

УДК: 623.5

**О ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТОЛЬНЫХ СИСТЕМ
МЕТОДОМ УСТРАНЕНИЯ ПОТЕРЬ ПРИ ВЫСТРЕЛЕ**

**ABOUT THE POSSIBILITY OF IMPROVING THE PARAMETERS OF THE BARREL
SYSTEMS THE METHOD OF ELIMINATING LOSSES WHEN FIRED**

По представлению чл.-корр. РАРАН С.А. Баканеева

С.Ю. Лазарев¹, В.Ю. Калинин², М.А. Медяников¹

¹ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» им. Н.Г. Кузнецова,

²Михайловская военная артиллерийская академия

S.Y. Lazarev, V.Y. Kalinin, M.A. Medyannikov

В статье представлено расчетно-экспериментальное обоснование принципа повышения качества функционирования системы «снаряд-ствол» за счет применения специальных защитных составов, обеспечивающих снижение коэффициентов трения при движении боеприпаса и повышение теплоёмкости материалов внутренней поверхности канала ствола артиллерийского орудия. Результаты эксперимента по оценке уровня снижения потерь сопротивления трению при модификации внутренней поверхности ствола свидетельствуют о значимом влиянии на параметры системы физико-механических свойств природных минеральных защитных составов и возможности увеличения дальности стрельбы с их использованием.

Ключевые слова: артиллерийская система, ствол, снаряд, минеральный защитный состав, трение, дальность стрельбы.

The article presents a computational and experimental justification of the principle of improving the quality of the functioning of the projectile-barrel system through the use of special protective compositions that reduce the friction coefficients during the movement of the munition and increase the heat capacity of the materials of the inner surface of the barrel of the artillery gun. The results of the experiment to assess the level of reduction of friction resistance losses when modifying the inner surface of the barrel indicate a significant influence on the parameters of the system of physical and mechanical properties of natural mineral protective compositions and the possibility of increasing the firing range with their use.

Keywords: artillery system, barrel, shell, mineral protective composition, friction, firing range.

Введение

В современных условиях, когда артиллерия конкурирует с ракетным вооружением, важным этапом для дальнейшего развития артиллерии является вопрос о возможности существенного изменения параметров (таких как дальность стрельбы, живучесть ствола и пр.) ствольных

систем. Отметим, что вопросам восстановления стволов ствольных систем, как и их параметров, в настоящее время уделяется всё больше и больше внимания [1]. Одним из путей решения этой задачи является уменьшение потерь на трение и нагрев ствола посредством применения новых классов природных материалов с особыми физико-механическими свойствами.

Основная часть

В качестве физической основы для решения указанной задачи могут быть использованы теоретические положения методик проведения баллистических расчётов, основанных на классическом подходе или использовании системы уравнений внутренней баллистики в относительных переменных [2–5].

На основании первого закона термодинамики принимается:

$$E_1 - E = \sum A_i,$$

где E_1 — внутренняя энергия газов в начальный момент движения снаряда;

E — внутренняя энергия газов в конце пути движения снаряда по стволу;

$\sum A_i$ — сумма внешних работ, совершаемых газами при выстреле.

Сумма внешних работ складывается из следующих основных составляющих:

$A_1 = 0,5mv^2$ — работа, затраченная на сообще-ние снаряду скорости поступательного дви-жения, равная кинетической энергии снаряда;

A_2 — работа, затрачиваемая на вращение снаряда;

A_3 — работа, затрачиваемая на преодоление трения, возникающего при движении снаряда в канале ствола;

A_4 — работа, затрачиваемая на перемещение продуктов сгорания и частиц не сгоревшего пороха;

A_5 — работа, затрачиваемая на перемеще-ние откатных частей орудия;

A_6 — работа, затрачиваемая снарядом на преодоление сопротивления воздуха и вытесне-ние столба воздуха, находящегося перед снаря-дом;

A_7 — работа, затрачиваемая на врезание по-яска снаряда в нарезы канала ствола;

A_8 — работа, эквивалентная тепловой энер-гии, расходуемой на нагревание стенок ствола, гильзы и снаряда;

A_9 — работа, эквивалентная энергии газов, прорывающихся по зазорам между пояском сна-ряда и стенками ствола (перетечки).

Работы A_6 и A_9 считаются пренебрежимо малыми и не учитываются.

Работа A_8 при теплоотдаче на практике учи-тывается посредством уменьшения силы пороха.

Сумма работ A_1-A_5 учитывается в виде коэф-фициента фиктивной массы φ :

$$\sum A_{1-5} = 0,5\varphi mv^2,$$

который, в свою очередь, складывается из суммы потерь для отдельных работ:

$$\varphi = 1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5.$$

При этом движение снаряда с массой m заме-няют движением снаряда с массой φm , движуще-гося с той же скоростью, и полагают, что газы вто-ростепенных работ не совершают. Отсюда следу-ет, что при уменьшении коэффициента φ скорость движения снаряда будет увеличиваться.

Для большинства из этих работ их величина зависит от коэффициентов трения и сопротивле-ния, которые в свою очередь зависят от свойств применяемых материалов.

Работа A_2 , затрачиваемая на вращение снаряда и работа A_3 , затрачиваемая на преодоление трения, возникающего при движении снаряда в канале ствола

Коэффициенты K_i для работ, затрачиваемых на вращение снаряда A_2 , и на преодоление трения, воз-никающего при движении снаряда в канале ствола A_3 определяется по следующему выражению:

$$K_2 + K_3 = \mu \operatorname{tg} \alpha \left[\operatorname{tg} \alpha + f_{\text{тр}} \right] / \left[1 - f_{\text{тр}} \operatorname{tg} \alpha \right],$$

где α — угол наклона нарезов ствола;

μ — коэффициент момента инерции;

$f_{\text{тр}}$ — коэффициент трения при движении снаряда по стволу.

На практике величина $K_2 + K_3$ принимается равной 0,02–0,03 для снарядов и 0,06 для пуль.

Работа, затрачиваемая на перемещение продуктов сгорания и частиц не сгоревшего пороха A_4

Значение энергии движущегося заряда опре-деляется в виде:

$$A_4 = v^2 \omega / 6 = K_4 mv^2 / 2,$$

где v — скорость снаряда; ω — масса порохо-вого заряда; $K_4 = m\omega / 3$.

Коэффициент K_4 в зависимости от относительной массы заряда ω/m изменяется в широких пределах — от 0,2–0,3 до 0,07–0,10.

Работа, затрачиваемая на перемещение откатных частей орудия A_5

Величина работы на перемещение откатных частей орудия массой M со скоростью V определяется по формуле:

$$A_5 = 0,5MV^2 \quad (1)$$

или после преобразований по приближённой формуле:

$$A_5 \approx 0,5MV^2(m/M);$$

$$K_5 = m/M,$$

где m — масса снаряда.

Следует отметить, что данный подход не учитывает возможности снижения сопротивления при движении снаряда по стволу и влияния этого фактора на движение откатных частей.

Работа, затрачиваемая на врезание пояска в нарезы A_7

Уравнение движения снаряда в стволе записывается в виде:

$$m(dV_a/dt) = Sp_{\text{тек}} - R,$$

где dV_a/dt — изменение скорости снаряда в зависимости от времени движения, причём V изменяется от 0 до значения начальной скорости вылета;

S — площадь сечения ствола;

$p_{\text{тек}}$ — давление газов, зависящее от объёма заснарядного пространства и процесса горения пороха;

R — сопротивление движению от смятия пояска.

Сопротивление движению при врезании пояска в нарезы по данной схеме определяется из функции коэффициента трения μ . При этом учитывается величина усилия на пояска: работа сопротивления нарезам движению снаряда.

По данным экспериментов значение этой работы составляет 3–10 % от дульной энергии.

Данные по коэффициенту трения сильно разнятся ввиду зависимости его от большого количества разных факторов. Изменения коэффициента трения в зависимости от скорости для пары сталь-медь приведены в табл. 1 [8].

Поскольку скорость снаряда изменяется от нуля до начальной скорости вылета, а первые нарезы располагаются в зонах малых скоростей, то коэффициент трения имеет значительные величины.

Таким образом, величина потерь на смятие поясков, составляющая до 0,1 от величины дульной энергии, является существенной и заметно снижает энергию движения снаряда после смятия поясков.

Работа, эквивалентная тепловой энергии, расходуемой на нагревание стенок ствола, гильзы и снаряда A_8

Величина энергии, выделяемой сгорающими пороховыми газами, идущая на нагрев ствола, по средним данным составляет 1/3 кинетической (дульной) энергии снаряда. Ствол, в результате, нагревается весьма неравномерно, как по длине, так и по толщине поперечного сечения.

Средняя температура нагрева ствола за один выстрел приближённо может быть определена по формуле:

$$M_{\text{ств}} Q / c,$$

где Q — часть энергии, идущая на нагрев ствола;
 c — удельная теплоёмкость материала ствола при 20 °С (для стали — 480 Дж/кг град).

Допустимая температура нагрева ствола, исходя из изменений механических характеристик материала от температуры, составляет $T_{\text{доп}} = 500\text{--}650$ °С. Влияние нагрева ствола на кучность и дальность стрельбы в основном определяется следующими факторами:

– разогревом ствола, который приводит к увеличению его внутреннего диаметра в контрольных сечениях (до 0,5–0,7 мм, что вызывает повышенное биение снаряда при движении по каналу);

Таблица 1

**Изменение коэффициента трения
в паре сталь-медь от V , м/с**

V , м/с	0	20	70
μ_t	0,38	0,17–0,18	0,03–0,04

– дополнительным изгибом трубы, который при нагреве приводит к изменению угла вылета снаряда.

Указанные явления, в целом, приводят к существенному уменьшению кучности и дальности стрельбы и являются определяющими. Их негативное влияние на указанные показатели можно уменьшать за счёт снижения коэффициентов трения и повышения теплоёмкости материалов внутренней поверхности ствола путем применения природных минеральных материалов [6].

Известны результаты, изложенные в патенте № 2169328, где при использовании ультрадисперсного порошка из ряда слоистых силикатов с различными модификациями состава $Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$ получены следующие экспериментальные результаты: на стволах винтовки калибра 5,6 мм кучность боя (при паспортном значении не хуже 7,5 см) снизилась до 4 см и сохраняла своё значение после 1000 выстрелов; на стволе орудия калибра 128,5 мм, бывшего в длительном использовании, после серии из 10 выстрелов кучность боя улучшилась в 1,4 раза, дальность полета снаряда увеличилась в 2 раза, достигнутые показатели кучности и дальности сохранились и после 600 выстрелов и более без дополнительных обработок; ствол карабина СКС калибра 7,62 мм, бывший в использовании, при исходной кучности боя 9,5 см после серии из 10 выстрелов повысил кучность до 4 см и сохранил данную кучность после 1000 выстрелов.

Рассмотрим, как влияет понижение коэффициента трения и увеличение теплоёмкости на увеличение полезной энергии при метании снаряда на базе зависимостей внутренней баллистики, приведённых ранее.

Работа, затрачиваемая на вращение снаряда, и работа, затрачиваемая на продвижение снаряда по каналу ствола

Учитывая, что работа на вращение снаряда K_2 зависит в данной модели только от характеристик снаряда и дульных нарезов преобразуем выражение для суммы $K_2 + K_3$ к следующему виду: учитывая, что $\mu \tan \alpha = K_2 / \tan \alpha$; $K_2 + K_3 = K_2 \left[(1 + f_{тр} / \tan \alpha) / (1 - f_{тр} \tan \alpha) \right]$.

Принимая среднее опытное значение для K_2 равное 0,0075, угол наклона нарезов $\alpha = 7^\circ$ и $\tan \alpha$ равный 0,123, после простейших преоб-

разований получаем значение коэффициента $K_3 = 0,0075 \left[(1 + 8,13 f_{тр}) / (1 - 0,123 f_{тр}) \right] - 0,0075$.

Коэффициент трения для традиционных материалов при скорости 70 м/с составляет 0,06 и при этих условиях $K_3 = 0,0175$, что соответствует принимаемому на практике значению суммы коэффициентов $K_2 + K_3$ равному 0,025.

В случае, если коэффициент трения снижается (по опытным данным для минеральных покрытий) до 0,008, то $K_3 = 0,0034$ и сумма $K_2 + K_3$ становится равной 0,0109, т.е. потери снижаются в 2,5 раза.

Работа, затрачиваемая на перемещение продуктов сгорания и частиц несгоревшего пороха

Работа A_4 определяется как доля от дульной энергии $K_4 m v^2 / 2$; при $K_4 = m \omega / 3$ — как отношение массы порохового заряда к массе снаряда с понижающим коэффициентом. На практике K_4 принимают равным 0,07–0,10.

Данный подход определяет сопротивления движущихся продуктов сгорания пороха, как долю от сопротивления движения самого снаряда и не учитывает следующие факторы:

- влияние на сопротивление соотношения газа и несгоревших частиц пороха;
- влияние на трение газов и частиц о внутреннюю поверхность ствола коэффициента смачивания поверхности и фактического коэффициента трения.

При нанесении на поверхность минерального покрытия из материалов, обладающих пониженным коэффициентом смачивания по отношению к газам, и низким коэффициентом трения по отношению к несгоревшим частицам в соответствии с теоретическими обоснованиями смачиваемости [7] и результатами, полученными на практике, можно полагать, что коэффициент K_4 уменьшится на порядок и составит в среднем 0,0085. Таким образом, потери по данной составляющей снизятся в 10 раз.

Работа, затрачиваемая на перемещение откатных частей орудия A_5

При классическом подходе $A_5 \approx 0,5 M V^2 (m / M)$, то есть зависит только от соотношения масс снаряда и откатных частей.

Данный подход не учитывает возможности снижения сопротивлений при движении снаряда по стволу и влияния этого фактора на движение откатных частей.

При допущении, что давление в заснарядном пространстве действует равномерно во все стороны и с учётом того, что сопротивление передвижению снаряда значительно уменьшается, в статике можно полагать, что снижение скорости отката пропорционально снижению сопротивления движению снаряда, что и наблюдалось при испытаниях изделия, результаты которых отражены на рис. 1.

По уравнению аппроксимирующей кривой $V = -0,9394 + 346,06$ на базе 10 выстрелов начальная скорость отката составляла 346 м/с, а конечная — 335 м/с, что дало падение скорости на 1,2 %.

Физически, при принятых допущениях, снижение сопротивления передвижению снаряда приводит к увеличению его скорости, а, следовательно, к увеличению объёма заснарядного пространства и падению в нём давления, что снижает скорость отката.

Если дополнить формулу (1) работы A_5 коэффициентом сопротивлений

$$A_5 \approx 0,5MV^2(m/M)f_c$$

а также полагать, что работа, затрачиваемая на перемещение откатных частей, одинакова и при прочих равных условиях изменение скорости отката пропорционально корню квадратному из отношения коэффициентов потерь:

$$V_m = V_0 \left(f_{c_0} / f_{cm} \right)^{0,5}.$$

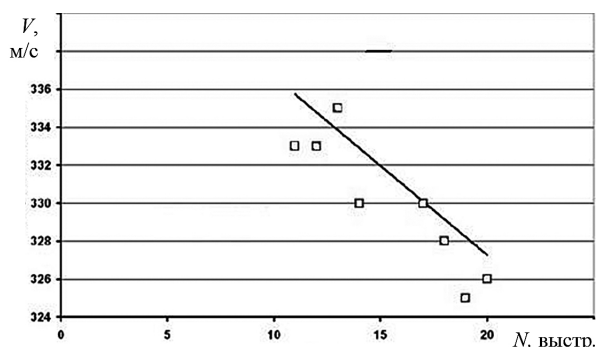


Рис. 1. Зависимость скорости отката от числа выстрелов после модификации

то снижение потерь, исходя из указанного опыта, составляет величину $(V_i / V_0)^2 = (346 / 335)^2 = 1,07$, т.е. сопротивления уменьшаются примерно на 7%, а, следовательно, величина работы A_5 снижается на такую же величину.

Снижение коэффициента фиктивной массы порохового заряда

Поскольку учёт потерь внутри ствола для работ $A_2 - A_5$ проводится в целях сохранения требуемого значения дульной энергии путём увеличения массы заряда, то в расчётах определяется коэффициент фиктивной массы $\phi = 1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5$.

Данные по снижению этого коэффициента при модификации ствола минеральными материалами приведены в табл. 2. При этом для работы A_5 среднее отношение массы снаряда к массе откатных частей принято для существующих орудий калибра 100–152 мм по [8] равным $15,6 / 1450 = 0,011$.

Значения, приведенные в табл. 2, указывают на общее снижение коэффициента потерь по работам более чем в 6 раз для поверхности ствола, модифицированного защитным минеральным материалом.

Работа, затрачиваемая на врезание пояса снаряда в нарезы

Поскольку врезание пояса в нарезы происходит на начальной стадии движения снаряда при малых скоростях, то принимая среднее значение коэффициента трения 0,28 при скорости в 10 м/с (табл. 1) можно, на основании экспериментальных данных допустить, что трение между пояском и нарезов будет снижено в 8 раз. При этом полученная в результате исследований орудийных систем величина данных потерь в долях дульной энергии, составляющая 3–10 %, и может быть снижена в среднем до 0,88 %.

Таким образом, величину K_6 можно принять как 0,009 от дульной энергии вместо 0,07 у штатного орудия. Данная величина учтена в табл. 3–5.

Величина энергии пороховых газов, идущая на нагрев ствола

В существующих артиллерийских системах на нагрев ствола расходуется в среднем 1/3 дульной

Таблица 2

**Снижение потерь сопротивления по работам $A_2 - A_5$
при модификации внутренней поверхности ствола**

Наименование работ $A_2 - A_5$	Коэффициенты потерь при дульной энергии снаряда $K_2 - K_6$	
	штатное орудие	модифицированное орудие
Работа, затрачиваемая на вращение снаряда и работа, затрачиваемая на продвижение снаряда по каналу ствола $K_2 + K_3$	0,025	0,011
Работа, затрачиваемая на перемещение продуктов сгорания и частиц несгоревшего пороха K_4	0,085	0,0085
Работа, затрачиваемая на перемещение откатных частей орудия K_5	0,001	0,01
$\varphi = 1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5$	1,121	1,030
Работа, затрачиваемая на врезание пояска в нарезы K_6	0,07	0,009
Общий коэффициент потерь по работам $K_2 - K_6$	1,191	1,039

Таблица 3

Характеристики материалов ствола и покрытия

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Уд. теплоемкость C_p , Дж/кг К	Теплопроводность λ , Вт/м К
Орудийная сталь	7850	502	34
Хром гальванический	7190	440	65,4
Сerpентинит (при 20 °С)	2760	740	1,8
Тантал	16600	150	54,3

Примечание: теплоёмкость минерального материала при $T = 1000\text{ °С} - 1350\text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$.

Таблица 4

Максимальная температура при одном выстреле, °С

Конструкция	На поверхности камеры	На границе покрытия
Орудийная сталь	1690	690 (на глубине $\delta = 0,2\text{ мм}$)
Хром + сталь ($\delta = 0,2\text{ мм}$)	1540	894
Сerpентинит + сталь ($\delta = 0,05\text{ мм}$)	2390	384
Тантал + сталь ($\delta = 0,2\text{ мм}$)	1660	892

Таблица 5

Максимальная температура при стрельбе очередью после 5 выстрелов (темп — 8 выстрелов в мин)

Конструкция	На поверхности камеры	На границе покрытия
Сerpентинит + сталь ($\delta = 0,05\text{ мм}$)	2400	520

энергии, то есть фактически силу порохового заряда необходимо увеличивать на 33 % для того, чтобы компенсировать нагрев ствола, что приводит к разупрочнению данного слоя и высокому его износу. Поскольку физически эта теплота аккумулируется в узких слоях внутренней поверхности ствола, то

формирование слоя покрытия, материал которого обладает теплоёмкостью в несколько раз большей, чем у стали, и теплопроводностью, в несколько раз меньшей, меняет энергетический баланс внутри ствола. При этом применение защитного минерального материала может обеспечить снижение скоро-

сти нагрева ствола и интенсивности вымывания из его поверхности металлических частиц.

Указанные соображения подтверждаются испытаниями артиллерийской системы в полигонных условиях и проведённым на их основании баллистическим расчётом.

Характеристики материалов приведены в табл. 3.

Результаты опытно-теоретического определения температур на границе покрытия и основного материала приведены в табл. 4.

Из табл. 4 и 5 можно установить следующее:

- температура на поверхности чисто стальной трубы превосходит температуру плавления стали 1539 °С, что подтверждается эксплуатацией стволов (вымывание металла после откола хрома);

- температура на границе хром-сталь и тантал-сталь выше температуры $A_{\text{сз}} = 815$ °С, что приводит к механизму разрушения покрытия (отколы, сегментация), что также подтверждается испытаниями;

- температура на границе серпентинит-сталь на первом выстреле 384 °С с последующей стабилизацией после пятого выстрела на уровне < 600 °С, что приемлемо для прочности основы;

- температура на поверхности серпентинита на первом выстреле 2390 °С с последующей стабилизацией на уровне 2400 °С.

Таким образом, несмотря на тонкое покрытие $\delta = 0,05$ мм, серпентинит позволяет защитить материал основы от перегрева. Но сам серпентинит разогревается до температуры температуры ≈ 2400 °С, что несколько выше температуры его плавления, что, в свою очередь, свидетельствует о процессе его термического разложения и перехода в другие фазы.

Данные результаты иллюстрируются испытаниями на артиллерийском орудии в объеме 84 выстрелов (рис. 2), со стволом с настрелом 2440 выстрелов (к началу испытаний). Замеры проводились штатными артиллерийскими приборами.

Заключение

Результаты экспериментов (рис. 1, 2) подтверждают сделанные предположения о значимом влиянии на параметры ствола физико-механических свойств природных минеральных материалов и о возможности увеличения дальности стрельбы с их использованием.

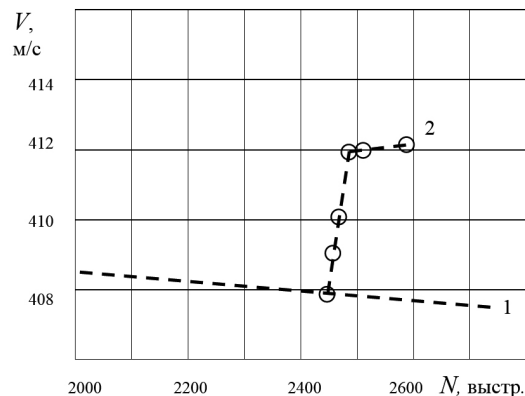


Рис. 2. Изменение начальной скорости полёта снаряда от числа выстрелов

Литература

1. Шинь Нгуен Чыонг. Обоснование технической и технологической возможности восстановления стволов артиллерийских орудий, исчерпавших свой технический ресурс из-за эрозийного износа канала: дис. канд. техн. наук / Шинь Нгуен Чыонг. — Санкт-Петербург. 2006. 162 с.
2. Афанасьев Ю.А., Миропольский Ф.П. Внутренняя баллистика ствольных систем и ракетные двигатели твёрдого топлива. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. 1974 г. 255 с.
3. Беляева С.Д., Калинин В.Ю. Теоретические основы проектирования артиллерийских стволов. — СПб: МВАА. 2019. 110 с.
4. Беляева С.Д., Калинин В.Ю. Автоматизированное проектирование артиллерийских систем // Известия РАН. 2018. № 4 (104). С. 76–80.
5. Беляева С.Д., Калинин В.Ю. Модели внутренней баллистики в задаче продления сроков службы артиллерийских стволов // Известия РАН. 2018. № 3 (103). С. 98–102.
6. Зуев В.В., Лазарев С.Ю. Природные минеральные материалы в современной технике. Теория и практика применения // Наука и технология. Том 2. Труды XXIV Российской школы по проблемам науки и технологий. РАН. — М. 2004. С. 149–159.
7. Зуев В.В. Энергоплотность, свойства минералов и энергетическое строение Земли. — СПб: Наука. 1995. 128 с.
8. Горохов М.С. Внутренняя баллистика ствольных систем. — М.: ЦНИИ информации. 1985. 100 с.