.

Коэффициент живого сечения φ , применительно для гладкоствольного орудия это случай серповидного зазора между круглым ядром и цилиндрической стенкой (Рисунок 1, б). Величина этого зазора в значительной степени определяет дульную скорость ядра (Рисунок 2). Но в справочниках по гидравлическим сопротивлениям этот случай не рассматривается. В результате его определения φ пришлось провести специальное исследование (Mitiukov, Crawford, 2019). Как оказалось, с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,967$, зависимость $\varphi(\text{Re})$ можно аппроксимировать прямой:

$$\varphi = -3 \cdot 10^{-11} \text{Re} + 0,966.$$

Слабое влияние Re в этой формуле позволяет считать коэффициент живого сечения примерно постоянным для всего диапазона значений газовых течений в канале ствола.

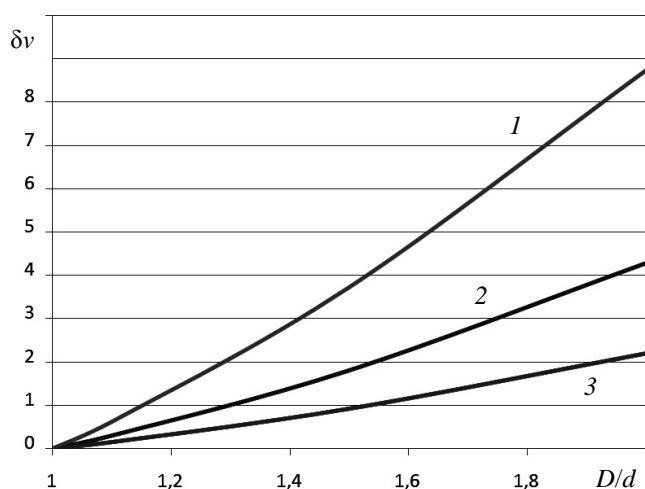


Рис. 2. Уменьшение скорости ядра δv (%) от отношения диаметров отверстия (D) и шарика (d) при разных давлениях пороховых газов: 1 – 10 атм., 2 – 50 атм., 3 – 200 атм.

Для того чтобы оценить влияние вращения ядра на коэффициент живого сечения, при движении ядра по каналу ствола производится его закрутка, вследствие чего существенно изменялась картина обтекания. При этом неизбежно менялся и коэффициент живого сечения φ . Однако как показало сравнение результатов по динамической модели (с учетом вращения) и статической (без учета), расхождение по дульной скорости составило не более 0,01 %, при их полном совпадении в случае отсутствия зазора. Например, в расчетном случае динамическая модель дала дульную скорость равную 86,07 м/с, а этот же случай при статическом положении ядра дал дульную скорость в 85,99 м/с.

Точность математической модели

Как видно, модель сформулирована в адиабатической постановке. На первый взгляд, неучет теплообмена является грубым допущением, в связи с чем данная задача была решена с учетом теплообмена (Соломенников, Митюков, 2015). Для простоты была выбрана обычная толстостенная труба, с одной стороны перегороденная плоской стенкой. Пушечное ядро также для простоты представлялось в виде цилиндра. Происходило воспламенение пороховой навески, но пороховые газы не проходили через зазор между цилиндром и стволом, т.е. полностью переходили в энергию движущегося ядра и нагрев стенки. На Рисунке 3, а дается динамика изменения температуры в самой левой точке ствола, наиболее подверженной нагреву (Рисунок 3, б). На 3 мкс прекращалось основное горение пороха, поэтому в это время было зарегистрирована максимальная температура в 370 °С, далее догорают лишь небольшие депрессивно-горящие остатки, не увеличивающие температуру. На 11 мкс цилиндр вылетал из ствола, и температура внутренней стенки резко начинала падать. Распределение температур при на 3 мкс представлено на Рисунке 3, б.

Видно, что в целом труба сохраняет свою первоначальную температуру и ее увеличение происходит лишь в крайне ограниченной зоне в районе каморы.

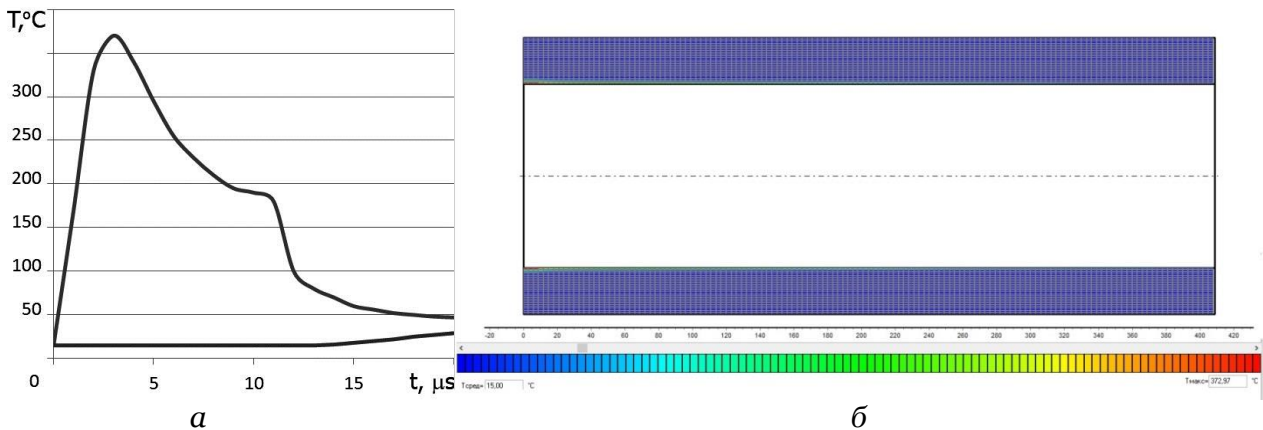


Рис. 3. Решение задачи с учетом теплообмена: динамика прогрева стенки (а), верхняя кривая – внутренняя точка, нижняя кривая – наружная точка; распределение температуры в трубе на 3 мкс (б)

Сравнение результатов расчета по трехмерной модели с учетом теплообмена и адиабатической модели показало, что расхождение в скорости снаряда на выходе из ствола составляет не более 1,5 %, что, учитывая погрешность в определении исходных данных, является очень незначительной величиной. А потому для решения задачи исторической реконструкции гладкоствольного орудия адиабатический подход вполне допустим.

Точность математического метода

Численное решение предлагаемой модели гладкоствольного орудия позволило сформулировать еще одну сложность. Обычно увеличение точности расчетов связано с уменьшением шага численного интегрирования. Как показывает практика, при уменьшении шага интегрирования происходит коррекция точности результата (Рисунок 4). При уменьшении шага ниже определенного предела h_K (кривая 1), происходит стабилизация результата. Однако как показали расчеты, результат решения задачи внутренней баллистики гладкоствольного орудия ведет себя так кривая 2. На всем диапазоне шагов интегрирования конечный результат меняется значительно, нередко при уменьшении шага ниже определенного предела давая совершенно нефизичные результаты.

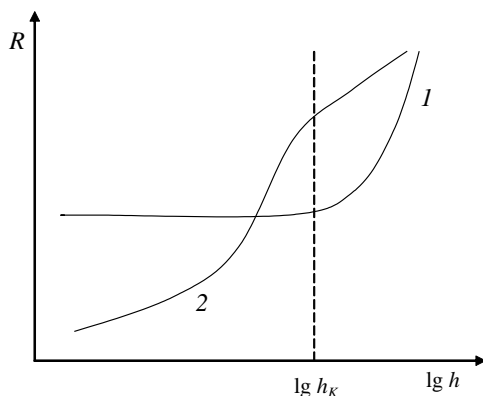


Рис. 4. Зависимость получаемого результата R от шага интегрирования h

Подобная картина наблюдается при методе Эйлера, Рунге-Кутты и других методов постоянного шага. Частично преодолеть этот кризис, как показали расчеты, возможно лишь при использовании методов переменного шага интегрирования (Соломенников, 2013).

Точность исходных данных

Таким образом, была сформулирована математическая модель гладкоствольного орудия, точность которой с учетом различных допущений прогнозировалась в пределах 10 %, что при довольно грубых условиях получения исходных данных выделось вполне удовлетворительным.

Предварительное тестирование модели показало при сравнении с опубликованными данными интересный парадокс. На [Рисунке 5, а](#) приведены якобы экспериментальные данные для давления в канале ствола в зависимости от положения ядра и диаметра зерна пороха ([Guilmartin, 1989](#)). На [Рисунке 5, б](#) приведены результаты расчета примерно для этих же условий (полные исходные данные в работе Х. Хильмартина отсутствовали).

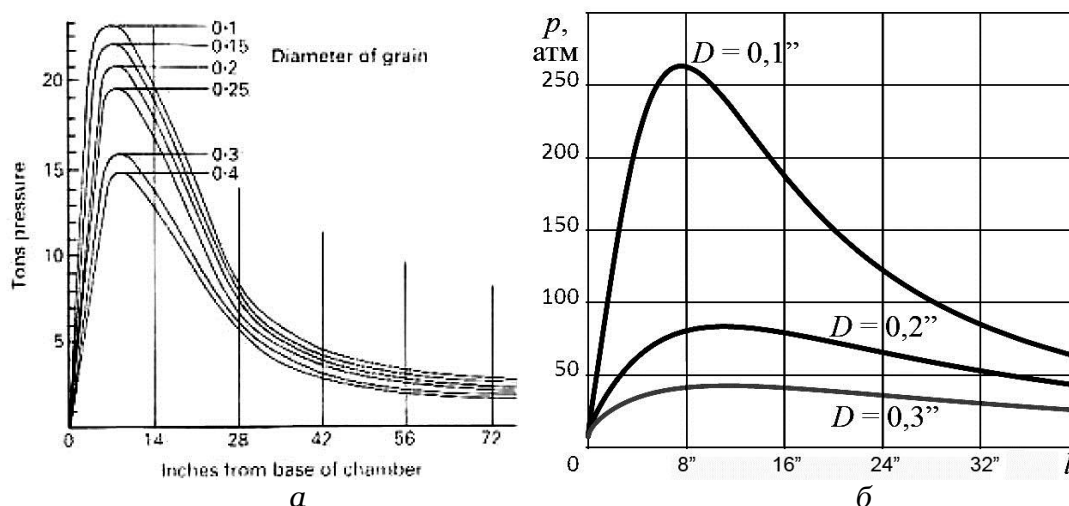


Рис. 5. Зависимость давления в канале ствола от координаты снаряда ([Guilmartin, 1989](#)) (давление 1 т/дм² = 152,4 атм) (а); расчетная зависимость давления в канале ствола от координаты снаряда (б)

Как видно, расхождения в максимальных значениях давления составляет почти в 10 раз, при прогнозируемой точности нашей модели в районе 10%. Таким образом, этот парадокс невозможно объяснить низкой точности математической модели.

Для идентификации математической модели на основе материальной базы Ижевской пиротехнической лаборатории была проведена серия экспериментов. Для этого использовались пиротехнические бомбы калибром 35 мм (типа «Ника»), заряжаемые в ствол с зазором 1 мм. Стволы стояли вертикально. По документации производителей и по произведенным замерам, высота, на которую поднимались бомбы, составляла в среднем 35 м. Расчеты по модели, произведенные с теми же начальными условиями, дали результат 37,2 м, или 6 % точность ([Solomennikov, Mitiukow, 2013](#)).

Таким образом, получается, что наши представления о баллистике средневековых гладкоствольных орудий нуждаются в радикальном пересмотре.

3. Заключение

На данном этапе следует констатировать, что до создания надежной и адаптированной для исторических расчетов программы пока еще далеко. Тем не менее, отдельные блоки разрабатываемой программы уже находят практическое применение. Например, они были использованы для оптимизации пиротехнического стенда для ударных испытаний ([Соломенников, Митюков, 2015](#)). Кроме того, характерная для орудиях начала XIX в. смесь порохов с разными скоростями горения, оказалась полезным для достаточно простой конвертации активного способа метания в активно-реактивный. Возможность его применения была просчитана на примере одного из образцов, стоящим сейчас на вооружении ([Митюков, Корепанова, 2020](#)).

Литература

Митюков, Корепанова, 2020 – Митюков Н.В., Корепанова Д.А. Спецтема // *Отраслевой журнал*. 2020. № 1 (4). С. 151-152.

Митюков, Крауфорд, 2012 – Митюков Н.В., Крауфорд К.Р. и др. Внутренняя баллистика дульнозарядных гладкоствольных орудий // *Химическая физика и мезоскопия*. 2012. Т. 14. № 3. С. 371-375.

Соломенников, 2013 – Соломенников Н.Н. Математическая модель пиротехнической установки для испытания ракетной техники // *Новый университет. Сер. "Технические науки"*. 2013. № 8–9. С. 110-118

Соломенников, Митюков, 2015 – Соломенников Н.В., Митюков Н.В. Оптимизация параметров мобильной пиротехнической установки для ударных испытаний // *Новый университет. Сер. «Технические науки»*. 2015. № 11-12. С. 11-16. DOI: 10.15350/2221-9552.2015.11-12

Guilmartin, 1989 – Guilmartin, J.F. Jr. Ballistics in the Black Powder Era // *British Naval Armaments: Royal Armouries Conference Proceedings I* / Ed. Robert D. Smith. London, 1989. Pp. 73-98.

Mitiukov, Crawford, 2015 – Mitiukov N.W., Crawford K.R. The Method of Analysis Derived Coefficients of Database as a New Method of Historical Research (for Example, a Database of Ballistic Parameters of Naval Artillery) // *Bylye gody*. 2015. № 4 (38). Pp. 1078-1084.

Mitiukov, Crawford, 2019 – Crawford K.R., Mitiukov N.W. The coefficient of cross-section area of sickle-shaped gap of the actuator // *IEEE Xplore*. 2019. № 8933821. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934356

Solomennikov, Mitiukow, 2013 – Solomennikov N.N., Mitiukow N.W. et al. Rekonstrukcja historyczna ładowanej kaganiec artylerii: identyfikacja wyników symulacji / *Wschodnie partnerstwo – 2013: Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji (Przemysł, 07-15 września 2013 roku)*. Vol. 33. Przemysł: Nauka i studia, 2013. Pp. 62–63.

References

Guilmartin, 1989 – Guilmartin, J.F. (1989). Jr. Ballistics in the Black Powder Era. *British Naval Armaments: Royal Armouries Conference Proceedings I*. Ed. Robert D. Smith. London. Pp. 73-98.

Mitiukov, Crawford, 2015 – Mitiukov, N.W., Crawford, K.R. (2015). The Method of Analysis Derived Coefficients of Database as a New Method of Historical Research (for Example, a Database of Ballistic Parameters of Naval Artillery). *Bylye gody*. 4(38): 1078-1084.

Mitiukov, Crawford, 2019 – Crawford, K.R., Mitiukov, N.W. (2019). The coefficient of cross-section area of sickle-shaped gap of the actuator. *IEEE Xplore*. 8933821. DOI: 10.1109/FarEast Con.2019.8934356

Mityukov, Korepanova, 2020 – Mityukov, N.V., Korepanova, D.A. (2020). Special topic. *Otraslevoi zhurnal*. 1(4): 151-152. [in Russian]

Mityukov, Krauford, 2012 – Mityukov, N.V., Krauford, K.R. et al. (2012). Vnutrennyaya ballistika dul'nozaryadnykh gladkostvol'nykh orudii [Internal ballistics of muzzle-loading smooth-bore guns]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*. 14(3): 371-375. [in Russian]

Solomennikov, 2013 – Solomennikov, N.N. (2013). Matematicheskaya model' pirotekhnicheskoi ustanovki dlya ispytaniya raketnoi tekhniki [Mathematical model of a pyrotechnic installation for testing rocket technology]. *Novy universitet. Ser. "Tekhnicheskie nauki"*. 8–9: 110-118. [in Russian]

Solomennikov, Mitiukow, 2013 – Solomennikov, N.N., Mitiukow, N.W. et al. (2013). Rekonstrukcja historyczna ładowanej kaganiec artylerii: identyfikacja wyników symulacji. *Wschodnie partnerstwo – 2013: Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji (Przemysł, 07-15 września 2013 roku)*. Vol. 33. Przemysł: Nauka i studia. Pp. 62-63. [in Polish]

Solomennikov, Mityukov, 2015 – Solomennikov, N.V., Mityukov, N.V. (2015). Optimizatsiya parametrov mobil'noi pirotekhnicheskoi ustanovki dlya udarnykh ispytaniy [Optimization of parameters of a mobile pyrotechnic installation for impact testing]. *Novy universitet. Ser. «Tekhnicheskie nauki»*. 11–12: 11-16. DOI: 10.15350/2221-9552.2015.11-12 [in Russian]

Проблема создания модели дульнозарядного гладкоствольного орудия

Кент Рэнд Крауфорд ^a, Николай Витальевич Митюков ^{b, c, *}, Дарья Алексеевна Корепанова ^d, Елена Леонидовна Бусыгина ^{d, e}

^a Gunnery Fire Control Group, Indianapolis (IN), США

^b Международный сетевой центр фундаментальных и прикладных исследований, Вашингтон, США

^c Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН, Ижевск, Российская Федерация

^d Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация

^e Московский институт психоанализа, Москва, Российская Федерация

Аннотация. В работе дается обзор современного состояния проблемы создания математической модели дульнозарядного гладкоствольного орудия, необходимой для исторической реконструкции баллистических параметров этого оружия. Из-за низкой точности исходных данных, характерных для исторических документов XIX в., высокая точность модели и методов ее решения видится излишней. В 2012 г. была предложена модель в адиабатической постановке. Сравнение ее результатов с полученными по модели в трехмерной нестационарной постановке, показали расхождение не более 1,5 %. Для определения коэффициента живого сечения в серповидном зазоре, характерном для гладкоствольного орудия, но отсутствующем в современных справочниках, была проведена серия численных экспериментов. Получена зависимость этого коэффициента от числа Рейнольдса.

Из-за жесткости задачи, сопровождающей начальный участок воспламенения, предлагаемая модель имеет проблемы с устойчивостью решения. По-видимому, эту проблему можно преодолеть, используя методы интегрирования с автоматическим выбором шага. В итоге, прогнозируемая точность модели составляет порядка 10 %.

Разработанная модель была верифицирована на современных образцах и в целом подтвердила заявленную точность. Но проведенное сравнение с историческими материалами показало расхождение почти на порядок. Указанное обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что наше понимание баллистики средневековых орудий нуждается в корректировке, и возможно в существенном пересмотре. Вероятно всего оно сложилось под влиянием некорректной интерполяции экспериментальных данных второй половины XIX в.

Ключевые слова: математическая модель, гладкоствольное орудие, точность, верификация.

* Корреспондирующий автор
Адреса электронной почты: nico02@mail.ru (Н.В. Митюков)