



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2023. Т. 23, вып. 2. С. 253–263
Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics, 2023, vol. 23, iss. 2, pp. 253–263
mmi.sgu.ru <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2023-23-2-253-263>, EDN: IXKNHK

Научная статья
УДК 004.94

Исследование необходимости использования переменного значения баллистического коэффициента при моделировании траектории пули в стрелковом тренажере

С. Ф. Егоров¹, А. Ю. Вдовин²✉

¹Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН, Россия, 426067, г. Ижевск, ул. Татьяны Барамзиной, д. 34

²Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, Россия, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7

Егоров Станислав Феликсович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, stos.mitm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4737-0706>, AuthorID: 609410

Вдовин Алексей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники, vd_aleks@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8268-3375>, AuthorID: 677382

Аннотация. При разработке электронных стрелковых тренажеров для ручного автоматического оружия, не использующих боеприпасы, необходимо добиться максимально реалистичного моделирования траектории полета пули для каждого выстрела с учетом множества факторов. Традиционно при моделировании траектории используется система дифференциальных уравнений внешней баллистики. Использование в такой математической модели постоянного значения баллистического коэффициента не позволяет добиться высокой точности моделирования траектории по таким важным для решения «задачи встречи» параметрам, как полное время полета и превышение траектории для всех прицельных дальностей стрелкового оружия. Начальными значениями в математической модели на основе системы дифференциальных уравнений внешней баллистики являются угол бросания (зависит от установок прицела), начальная скорость и баллистический коэффициент пули, а рассчитываются такие параметры, как текущее превышение, дальность, время, скорость и направление. Приводятся оценки погрешностей расчета координат баллистической траектории при различных подходах к использованию значения баллистического коэффициента. Сделан вывод о том, что на текущий момент при моделировании траектории полета пули вполне оправданным является упрощение, основанное на использовании постоянного значения баллистического коэффициента, но при соответствующих требованиях тактико-технического задания актуальным будет вопрос исследования способов повышения точности моделирования траектории. Одним из таких способов является вариант использования значения баллистического коэффициента, зависящего от угла бросания, предложенный в настоящей статье.

Ключевые слова: баллистический коэффициент, внешняя баллистика, математическая модель, траектория полета пули, стрелковый тренажер

Для цитирования: Егоров С. Ф., Вдовин А. Ю. Исследование необходимости использования переменного значения баллистического коэффициента при моделировании траектории пули в



стрелковом тренажере // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2023. Т. 23, вып. 2. С. 253–263. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2023-23-2-253-263>, EDN: IXKNHK

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Investigation of the need to use the variable value of the ballistic coefficient when modeling the trajectory of the bullet in the shooter simulator

S. F. Egorov¹, A. Yu. Vdovin²✉

¹Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS, 34 Tat'iany Baramzinoi St., Izhevsk 426067, Russia

²Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 7 Studencheskaya St., Izhevsk 426069, Russia

Stanislav F. Egorov, stos.mitm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4737-0706>, AuthorID: 609410

Aleksey Yu. Vdovin, vd_aleks@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8268-3375>, AuthorID: 677382

Abstract. When developing electronic shooting simulators for manual automatic weapons that do not use ammunition, it is necessary to achieve the maximum realistic modeling of the bullet flight path for each shot taking into account a set of factors. Traditionally, a system of differential equations of outer ballistics is used in modeling the trajectory. The use of a constant value of the ballistic coefficient in such a mathematical model does not allow to achieve high accuracy of modeling the trajectory for such important for solving the “task of the meeting” parameters as complete flight time and excess of the trajectory for all targeted range of small arms. The initial values in the mathematical model based on the system of differential equations of the outer ballistic are the casting angle (depends on the settings of the sight), the initial speed and the ballistic coefficient of the bullet, and such parameters as the current excess, range, time, speed and direction are calculated. Estimates of the errors of the calculation of the coordinates of the ballistic trajectory at various approaches to the use of the value of the ballistic coefficient are given. It is concluded that at the moment when modeling the flight trajectory of the bullet, simplification based on the use of a constant value of the ballistic coefficient is quite justified but with the relevant requirements of the tactical and technical task the study of ways to increase the accuracy of the trajectory modeling will become relevant. One of these paths is using the value of the ballistic coefficient, depending on the casting angle proposed in this article.

Keywords: ballistic coefficient, external ballistics, mathematical model, bullet flight path, shooting simulator

For citation: Egorov S. F., Vdovin A. Yu. Investigation of the need to use the variable value of the ballistic coefficient when modeling the trajectory of the bullet in the shooter simulator. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2023, vol. 23, iss. 2, pp. 253–263 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2023-23-2-253-263>, EDN: IXKNHK

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

При разработке электронных стрелковых тренажеров для ручного автоматического оружия, не использующих боеприпасы (например, с имитаторами АК74, РПК74, АКМ,



ПКМ, СВД и т.п.) [1–11], возникает задача максимально реалистичного моделирования траектории каждого выстрела с учетом множества факторов [12–14]: установок прицела, параметров атмосферы и типа боеприпасов, последний существенно влияет на начальную скорость пули и определяет баллистический коэффициент (БК).

Исследования БК базируются на нормативных документах по баллистическим характеристикам боеприпасов стрелкового оружия [15], опыте разработки профессионального оптико-электронного стрелкового тренажера «Ингибитор» 1УЗ3 (в Институте механики УдмФИЦ УрО РАН и на кафедре вычислительной техники ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова совместно с АО «Концерн “Калашников”») и разработке семейства общедоступных электронных тренажеров «СТрИж» нескольких уровней аппаратной реализации [16–18].

Целью статьи является уточнение вопроса влияния переменного баллистического коэффициента пули на точность оценки траекторных параметров полета с целью оптимизации процесса внешнебаллистического моделирования в стрелковом тренажере для решения «задачи встречи».

1. Математическая модель внешней баллистики

При моделировании настильной баллистической траектории пули без учета угла места цели на базе системы дифференциальных уравнений по дальности (1) с законом сопротивления воздуха 1943 г. [19] используют следующие типичные допущения [13, 14].

1. Кривизна и вращение земли игнорируются, ускорение свободного падения g выбрано, например, для параллели 55° и постоянно $g = 9.815 \text{ м/с}^2$.

2. Влияние прецессии, нутации и деривации пули не учитывается (точнее, эти факторы включены в рассеивание траекторий, которое в рамках настоящих исследований учитывается лишь оценочно), рассматривается только движение центра масс пули.

3. Баллистический коэффициент пули для закона сопротивления 1943 г. c_{43} считается постоянным.

4. В рамках большинства исследований температура, давление воздуха и скорость бокового ветра постоянны и имеют стандартные значения: $T = 288^\circ \text{K}$ (15°C), $p = 760 \text{ мм р.с.}$ и $W = 0 \text{ м/с}$.

$$\begin{cases} \frac{du}{dx} = -c_1 v C_x \left(\frac{v}{a} \right) \\ \frac{d\gamma}{dx} = -\frac{g}{u^2} \\ \frac{dy}{dx} = \gamma = \text{tg } \theta \\ \frac{dt}{dx} = -\frac{1}{u} \\ v = u \sqrt{1 + \gamma^2}, \end{cases} \quad (1)$$

где t — время движения пули; x, y — координаты центра масс пули; $a = 340.4 \text{ м/с}$ — скорость звука; $u = v \cos \theta$ — проекция скорости v на ось Ox ; $\gamma = \text{tg } \theta$ — тангенс угла θ вектора скорости; $C_x \left(\frac{v}{a} \right)$ — функция лобового сопротивления воздуха по закону 1943 г. (рис. 1), аппроксимируется от $M = v/a$ — числа Маха в [20]; $c_1 = 0.00048104 c_{43}$ — коэффициент сопротивления.

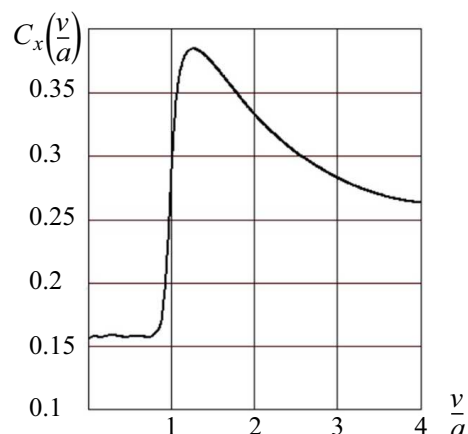


Рис. 1. $C_x(M)$ по закону сопротивления 1943 г.

Fig. 1. $C_x(M)$ according to the law of resistance of 1943

В авторской программе моделирования полета пули система (1) решается интегрированием с шагом 0.2 м методом Рунге – Кутты [13] и позволяет изменять и проверять все параметры на каждом цикле. Тип оружия (например, АК74, РПК74, АКМ, ПКМ, СВД) и боеприпаса (рассматриваются только пули со стальным сердечником) определяют начальную скорость v_0 и БК пули c_{43} , установки прицела — угол бросания θ_0 . Однако даже в [15] приводятся данные, которые подчеркивают хотя и незначительное (+2% для пули патрона типа 5.45×39 мм и –3% для пули патрона типа 7.62×54 мм на дистанции от 50 до 1000 м), но изменение БК пули по траектории (к сожалению, не указан БК в начале траектории, поэтому нет априорной информации даже о характере изменений).

Баллистический коэффициент c_{43} описывает форму пули, ее геометрию и вес: $c_{43} = i_{43} \frac{d^2}{q}$, где d — диаметр миделева сечения пули (м), q — масса пули (кг), i_{43} — коэффициент формы (типичное значение 0.8, ..., 1.4 определяется экспериментально, в общем случае зависит от v и θ_0 [21–23]). Исследования заключаются в экспериментальном подборе i_{43} (фактически c_{43}) в авторской программе моделирования баллистики (обратная задача внешней баллистики), добиваясь соответствия табличным значениям [15] главных параметров баллистики для решения стрелковой «задачи встречи»: времени подлета пули к рубежам дальности (частично учитывая еще и скорость подлета) и превышения траектории на нисходящем участке (с погрешностью таблиц) для типичных образцов стрелкового вооружения (АК74, РПК74, АКМ, ПКМ, СВД). В данной статье приводятся исследования только по пуле СВД — патрон типа 7.62×54 мм (вес пули со стальным сердечником 9.6 г, дульная энергия пули 337 кгм, начальная скорость 830 м/сек, угол вылета равен 0).

Таблицы [15] составлены для стандартных погодных условий (+15°C тепла, давление 760 мм р.с.) и не отличаются высокой точностью представления важных данных: время подлета к рубежу ± 0.005 с, угол бросания $\pm 0.5'$, скорость на рубеже ± 0.5 м/с и превышение по траектории от ± 0.5 см (до 400 м) до ± 5 см (от 500 м). Так, допуск на значение времени ± 0.005 с в случае движущейся мишени 2–3 м/с дает возможную погрешность координат ± 1 –1.5 см, что приемлемо для стрелкового тренажера, а допуск превышений траектории ± 5 см уже может привести к фиксации промаха. Также в таблицах [15] указана высота в вершине траектории над горизонтом оружия (рис. 2), а превышения по траектории указаны над горизонтальной линией прицеливания (глаз–прорезь–мушка–цель, рис. 2) при нулевом угле места цели, и получается, что в начале траектории в точке вылета $y_0 \approx -5.1$ см (высота мушки над дульным срезом СВД, таблицы [15] составлены для механического прицела), и этот момент иногда игнорируется в исследовательских статьях или учет не прописан явно.

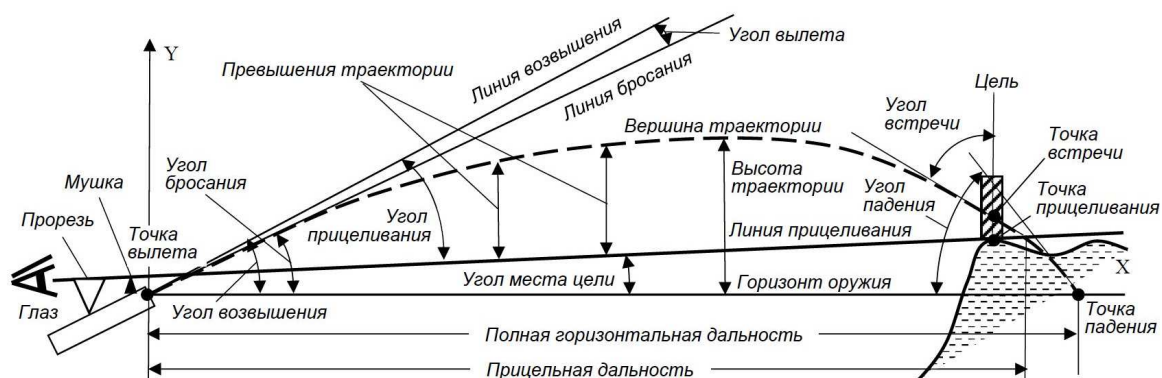


Рис. 2. Основные параметры баллистической траектории
Fig. 2. Basic parameters of the ballistic trajectory



2. Оценка значений переменного баллистического коэффициента в зависимости от угла бросания

В работе [22] сделана попытка выявить зависимость значения БК от дальности для СВД (что в принципе эквивалентно зависимости от скорости или от времени для стандартных условий) с учетом соответствия табличным данным [15] только углов бросания и падения, времени полета и скорости в точке встречи и высоты лишь в вершине траектории. По результатам анализа этой зависимости был установлен колебательный характер БК(x) с пиками на 100, 500, 900 и 1100 м. Кроме этого, в [22] проведена проверка отклонений (в % от табличного) превышений баллистической траектории при стрельбе на прицельную дальность 600 м через каждые 100 м. Полученные рассогласования, особенно на 500 м (12.85%, что соответствует ≈ 10 см) не могут удовлетворить требованиям к стрелковым тренажерам, так как реальная стрельба осуществляется с приблизительным положением прицела, поражение мишени чаще всего происходит на нисходящей траектории до дальности прицела, и пули не должны перелетать мишень из-за систематического рассогласования превышений (фактически это ошибка, даже несмотря на учет случайного рассеивания пуль). В связи с этим и появилась необходимость проводить настоящие исследования для повышения точности моделирования траектории с выявлением зависимости БК от других параметров математической модели, в качестве одного из которых выбран начальный угол бросания.

Методика подбора баллистического коэффициента в зависимости от начального угла бросания (фактически установок прицела), опираясь на эталонные данные [15], считает безусловным приоритетом нулевое превышение на дальности прицела с одновременным выдерживанием допуска превышения на предыдущей дальности нисходящего участка траектории (± 0.5 см или ± 5.0 см), оставаясь при этом в приемлемом допуске полному времени полета для заданной дальности времени подлета к дальности (± 0.01 с, соответствует погрешности расчета координат не более $\pm 2-3$ см, для больших дальностей допустимо ± 0.02 с, или $\pm 4-6$ см), и состоит из следующих этапов:

1) для каждого значения установок прицела стрелкового оружия подбираем БК (± 0.01), в первую очередь, по полному времени полета для заданной дальности времени подлета к его рубежу (не более ± 0.005 с изначально), далее выставляем угол бросания ($\pm 1''$), добиваясь нулевого (± 0.33 см) превышения на дальности прицела;

2) проверяем высоту траектории, рассогласование превышения на предыдущей дистанции с табличным (-50 до 500 м и -100 от 600 м) не должно быть больше ее допуска: ± 0.5 см (до 400–500 м) или ± 5.0 см (от 500–600 м);

3) если рассогласование превышения превышает допуск в большую сторону (вверх чаще всего), повторяем цикл, уменьшая БК, но не позволяем полному времени полета пули существенно выйти за расширенный допуск (не более $\pm 0.01, \dots, 0.02$ с): увеличивая БК, мы делаем траекторию более крутой и увеличиваем полное время полета пули, а уменьшая — делаем траекторию более полой и уменьшаем время.

Таким образом, наиболее приоритетным в предложенной методике подбора БК(θ_0) является соответствие допуску превышения на дистанции установок прицела, далее превышение на предыдущем рубеже, затем полное время полета, и последним в порядке приоритетности является проверочное превышение на следующем после прицела рубеже. Соответствие таблиц с допуском значений угла бросания, угла падения, скорости на рубеже и высоты траектории для моделирования баллистики



в стрелковом тренажере решению реалистичной «задачи встречи» принципиального значения не имеет (особенно учитывая обязательное случайное рассеивание пули). По методике рассчитаны значения переменного БК (θ_0) для пули СВД (патрон типа 7.62 × 54мм) с проверкой полного времени полета пули и превышения по всей траектории, результаты приведены в табл. 1–3.

Таблица 1 / Table 1

Оценка точности расчета траектории при использовании значений переменного БК(θ_0) для прицельных дальностей 100–300 м
 Estimation of the accuracy of trajectory calculation when using values of variable BC(θ_0) for sighting ranges of 100–300 m

Прицел – θ_0	БК	t , мс	Рассогласование на различных дальностях рассчитанного превышения траектории с эталонным значением, см							
			50 м	100 м	150 м	200 м	250 м	300 м	350 м	400 м
1 – 264''	8.99	128.5	–0.56	–0.20	–14.00	–	–	–	–	–
2 – 390''	7.07	266.9	–0.50	+0.20	+0.49	–0.00	+0.10	+0.12	–	–
3 – 565''	6.21	415.0	–1.25	–1.27	–0.65	–0.50	+0.45	–0.20	0.00	+1.24

Таблица 2 / Table 2

Оценка точности расчета траектории при использовании значений переменного БК(θ_0) для прицельных дальностей 400–700 м
 Estimation of the accuracy of trajectory calculation when using values of variable BC(θ_0) for sighting ranges of 400–700 m

Прицел – θ_0	БК	t , с	Рассогласование на различных дальностях рассчитанного превышения траектории с эталонным значением, см								
			100 м	200 м	300 м	400 м	500 м	600 м	700 м	800 м	900 м
4 – 799''	6.59	589.4	–0.90	–0.0	–0.15	0.0	+0.2	–	–	–	–
5 – 1052''	6.37	0.7723	–1.74	–1.4	+0.20	+0.6	0.0	+4.7	–	–	–
6 – 1361''	6.39	0.9827	–2.70	–2.4	–4.10	–0.6	+4.5	0.0	+6.8	+32.0	–
7 – 1717''	6.35	1.2149	–2.40	–0.9	–3.00	–10.3	+1.4	+4.7	0.0	+4.4	+22.3

Таблица 3 / Table 3

Оценка точности расчета траектории при использовании значений переменного БК(θ_0) для прицельных дальностей 800–1300 м
 Estimation of the accuracy of trajectory calculation when using values of variable BC(θ_0) for sighting ranges of 800–1300 m

Прицел – θ_0	БК	t , с	Рассогласование на различных дальностях рассчитанного превышения траектории с эталонным значением, см						
			200 м	400 м	600 м	800 м	1000 м	1200 м	1400 м
8 – 2170''	6.45	1.4902	–7.0	–3.1	–6.6	0.0	+3.3	–	–
9 – 2696''	6.47	1.7903	+4.0	–1.3	–4.2	+2.0	–6.0	–	–
10 – 3288''	6.43	2.1050	+1.4	–6.2	–10.7	+5.5	0.0	+25.5	–
11 – 4019''	6.48	2.4564	+2.3	+5.2	+10.4	+4.0	+1.9	–3.2	–
12 – 4824''	6.49	2.8198	+0.3	+1.3	+4.2	+25.2	–0.4	0.0	–19.0
13 – 5674''	6.45	3.1883	+2.8	–3.5	+2.8	+8.8	+1.3	+3.2	–0.4



В табл. 4 сведены результаты проверки траектории пули СВД на прицельной дальности 600 м с разными подходами к использованию значения БК из приведенных источников по расхождению превышения для сравнительного анализа.

Таблица 4 / Table 4

Параметры траектории пули СВД при константном БК, БК(x), БК(θ_0)
Parameters of the trajectory of the SVD bullet at constants BC, BC(x), BC(θ_0)

Дальность, м / θ_0	100	200	300	400	500	600/23'	700	800
Постоянный c_{43} по [14]	6.52	6.52	6.52	6.52	6.52	6.52/22'55"	6.52	6.52
РасхождениеС, %	-3.6	-1.2	-2.7	+2.0	+8.4	-	+3.2	+7.3
$c_{43}(x)$ по [22]	20.48	10.24	6.854	6.913	7.231	6.841/23'	6.683	6.569
РасхождениеХ, %	5.89	4.43	1.75	6.27	12.85	-	-	-
$c_{43}(\theta_0)$	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39/22'41"	6.39	6.39
РасхождениеУ, %	-4.8	-2.5	-3.4	-0.5	+6.4	-	+5.2	+9.4

Анализ данных табл. 4 показал, что константное значение БК, используемое в математической модели стрелкового тренажера «Ингибитор» [14], обеспечивает даже лучшее соответствие эталонной траектории (РасхождениеС), чем в работе [22] с использованием переменного по дальности БК(x) (РасхождениеХ), и укладывается в пределы допуска (± 5 см). Испытание же предложенного БК(θ_0) показало, что отклонение нисходящей траектории (РасхождениеУ) также укладывается в допуск (-0.5% , $+6.4\%$, 0% , $+5.2\%$) и лучше предыдущих вариантов, но имеет несколько худшие результаты на восходящем участке траектории. Таким образом, базовая математическая модель внешней баллистики (1), теоретически представленная в [20], вполне обоснованно использует константное значение БК [13, 14], так как проведенные исследования показали лишь незначительное улучшение траекторных характеристик при переменном БК, к тому же достигаемое лишь на самом ключевом ее участке. Но современные вычислительные средства вполне позволяют без ущерба для производительности реализовать баллистическое моделирование в реальном времени для десятка рабочих мест тренажера и с переменным БК, поэтому исследования для более точного моделирования траектории пули необходимо продолжать.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Хотя результаты моделирования с постоянным БК показали соответствующую ТТЗ на создание тренажера погрешность [13, 14], но нисходящая траектория систематически несколько завышена, а восходящая занижена. В связи с этим актуальны дальнейшие исследования по выявлению зависимостей переменного БК.

2. Попытки [22] использовать зависимый от текущей дальности БК(x) показали как колебательный характер изменения БК(x), так и неустойчивую погрешность расчета, связанную, вероятно, с недостаточной точностью эталонных таблиц и опорой только на высоту траектории, что не позволяет рекомендовать данный подход в подобном виде в стрелковых тренажерах.

3. Результаты моделирования баллистики с зависимым от установок прицела БК(θ_0) показали меньшую погрешность по всей баллистической траектории при минимальном усложнении только инициализации начальных значений расчета, что позволяет использовать разработанное ПО баллистики в современных стрелковых тренажерах.



4. Если считать приоритетным при моделировании траектории пули в стрелковом тренажере только ее превышение на нисходящем участке, игнорируя высокую точность времени подлета, то достаточно использования $BK(\theta_0)$, что дает на 25% меньшую погрешность на этом участке, чем при использовании постоянного значения BK .

5. Целесообразно провести исследования $BK(\theta_0)$ с зависимостью от текущего углового положения вектора скорости, который априорно из-за прецессии пули оказывает существенное влияние на изменение лобового сопротивления воздуха и от начальной скорости.

Таким образом, хотя константное значение баллистического коэффициента является обоснованным допущением математической модели внешней баллистики, необходимо стремиться к улучшению точности моделирования баллистической траектории. Исследование возможных путей повышения точности может быть целесообразно при соответствующих требованиях ТТЗ.

Список литературы

1. *Munoz J. E., Pope A. T., Velez L. E.* Integrating biocybernetic adaptation in virtual reality training concentration and calmness in target shooting // *Physiological Computing Systems*. Cham : Springer, 2019. P. 218–237. (Lecture Notes in Computer Science, vol. 10057). https://doi.org/10.1007/978-3-030-27950-9_12
2. *Labr M., Hagara L.* Using open source on multiparametric measuring system of shooting // 2019 International Conference on Military Technologies (ICMT). Brno, Czech Republic, 2019. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/MILTECHS.2019.8870093>
3. *Bogatynov D., Lameski P., Trajkovic V.* Firearms training simulator based on low cost motion tracking sensor // *Multimedia Tools and Applications*. 2017. Vol. 76, iss. 1. P. 1403–1418. <https://doi.org/10.1007/s11042-015-3118-z>
4. *Gudzbeler G., Struniawski J.* Functional assumptions of «Virtual system to improve shooting training and intervention tactics of services responsible for security» (VirtPol) // *Conference on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments (Wilga, Poland)*. 2017. Vol. 10445, Art. 104456M. 6 p. <https://doi.org/10.1117/12.2281622>
5. *Gudzbeler G., Struniawski J.* Methodology of shooting training using modern IT techniques // *Conference on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments (Wilga, Poland)*. 2017. Vol. 10445, Art. 104456L. 6 p. <https://doi.org/10.1117/12.2281618>
6. *Fan Y. C., Wen C. Y.* A virtual reality soldier simulator with body area networks for team training // *Sensors*. 2019. Vol. 19, iss. 3. Art. 451. <https://doi.org/10.3390/s19030451>
7. *de Armas C., Tori R., Netto A. V.* Use of virtual reality simulators for training programs in the areas of security and defense: A systematic review // *Multimedia Tools and Applications*. 2020. Vol. 79. P. 3495–3515. <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08141-8>
8. *Fedaravicius A., Pilkauskas K., Slizys E., Survila A.* Research and development of training pistols for laser shooting simulation system // *Defence Technology*. 2020. Vol. 16, iss. 3. P. 530–534. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.06.018>
9. *Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek M., Palka N.* Optoelectronic tracking system for shooting simulator — tests in a virtual reality application // *Photonics Letters of Poland*. 2020. Vol. 12, iss. 2. P. 61–63. <https://doi.org/10.4302/plp.v12i2.1025>
10. *Taylor P., Piszczek M., Pomianek M., Palka N.* Dispatch priming and the police decision to use deadly force // *Police Quarterly*. 2020. Vol. 23, iss. 3. P. 311–332. <https://doi.org/10.1177/1098611119896653>
11. *Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek M., Palka N.* Design and evaluation of a



- SteamVR tracker for training applications – simulations and measurements // *Metrology and Measurement Systems*. 2020. Vol. 27, iss. 4. P. 601–614. <https://doi.org/10.24425/mms.2020.134841>
12. Егоров С. Ф. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: функциональная схема программного обеспечения // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2019. Т. 17, № 2. С. 19–29. <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2019-2-19-29>
 13. Егоров С. Ф., Вдовин А. Ю., Шелковников Ю. К. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: программное обеспечение баллистики оружия калибра 5.45 // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2021. Т. 19, № 2. С. 50–61. <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2021-2-50-61>
 14. Егоров С. Ф., Вдовин А. Ю., Коробейникова И. В., Петухов К. Ю., Сяктерев В. Н. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: математическое обеспечение баллистики оружия калибра 7.62 // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2021. Т. 19, № 3. С. 121–133. <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2021-3-121-133>
 15. Таблицы стрельбы по наземным целям из стрелкового оружия калибров 5.45 и 7.62 мм. Москва : Воениздат, 1977. 264 с.
 16. Егоров С. Ф., Казаков В. С., Коробейников В. В. Стрелковый тренажер на общедоступных компонентах // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2011. № 1 (17). С. 182–185. EDN: [NXVFQB](#)
 17. Егоров С. Ф., Коробейников В. В., Казаков В. С. Информационно-измерительные системы оборонного назначения: стрелковые тренажеры и электронные мишени // *Механика и физико-химия гетерогенных сред, наносистем и новых материалов : материалы научных исследований*. Ижевск : Ин-т механики УрО РАН, 2015. С. 328–349. EDN: [ULMFGF](#)
 18. Егоров С. Ф., Шелковников Ю. К., Осипов Н. И., Кизнерцев С. Р., Метелева А. А. Исследование оптико-электронных регистраторов точки прицеливания стрелковых тренажеров // *Проблемы механики и материаловедения. Труды Института механики УрО РАН*. Ижевск : Ин-т механики УрО РАН, 2017. С. 227–248. EDN: [ZFJKKF](#)
 19. Ермолаев С. И., Комаров Л. Б., Чурбанов Е. В. Внешняя баллистика. Ленинград : [б. и.], 1958. 716 с.
 20. Коновалов А. А., Николаев Ю. В. Внешняя баллистика. Ижевск : Изд-во Ин-та прикладной механики УрО РАН, 2003. 192 с.
 21. Гудич И. Г., Козлитин И. А. О расчете баллистических коэффициентов пуль и снарядов // *Электронные информационные системы*. 2015. № 4 (7). С. 81–88. EDN: [VLDHED](#)
 22. Хайков В. Л. Математическая модель внешней баллистики снайперской винтовки Драгунова на основе оценки баллистических коэффициентов по данным таблиц стрельбы // *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*. 2017. № 11–12 (113–114). С. 16–23. EDN: [ZVZGMF](#)
 23. Cherkov I. B., Hurnovych A. V., Lapyts'kyi S. V., Oliarnyk B. O., Trofymenko V. H., Maistrenko O. A. Method of Conversion for the Ballistic Coefficient of Bullets // *Strength of Materials*. 2020. Vol. 52. P. 419–422. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00193-8>

References

1. Munoz J. E., Pope A. T., Velez L. E. Integrating biocybernetic adaptation in virtual reality training concentration and calmness in target shooting. *Physiological Computing Systems. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 10057. Cham, Springer, 2019, pp. 218–237. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27950-9_12
2. Labr M., Hagara L. Using open source on multiparametric measuring system of shooting. *2019 International Conference on Military Technologies (ICMT)*. Brno, Czech Republic, 2019, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/MILTECHS.2019.8870093>



3. Bogatinov D., Lameski P., Trajkovik V. Firearms training simulator based on low cost motion tracking sensor. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, vol. 76, iss. 1, pp. 1403–1418. <https://doi.org/10.1007/s11042-015-3118-z>
4. Gudzbeler G., Struniawski J. Functional assumptions of “Virtual system to improve shooting training and intervention tactics of services responsible for security” (VirtPol). *Conference on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments (Wilga, Poland)*, 2017, vol. 10445, Art. 104456M, 6 p. <https://doi.org/10.1117/12.2281622>
5. Gudzbeler G., Struniawski J. Methodology of shooting training using modern IT techniques. *Conference on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments (Wilga, Poland)*, 2017, vol. 10445, Art. 104456L, 6 p. <https://doi.org/10.1117/12.2281618>
6. Fan Y. C., Wen C. Y. A virtual reality soldier simulator with body area networks for team training. *Sensors*, 2019, vol. 19, iss. 3, Art. 451. <https://doi.org/10.3390/s19030451>
7. de Armas C., Tori R., Netto A. V. Use of virtual reality simulators for training programs in the areas of security and defense: A systematic review. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, vol. 79, pp. 3495–3515. <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08141-8>
8. Fedaravicius A., Pilkauskas K., Slizys E., Survila A. Research and development of training pistols for laser shooting simulation system. *Defence Technology*, 2020, vol. 16, iss. 3, pp. 530–534. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.06.018>
9. Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek M., Palka N. Optoelectronic tracking system for shooting simulator – tests in a virtual reality application. *Photonics Letters of Poland*, 2020, vol. 12, iss. 2, pp. 61–63. <https://doi.org/10.4302/plp.v12i2.1025>
10. Taylor P., Piszczek M., Pomianek M., Palka N. Dispatch priming and the police decision to use deadly force. *Police Quarterly*, 2020, vol. 23, iss. 3, pp. 311–332. <https://doi.org/10.1177/1098611119896653>
11. Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek M., Palka N. Design and evaluation of a SteamVR tracker for training applications – simulations and measurements. *Metrology and Measurement Systems*, 2020, vol. 27, iss. 4, pp. 601–614. <https://doi.org/10.24425/mms.2020.134841>
12. Egorov S. F. Shooting simulator “Inhibitor”: functional scheme of the software. *Intelligent Systems in Manufacturing*, 2019, vol. 17, iss. 2, pp. 19–29 (in Russian). <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2019-2-19-29>
13. Egorov S. F., Vdovin A. Yu., Shelkovnikov Yu. K. Shooting simulator “Inhibitor”: Ballistics software for 5.45 caliber weapons. *Intelligent Systems in Manufacturing*, 2021, vol. 19, iss. 2, pp. 50–61 (in Russian). <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2021-2-50-61>
14. Egorov S. F., Vdovin A. Yu., Korobeinikova I. V., Petukhov K. Yu., Siakterev V. N. Shooting simulator “Inhibitor”: Mathematical support for ballistics of 7.62 caliber weapons. *Intelligent Systems in Manufacturing*, 2021, vol. 19, iss. 3, pp. 121–133 (in Russian). <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2021-3-121-133>
15. *Tablitsy strel'by po nazemnym tselyam iz strelkovogo oruzhiya kalibrov 5.45 i 7.62 mm* [Tables of Shooting at Ground Targets with Small Srms of 5.45 and 7.62 mm Calibers]. Moscow, Voenizdat, 1977. 264 p. (in Russian).
16. Egorov S. F., Kazakov V. S., Korobeinikov V. V. Shooting simulator based on publicly available components. *Intelligent Systems in Manufacturing*, 2011, iss. 1 (17), pp. 182–185 (in Russian). EDN: **NXVFQB**
17. Egorov S. F., Korobeinikov V. V., Kazakov V. S. Information-measuring systems for defense purposes: shooting simulators and electronic targets. *Mekhanika i fiziko-khimiya geterogennykh sred, nanosistem i novykh materialov* [Mechanics and Physico-chemistry of Heterogeneous Media, Nanosystems and New Materials]: Materials of Scientific Research.



- Izhevsk, Institute of Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2015, pp. 328–349 (in Russian). EDN: [ULMFGF](#)
18. Egorov S. F., Shelkovnikov Yu. K., Osipov N. I., Kiznertsev S. R., Meteleva A. A. Research of optical-electronic recorders of the aiming point of shooting simulators. *Problemy mekhaniki i materialovedeniia. Trudy Instituta mekhaniki UrO RAN* [Problems of Mechanics and Materials Science. Proceedings of the Institute of Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences]. Izhevsk, Institute of Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2017, pp. 227–248. EDN: [ZFJKKF](#)
 19. Ermolaev S. I., Komarov L. B., Churbanov E. V. *Vneshnjaja ballistika* [External Ballistic]. Leningrad, 1958. 716 p. (in Russian).
 20. Konovalov A. A., Nikolaev Yu. V. *Vneshnjaja ballistika* [External Ballistic]. Izhevsk, Institute of Applied Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2003. 192 p. (in Russian).
 21. Gudich I. G., Kozlitsin I. A. On the calculation of ballistic coefficients of bullets and shells. *Elektronnyye informatsionnyye sistemy* [Electronic Information Systems], 2015, iss. 4 (7), pp. 81–88. EDN: [VLDHED](#)
 22. Khaikov V. L. Mathematical model of external ballistics of a Dragunov sniper rifle based on the evaluation of ballistic coefficients according to the shooting tables. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Issues of Defense Technology. Series 16: Technical Means of Countering Terrorism], 2017, iss. 11–12 (113–114), pp. 16–23 (in Russian). EDN: [ZVZGMF](#)
 23. Chepkov I. B., Hurnovych A. V., Lapyts'kyi S. V., Oliiarnyk B. O., Trofymenko V. H., Maistrenko O. A. Method of conversion for the ballistic coefficient of bullets. *Strength of Materials*, 2020, vol. 52, pp. 419–422. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00193-8>

Поступила в редакцию / Received 12.05.2022

Принята к публикации / Accepted 18.11.2022

Опубликована / Published 31.05.2023