

УДК 623.43.01

DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-59-66

## Один подход к оценке периода последствий на снаряд и на дно канала ствола артиллерийского орудия

А. В. Кулагин, кандидат технических наук, Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

*Период вылета снаряда из канала ствола артиллерийского орудия согласно классическим подходам термодинамики и внутренней баллистики с корреляцией его на калибрах отечественного артиллерийского оружия достаточно хорошо изучен. Уточнение наиболее важных баллистических и энергетических характеристик требует доработки для современных систем вооружения. Исследуется возможность более точного изучения периода последствий с применением газодинамического подхода путем уточнения баллистических и энергетических характеристик с поправкой на период последствий. Приведена оценка секундного расхода и показателя политропы на примере для данных крупнокалиберного пулемета Дегтярева – Шпагина (ДШК) 12,7 мм времен Великой Отечественной войны; модифицированных пулеметов «Утес» и «Корд»; автомата Калашникова калибра 7,62 мм; самозарядного пистолета Сердюкова «Гюрза» калибра 9 мм; пистолета Макарова калибра 9 мм; отечественного гладкоствольного оружия калибра 10 мм; пистолета-пулемета Томпсона калибра 11,43 мм; автоматического пистолета Кольта калибра 11,43 мм; отечественного гладкоствольного служебного револьвера «ДОГ» 132-го калибра на боеприпасе 12,5×35 мм. Энергетические и баллистические характеристики подтверждены диаграммой эффективного использования энергии выстрела и диаграммой дальности прямого попадания в цель. Предложенный графоаналитический подход рекомендуется применять для уточнения энергетических и баллистических характеристик стволов отечественных артиллерийских орудий с учетом периода последствий.*

**Ключевые слова:** период последствий, скорость вытекающих газов, импульс отдачи, показатель политропы, секундный расход газа.

**Введение**  
Как показывают теоретические исследования и многолетняя практика эксплуатации, период последствий легче всего смоделировать для ствола артиллерийского орудия [1–3]. Действуя на снаряд, вытекающие из ствола газы вызывают увеличение его дульной скорости. По данным экспериментальных исследований, это увеличение составляет  $\Delta V_d = 0,5...2,5\%$ . Поправка  $\Delta V_d$  может оцениваться по результатам изменения начальной скорости движения снаряда на расстоянии 2...3 м от дульного среза по показаниям двух соленоидов, установленных на базовом расстоянии, превышающем примерно в 3...4 раза предыдущее.

Более существенным является неоднобразное воздействие на снаряд газов и его неравномерный сход с нарезов в момент вылета, вызывающие появление начальных возмущений, дополнительного угла вылета и, как следствие, дополнительного рассеивания снарядов. Влияние последних факторов оценивается только эмпирически.

Если продолжительность периода последствий на дно снаряда определить довольно сложно в смысле фиксации момента окончания воздействия, визуально она определяется доста-

точно четко – от момента вылета снаряда из канала ствола до момента, когда давление в стволе сравняется с атмосферным.

За период последствий импульс силы отдачи, как и скорость свободного отката, возрастает на 15...25 %, а в некоторых случаях даже больше, когда работают все дульные насадки. Особое значение имеет период последствий для систем, в которых через отверстие в стенке канала ствола пороховые газы используются для приведения в движение автоматики или ее торможения. Импульс движения за время наполнения камер газоотводных устройств, в равной мере создается как за время движения снаряда по каналу, так и за период последствий, а в стрелковом оружии последняя часть является преобладающей. Поэтому при проектировании автоматического оружия необходимо уметь вычислять не только результирующие и интегральные характеристики воздействия газов на ствол, но и определять изменение всех параметров по времени.

Цель настоящей статьи – использование согласования секундного расхода порохового газа, коэффициента политропы и соотношения площадей текущего положения снаряда к общей площади канала ствола при прохождении ка-

зенного среза ствола в качестве одного из подходов оценки периода последствий на снаряд.

### Материалы и методы

Общим подходом является гипотеза Пиобера о равномерном распределении газопороховой смеси по длине канала ствола. Такой подход является оправданным при термодинамическом (классическом) методе решения основной задачи внутренней баллистики, которая пока является основной как для автоматического оружия, так и для артиллерийских систем, что хорошо отражается таблицами внутренней баллистики С. И. Ермолаева [1–3].

Существующие методы расчета периода последствий можно разделить на две группы, различающиеся следующими принципиальными положениями [4–6].

1. В выходном сечении ствола устанавливается критическая скорость и критическое давление, определяемое через давление в канале ствола соотношением

$$\frac{P_{co}}{p} = x^*.$$

2. Считается, что особого состояния при истечении газа из ствола в выходном сечении нет, хотя скорость истечения равна критической. Это предположение в данное время более оправдано.

После выхода ведущей части снаряда или пули за дульный срез пороховые газы через быстро увеличивающийся кольцевой зазор между снарядом и стволом устремляются в атмосферу. Время до полного выхода снаряда из канала относительно невелико, и им можно пренебречь. Дальнейший характер истечения зависит от состояния газов в выходном сечении ствола. Возможны два случая.

*Скорость вытекающих газов в момент вылета снаряда меньше местной скорости звука*

Возникающее разряжение распространяется внутрь канала, постепенно ускоряя отдельные частицы до скорости, соответствующей критической скорости в дульном срезе. Происходит процесс перестройки течения газов в стволе, сопровождающийся увеличением перепадов давления по длине канала, который заканчивается, когда волна разряжения дойдет до дна канала. При этом скорость газов в дульном срезе возрастает, а скорость звука падает. Для расчета этого процесса необходим газодинамический подход, при котором законы изменения плотности и скорости газов по длине канала определя-

ются при расчете течения газов, а не являются наперед заданными. Однако прикидочные расчеты показали, что при значительном отличии скорости снаряда от скорости звука в дульном срезе среднее давление по длине ствола в конце переходного процесса мало ( $\leq 4\%$ ) отличается от среднего давления в стволе в момент вылета.

*Скорость вытекающих газов в момент вылета снаряда больше местной скорости звука*

В этом случае волна разряжения не может проникнуть внутрь ствола, и газы в стволе продолжают перемещаться ускоренно под действием перепадов давления по длине канала, имевшихся в момент вылета снаряда.

Но скорость газов в дульном срезе постепенно убывает, как и местная скорость звука, однако более плавно. И когда значительное количество газов покинет рабочий объем, скорости истечения и звука сравниваются.

При расчете истечения газов в последнем случае необходим газодинамический подход. Принятие гипотезы Пиобера о линейности истечения не дает возможности исследовать точки разрыва давлений при вылете снаряда и во время основной фазы истечения за счет превышения скорости звука, хотя в подавляющих подходах оценки периода последствий остается первый случай. Для установления подобия сглаживания точек разрыва удобнее обратиться к испытаниям стволов малокалиберных автоматических пушек ВЯ-23, ГШ-6-301, имеющих практически одну и ту же начальную скорость  $V_0 = 900$  м/с – это второй случай, как и для стволов артиллерийских орудий, стреляющих подкалиберными снарядами [7, 8].

Исходя из этих случаев, примем следующие допущения [9–12].

1. Канал ствола открывается мгновенно.

2. Процесс истечения считаем квазистационарным, при котором рабочий процесс в стволе характеризуется мгновенными значениями параметров.

3. Газ подчиняется закону Клапейрона. В любой момент времени для средних значений термодинамических параметров по длине канала имеем

$$pw_{\text{кн}} = \omega_i RT,$$

где  $\omega_i$  – текущая масса газов в стволе;  $w_{\text{кн}}$  – объем канала ствола.

4. Скорость газа в выходном сечении ствола равна критической в течение всего периода последствий. Переходным участком до установления скорости истечения, равной скорости звука,

и конечным участком, когда истечение должно быть докритическим:

$$\frac{p_a}{p} > x^*,$$

где  $p_a$  – атмосферное давление, которым пренебрегаем.

5. Для газа в стволе принимаем гипотезу Пиобера, согласно которой плотность газа в различных сечениях канала в каждый интервал времени равна  $\rho_x = \text{const}$ .

6. Потери на теплоотдачу стенкам ствола учитываем косвенно путем сведения процесса движения газа в канале к политропическому процессу с постоянным средним значением показателя политропы.

Уравнение рабочего процесса основывается на зависимости  $p = f(p)$ , которая заменяет одно из уравнений газодинамики – уравнение энергии. Формально любой процесс обмена энергии с внешней средой можно свести к политропическому процессу, используя переменное значение показателя политропы  $n$ , дифференциальное уравнение которого

$$\frac{dp}{d\rho} = n \frac{p}{\rho}. \quad (1)$$

Использование этого уравнения целесообразно, если потери на теплоотдачу невелики по отношению к количеству энергии, уходящей из ствола вместе с вытекающими газами. Значит, если не учитывать потери на теплоотдачу, то это может привести к ошибкам в определении интегральных характеристик периода последствия  $t$ , в частности импульса силы отдачи.

Показатель политропы связан с уравнением первого начала термодинамики

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dU}{dt} + p \frac{dA}{dt}, \quad (2)$$

где  $Q$  – энергия, накопленная или отданная газом в ходе процесса;  $U$  – внутренняя энергия системы;  $A$  – работа, совершаемая газом в период последствия.

Значения температуры и давления можно выровнять по длине канала ствола, если мысленно остановить процесс истечения. Тогда расход газа  $\frac{dp}{dt}$  и уход энергии и  $U$  из канала

$$U = c_w T \omega_t,$$

где  $c_w$  – теплоемкость газа при постоянном объеме канала ствола;  $T$  – температура рабочего процесса.

Используя уравнение состояния, получим выражение с учетом показателя  $k$  – адиабаты процесса:

$$U = \frac{c_w}{R} p W_{\text{кн}} = \frac{p W_{\text{кн}}}{k-1}.$$

Так как в период последствия  $w_{\text{кн}} = \text{const}$ , то из уравнения (2) имеем

$$\frac{dp}{dt} = \frac{k-1}{W_{\text{кн}}} \frac{dQ}{dt}.$$

Далее, имея в виду, что

$$\frac{dp}{d\rho} = \frac{dp}{dt} \frac{dt}{d\rho};$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\omega_t}{W_{\text{кн}}} \right) = - \frac{G}{W_{\text{кн}}},$$

где  $G$  – расход газа в период последствия, получим

$$\frac{dp}{d\rho} = - \frac{k-1}{G} \frac{dQ}{dt}. \quad (3)$$

Величину  $\frac{dQ}{dt}$  следует рассматривать как секундный расход (уход энергии по всей массе газов в стволе):

$$\frac{dQ}{dt} = -c_p T G - \frac{dQ_r}{dt}. \quad (4)$$

При определении удельной полной энергии вытекающих газов и потерь на теплоотдачу будем пренебрегать скоростью движения газов в стволе, что может повлиять на точность анализа всего процесса.

Используем для секундной теплоотдачи стенками канала зависимость, которая при средних значениях по длине канала температуры и коэффициента теплоотдачи имеет вид

$$\frac{dQ_r}{dt} = \alpha (T - T_{\text{пов}}) S_{\text{кн}} = \alpha T \gamma_T S_{\text{кн}}, \quad (5)$$

где  $\gamma_T = 1 - \frac{T_{\text{пов}}}{T}$ .

Подставив зависимости (4), (5) в уравнение (3), получим выражение

$$\frac{dp}{d\rho} = \frac{p}{\rho} \left[ k + (k-1) \frac{\alpha}{RG} \gamma_T S_{\text{кн}} \right].$$

Сравнив его с дифференциальным уравнением политропы (1), имеем

$$n = k + 1(k - 1) \frac{\infty \gamma_r S_{\text{кн}}}{RG}. \quad (6)$$

При преобразовании второго слагаемого уравнения (6) используем выражение для коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , полученное из формулы Крауссольтда,

$$\alpha = \frac{\text{Nu}}{d} \lambda,$$

где  $\text{Nu}$  – критерий Нуссельта;  $d$  – диаметр канала ствола;  $\lambda$  – потери потока в режиме турбулентности газового потока.

Для среднего значения  $\alpha$  примем

$$\rho V_x = \frac{G_x}{S} = \frac{G_{\text{до}}}{2S},$$

где  $G_{\text{до}}$  – расход газа из канала ствола в дульном отверстии;  $S$  – текущее значение площади канала ствола.

Тогда

$$\frac{\alpha}{G} = \frac{\alpha}{G_{\text{до}}} = \frac{B}{d^{0,2}} (2S)^{-0,8} G_{\text{до}}^{0,2}, \quad (7)$$

где  $B$  – константа, обратно пропорциональная расходу газа.

После преобразования уравнения (7) делаем средним секундный расход газа по времени  $G_{\text{до}} = \frac{G_{\text{с}}}{2}$ , где  $G_{\text{с}}$  – секундный расход газа из канала ствола в момент вылета снаряда, и зависимость (6) примет вид

$$n = k + (k - 1)c(T) \left( \frac{d}{G_{\text{с}}} \right)^{0,2} \frac{S_{\text{кн}}}{S}, \quad (8)$$

$$\text{где } c(T) = \left( \frac{\pi}{G_{\text{с}}} \right) v_T^{0,2} \frac{B}{R} v_T = 0,180 \cdot 10^{-6} v_T B.$$

Анализируя формулы (7) и (8), приходим к выводу, что расход газа  $G_{\text{до}}$ , параметр  $B$  и функция  $c(T)$  весьма слабо влияют на значение показателя политропы, что допускает принятие его среднего значения из соотношения  $\frac{S_{\text{кн}}}{S}$ ; это можно определить по средней температуре газа за период последствий, которая в стволах автоматического оружия находится в пределах  $T_{\text{ср}} = 2/3 T_{\text{до}}$ . По этой причине можно примерно принять параметр  $B = 5,5 \cdot 10^3$ , тогда

$$c(T) = 10^{-2} v_T.$$

Остановимся на определении величины  $v_T$ . Опытные данные, как для артиллерийского, так и для автоматического оружия, показывают, что температура внутренней поверхности ствола за период последствий незначительно убывает по времени и по длине ствола от дна канала к дульному срезу. Средняя температура незначительно возрастает с уменьшением калибра, и в среднем ее можно принять  $T_{\text{пов}} = 700 \text{ К}$  для автоматического оружия и  $T_{\text{пов}} = 600 \dots 650 \text{ К}$  для артиллерийских систем калибра  $57 \dots 152 \text{ мм}$ . В этом случае можно принять для вычисления функции  $T = T_{\text{пов}} = 700 \text{ К}$  и  $T = T_{\text{ср}} = 2/3 T_{\text{до}}$ . Заметим, что в формулу (8) можно подставить расход  $G_{\text{с}}$ , определенный по параметрам в дульном срезе по формуле

$$G_{\text{до}} = S \rho a_{\text{до}} = S \rho \sqrt{k \frac{p_{\text{до}}}{\rho}} = S \sqrt{k p_{\text{до}} \rho},$$

где  $a_{\text{до}}$  – скорость газа из канала ствола в дульном отверстии.

Давление в дульном срезе определяется как

$$p_{\text{до}} = \xi_{\text{до}} p.$$

Коэффициент  $\xi_{\text{до}}$  незначительно меняется при варьировании показателя  $n$ ; например, при  $k = 1,25$  и среднем значении  $n = 1,33$  коэффициент  $\xi_{\text{до}} = 0,740$  [13–17].

### Результаты исследования

Чтобы проверить правильность рассуждений, рассмотрим пример определения показателя политропы для данных стволов стрелкового оружия, которые можно пересчитать на артиллерийские.

Пулемет Великой Отечественной войны ДШК, ныне модифицированные «Утес» и «Корд»:

$$d = 12,7 \text{ см}, \quad S = 1,32 \text{ см}^2$$

$$\text{вес заряда } \omega = 0,0188 \text{ кг}$$

$$\text{длина канала ствола } L_{\text{кн}} = 1100 \text{ мм}$$

$$p_{\text{до}} = 7355 \cdot 10^4 \text{ Па}, \quad w_{\text{кн}} = 145,5 \text{ см}^3$$

$$S_{\text{кн}} = 440,5 \text{ см}^2, \quad RT_{\text{до}} = 72 \cdot 10^4 \text{ Дж/кг}$$

$$R = 348 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Решение:

$$T_{\text{до}} = \frac{RT_{\text{до}}}{R} = \frac{72 \cdot 10^4}{348} = 2065 \text{ К};$$

$$T_{\text{ср}} = 2/3 T_{\text{до}} = 2/3 \cdot 2065 = 1450 \text{ К};$$

$$v_T = 1 - \frac{T_{\text{пов}}}{T} = 1 - \frac{700}{1450} = 0,515;$$

$$c(T) = 10^{-2} v_T = 0,515 \cdot 10^{-2}.$$

$$\frac{S_{\text{кн}}}{S} = \frac{440}{1,32} = 333;$$

$$\rho_\partial = \frac{\omega}{w_{\text{кн}}} = \frac{0,0188}{1,45,5 \cdot 10^{-6}} = 129,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$G_\partial = S \sqrt{k \xi_{\partial\partial} p_\partial \rho_\partial} = 1,32 \cdot 10^{-4} \times \\ \times \sqrt{1,25 \cdot 0,740 \cdot 7355 \cdot 10^4 \cdot 129,2} = 12,73 \frac{\text{кг}}{\text{с}};$$

$$n = k + (k-1)c(T) \left( \frac{d}{G_\partial} \right)^{0,2} \frac{S_{\text{кн}}}{S} = \\ = 1,25 + 0,25 \cdot 0,515 \cdot 10^{-2} \left( \frac{0,0127}{12,37} \right)^{0,2} \cdot 333 = 1,358.$$

Другой пример определения показателя полнотры рассмотрим для данных АК:

$$d = 7,62 \text{ мм}; S = 0,476 \text{ см}^2; L_{\text{кн}} = 415 \text{ мм};$$

$$W_{\text{кн}} = 19,8 \text{ см}^3; S_{\text{кн}} = 99,1 \text{ см}^2; \omega = 0,0016 \text{ кг};$$

$$p_\partial = 5570 \cdot 10^4 \text{ Па}; RT_\partial = 60,5 \cdot 10^4 \text{ Дж/кг}.$$

Решение:

$$T_\partial = \frac{60,5 \cdot 10^4}{348} = 1740 \text{ К};$$

$$T_{\text{ср}} = 2/3 \cdot 1740 = 1160 \text{ К};$$

$$v_T = 1 - \frac{700}{1160} = 0,397; \quad \frac{S_{\text{кн}}}{S} = 208;$$

$$\rho_\partial = \frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{19,8 \cdot 10^{-6}} = 80,8 \frac{\text{кг}}{\text{с}};$$

$$G_\partial = 0,476 \cdot 10^{-4} \sqrt{1,25 \cdot 0,740 \cdot 5570 \cdot 10^4 \cdot 80,8} = \\ = 3,071 \frac{\text{кг}}{\text{с}};$$

$$n = 1,25 + 0,25 \cdot 0,393 \cdot 10^{-2} \left( \frac{0,00762}{3,071} \right)^{0,2} \cdot 208 = 1,31.$$

Расчетные зависимости следует привести в соответствие с рисунками 1, 2.

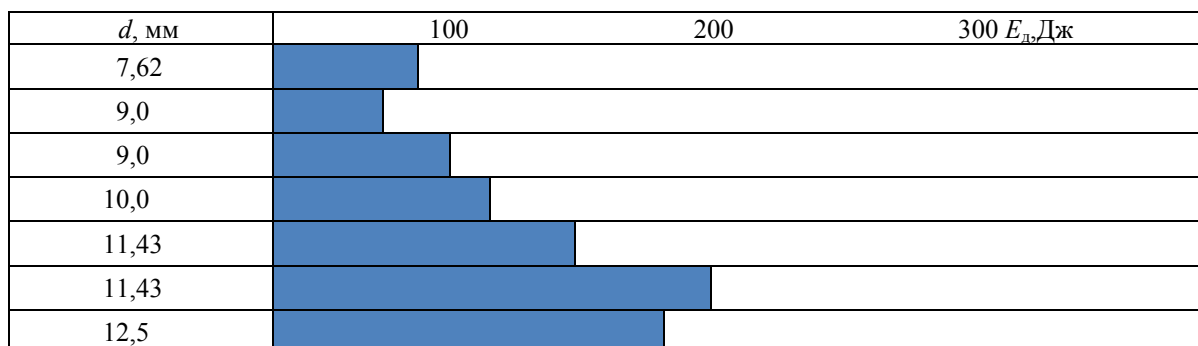


Рис. 1. Диаграмма эффективного использования энергии выстрела

Fig. 1. Diagram of the effective use of shot energy

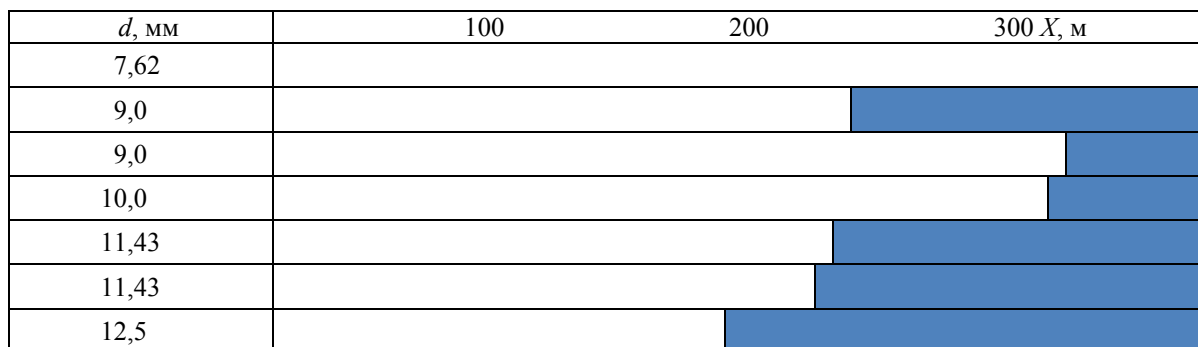


Рис. 2. Диаграмма дальности прямого попадания в цель

Fig. 2. Diagram of the direct hit range

Представленный графоаналитический подход в виде модели энергетических и баллистических характеристик стволов артиллерийских орудий рекомендуется к более точному исследованию периода последствий, однако требуется экспериментальная проверка характеристик внутренней и внешней баллистики для различных калибров стволов в условиях полигона, что можно скорректировать по предлагаемым рекомендациям [18–20].

### Выводы

1. Установлено слабое влияние секундного расхода в периоде последствий выстрела и прямая зависимость с показателем полноты.

2. Выяснено, что отношение площадей к моменту прохождения дульного среза существенно влияет на уменьшение калибра ствола таких оружейных систем, как ДШК, ныне модифицированные «Утес» и «Корд», и АК.

### Библиографические ссылки

1. Баутин С. П., Крутова И. Ю., Обухов А. Г. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков : монография. Екатеринбург : УрГУПС, 2020. 399 с.

2. Трошков А. В. Ракетно-артиллерийское вооружение сухопутных войск России. М. : Этника, 2022. 450 с.

3. Курс артиллерии для оператора комплекса воздушной разведки с беспилотным летательным аппаратом : монография / С. А. Баканеев, А. В. Карпович, С. А. Орлов, Ю. М. Чернышев. СПб. : Первый ИПХ, 2022. 364 с.

4. Кулаков В. В., Матвеевский М. М., Шаманов В. А. Отечественная артиллерия. Краткая история и перспективы развития : монография. М. : Прометей, 2022. 432 с.

5. Беляева С. Д. Внешняя баллистика в примерах и задачах : монография. СПб. : МВАА, 2022. 156 с.

6. Водорезов Ю. Г. Теория и практика стрельбы из нарезного длинноствольного стрелкового оружия. В 2 ч. М. : МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2022. Ч. 1. 549 с.

7. Водорезов Ю. Г. Теория и практика стрельбы из нарезного длинноствольного стрелкового оружия. В 2 ч. М. : МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2022. Ч. 2. 289 с.

8. Самородский М. В., Морозов С. В. Проблемы развития системы ракетно-артиллерийского вооружения сухопутных войск // Военная мысль. 2020. № 11. С. 111–119.

9. Баутин С. П., Крутова И. Ю. Аналитическое и численное моделирование течений газа при учете действия силы Кориолиса : монография. Екатеринбург : УрГУПС, 2019. 182 с.

10. Баутин С. П. Численное моделирование трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязко-

го теплопроводного газа. Екатеринбург : УрГУПС, 2020. 287 с.

11. Алексеев С. А. Системные методы исследования конструкций стрелкового оружия // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 3. С. 5–13. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-5-13

12. Галаган Л. А., Сахратов Р. Ю., Чирков Д. В. Эволюция дульных газовых устройств автоматов серии «АК» // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 3. С. 44–49. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-3-44-49

13. Соловатов И. А., Митюков Н. В. Выбор метода наведения для перехвата маневренных и высокоскоростных целей // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2022. № 2. С. 58–66.

14. Кулагин А. В. Исследование применения классических приемов на основании прочности сложных внешних профилей стволов отечественных малокалиберных пушек // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 2. С. 197–203.

15. Беляева С. Д. Условия устойчивости полета неуправляемых артиллерийских снарядов // Артиллерийский журнал. 2023. № 1. С. 16–23.

16. Беляева С. Д. Пакетное решение основной задачи внешней баллистики // Артиллерийский журнал. 2023. № 4. С. 27–32.

17. Беляева С. Д. Поправка в угол бросания по условию изменения высоты в заданной точке // Артиллерийский журнал. 2023. № 2. С. 32–39.

18. Суфиянов В. Г., Клюкин Д. А. Повышение точности стрельбы автоматической пушки за счет изменения геометрии ствола // Проектирование систем вооружения и измерительных комплексов : труды 19-й Всероссийской научно-технической конференции (29–30 сентября 2022 года, УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина). 2023. С. 121–131.

19. Русак И. Г., Тенев В. А. Структурно-параметрическая оптимизация конструкции заряда артиллерийского выстрела // Проектирование систем вооружения и измерительных комплексов : труды 19-й Всероссийской научно-технической конференции (29–30 сентября 2022 года, УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина). 2023. С. 248–262.

20. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния трубчатого порохового элемента с учетом изменения границ в процессе горения / И. Г. Русак, В. А. Тенев, В. Г. Суфиянов, Д. А. Клюкин // Проектирование систем вооружения и измерительных комплексов : труды 19-й Всероссийской научно-технической конференции (29–30 сентября 2022 года, УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина). 2023. С. 263–276.

### References

1. Bautin S.P., Krutova I.Yu., Obukhov A.G. (2020) [Gas-dynamic theory of ascending swirling flows]. Ekaterinburg: UrGUPS, 399 p. (in Russ.).

2. Troshkov A.V. (2022) [Rocket and artillery weapons of the Russian ground forces]. Moscow: Ethnika Publ., 450 p. (in Russ.).
3. Bakaneev S.A., Karpovich A.V., Orlov S.A., Chernyshev Yu.M. (2022) [Artillery course for the operator of an aerial reconnaissance complex with an unmanned aerial vehicle]. St. Petersburg: Pervyi IPH, 364 p. (in Russ.).
4. Kulakov V.V., Matveevsky M.M., Shamanov V.A. (2022) [Domestic artillery. Brief history and development prospects]. Moscow: Prometey Publ., 432 p. (in Russ.).
5. Belyaeva S.D. (2022) [External ballistics in examples and problems: monograph]. St. Petersburg: MVAA, 156 p. (in Russ.).
6. Vodorezov Yu.G. (2022) [Theory and practice of shooting from rifled long-barreled small arms]. In 2 parts. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2022. Part 1, 549 p. (in Russ.).
7. Vodorezov Yu.G. (2022) [Theory and practice of shooting from rifled long-barreled small arms]. In 2 parts. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2022. Part 2, 289 p. (in Russ.).
8. Samorodskiy M.V., Morozov S.V. (2020) [Problems of Development of the Missile and Artillery Armament System of Ground Forces]. *Voennaya mysl'*, no. 11, pp. 111-119 (in Russ.).
9. Bautin S.P., Krutova I.Yu. (2019) [Analytical and Numerical Modeling of Gas Flows Taking into Account the Coriolis Force]. Yekaterinburg: UrGUPS, 182 p. (in Russ.).
10. Bautin S.P. (2020) [Numerical Modeling of Three-Dimensional Unsteady Flows of Compressible Viscous Heat-Conducting Gas]. Yekaterinburg: UrGUPS, 287 p. (in Russ.).
11. Alekseev S.A. (2020) [System Methods for Studying Small Arms Designs]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 23, no. 3, pp. 5-13. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-5-13 (in Russ.).
12. Galagan L.A., Sakhratov R.Yu., Chirkov D.V. (2018) [Evolution of muzzle gas devices of the AK series assault rifles]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 21, no. 3, pp. 44-49. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-3-44-49 (in Russ.).
13. Solovatov I.A., Mityukov N.V. (2022) [Selection of a guidance method for intercepting maneuverable and high-speed targets]. *Izvestiya Rossijskoj akademii raketnyh i artillerijskih nauk*, no. 2, pp. 58-66 (in Russ.).
14. Kulagin A.V. (2023) [Study of the application of classical techniques based on the strength of complex external profiles of barrels of domestic small-caliber guns]. *Tekhnicheskie nauki*, no. 2, pp. 197-203 (in Russ.).
15. Belyaeva S.D. (2023) [Conditions for the stability of the flight of unguided artillery shells]. *Artillerijskij zhurnal*, no. 1, pp. 16-23 (in Russ.).
16. Belyaeva S. D. (2023) [Package solution of the main problem of external ballistics]. *Artillerijskij zhurnal*, no. 4, pp. 27-32 (in Russ.).
17. Belyaeva S.D. (2023) [Correction to the throwing angle based on the condition of change in altitude at a given point]. *Artillerijskij zhurnal*, no. 2, pp. 32-39 (in Russ.).
18. Sufiyanov V.G., Klyukin D.A. (2023) [Increasing the firing accuracy of an automatic cannon by changing the barrel geometry]: Design of weapons systems and measuring complexes: Proceedings of the 19th All-Russian Scientific and Technical Conference (September 29-30, 2022, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin), pp. 121-131 (in Russ.).
19. Rusyak I.G., Tenenev V.A. (2023) [Structural and parametric optimization of the design of an artillery shot charge]: Design of weapons systems and measuring complexes: Proceedings of the 19th All-Russian Scientific and Technical Conference (September 29-30, 2022, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin), pp. 248-262 (in Russ.).
20. Rusyak I.G., Tenenev V.A., Sufiyanov V.G., Klyukin D.A. (2023) [Mathematical modeling of the stress-strain state tubular propellant element taking into account the change in boundaries during combustion]: Design of weapons systems and measuring complexes: Proceedings of the 19th All-Russian Scientific and Technical Conference (September 29-30, 2022, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin), pp. 263-276 (in Russ.).

### One Approach to Assess the Aftereffect Period on a Projectile and on the Bottom of an Artillery Gun Bore

A.V. Kulagin, PhD in Engineering, Udmurt State University, Izhevsk, Russia

*The time of shell projection from the barrel of an artillery gun, according to classical approaches of thermodynamics and internal ballistics with period correlation on the calibers of domestic artillery weapons, is well studied. Clarification of the most important ballistic and energy characteristics requires refinement for modern weapon systems. The purpose of this article is to propose an approach to estimate the aftereffect period on a projectile in the form of matching the second consumption of powder gas, the polytrope coefficient and the ratio of the projectile current position area to the total area of the barrel bore when passing the breech section. The possibility of a more accurate study of the aftereffect period using a gas-dynamic approach by clarifying the ballistic and energy characteristics adjusted for the aftereffect period is being investigated. The estimation of the second consumption and the polytrope indicator is given using the example for the data of the 12.7 mm machine gun of the Second World War DShK, the modified Utes and Kord machine guns, the 7.62 mm Kalashnikov assault rifle, the 9 mm Serdyukov Gyurza self-loading pistol, the 9 mm Makarov pistol, the domestic 10 mm smoothbore weapon, the 11.43 mm Thompson submachine gun, the 11.43 mm Automatic Colt Pistol and the domestic smoothbore service 132-caliber DOG revolver with 12.5×35 mm ammunition. Energy and ballistic characteristics are confirmed by a diagram of the effective use of shot energy and a*

*diagram of the direct target hit range. The proposed grapho-analytical approach is recommended to be used to clarify the energy and ballistic characteristics of the barrels of domestic artillery guns, taking into account the aftereffect period.*

**Keywords:** the aftereffect period, the velocity of the escaping gases, the recoil pulse, the liter index, the second gas consumption.

Получено 28.10.2024

#### Образец цитирования

Кулагин А. В. Один подход к оценке периода последствий на снаряд и на дно канала ствола артиллерийского орудия // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 1. С. 59–66. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-59-66

#### For Citation

Kulagin A.V. (2025) [One Approach to Assess the Aftereffect Period on a Projectile and on the Bottom of an Artillery Gun Bore]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 1, pp. 59-66 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-59-66