

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-344-357

Семейство электронных стрелковых тренажёров «СТрИж»: вычислительная оптимизация моделирования баллистической траектории

С.Ф. Егоров

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

Поступила 12.03.2025

Принята к печати 10.10.2025

Разработка стрелковых электронных тренажёров (т.е. для ручного оружия и не использующих боеприпасы) является важной задачей, т. к. производство любого вида стрелкового вооружения требует также производства тренажёра для привития навыков прицеливания и стрельбы. Целью данной работы являлась вычислительная оптимизация моделирования баллистической траектории с учётом внешних условий (температуры, давления, ветра) и с упрощениями для различных уровней реализации стрелковых тренажёров семейства «СТрИж». Проведён анализ вычислительной эффективности алгоритмов расчёта внешней баллистики. Данный анализ проводился с целью решения «задачи встречи» пули с препятствием (местными предметами, мишенями или рельефом) с учётом всех внешних факторов для разрабатываемого семейства общедоступных стрелковых тренажёров «СТрИж» (включающего начальный, базовый и виртуальные уровни реализации). При решении «задачи встречи» оружейного боеприпаса имитатора оружия с элементом виртуальной мишенной обстановки (рельефом, местным предметом, целью) просчитывалась баллистическая траектория после каждого выстрела с шагом 0,5–1 м. При этом учитывались все типы боеприпасов, атмосферные факторы (температура, давление, ветер), углы места цели и курса. Синхронно с эволюцией мишенной обстановки решалась задача пересечения баллистической траектории с поверхностью стрельбища, мишенями или местными предметами. Кроме фиксации попадания, регистрировался близкий промах и время обстрела цели для последующей оценки. Для оптимизации быстродействия процесса моделирования баллистической кривой предложена её аппроксимация полиномом помимо классического интегрирования дифференциальных уравнений. Исследования на погрешность представления баллистической траектории по сравнению с эталонными таблицами показали соответствие требованиям на самом важном нисходящем участке траектории в пределах точности самих таблиц ± 5 см, а на малых прицелах $\pm 1,5$ см. Исследования на быстродействие алгоритмов различных моделей баллистики выявили соответствие методов разным уровням реализации тренажёров: начальному, базовому или виртуальному по ресурсоёмкости. Сделан вывод о перспективности дальнейших исследований и разработке семейства электронных стрелковых тренажёров благодаря совершенствованию вычислительных средств и развитию программных библиотек с целью расширения функциональных возможностей тренажёров и снижения их себестоимости и, значит, повышения конкурентоспособности.

Ключевые слова: стрелковый тренажёр, математическая модель баллистики, полиномиальная модель, баллистический коэффициент, угол бросания

Адрес для переписки:

Егоров С.Ф.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия
e-mail: stos.mitm@mail.ru

Address for correspondence:

Egorov S.F.
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
e-mail: stos.mitm@mail.ru

Для цитирования:

С.Ф. Егоров.
Семейство электронных стрелковых тренажёров «СТрИж»:
вычислительная оптимизация моделирования
баллистической траектории.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 4. С. 344–357.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-344-357

For citation:

Egorov SF.
Electronic Shooting Simulator Family "STrIzh": Computational
Optimization of Ballistic Trajectory Modeling.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(4):344–357. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-344-357

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-344-357

Electronic Shooting Simulator Family "STrIzh": Computational Optimization of Ballistic Trajectory Modeling

S.F. Egorov

Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia

Received 12.03.2025

Accepted for publication 10.10.2025

Abstract

Development of shooting electronic simulators (i.e. for hand weapons and without use ammunition) is an important task since the production of any type of small arms also requires the production of a simulator to instill aiming and shooting skills. Purpose of this work was to computationally optimize the ballistic trajectory modeling taking into account external conditions (temperature, pressure, wind) and with simplifications for various levels of the STrIzh family shooting simulators implementation. An analysis of the calculating external ballistics' algorithms computational efficiency. This analysis was carried out in order to solve the "problem of bullet meeting" with an obstacle (local objects, targets or relief), taking into account all external factors for the developed family of publicly available shooting simulators "STrIzh" (including the initial, basic and virtual levels of implementation). When solving the "problem of meeting" a weapon ammunition of a weapon simulator with an element of a virtual target situation (relief, local object, target), a ballistic trajectory was calculated after each shot with a step of 0.5–1 m. In this case all types of ammunition, atmospheric factors (temperature, pressure, wind), angles of the target and course were taken into account. Synchronously with the evolution of the target situation, the problem of intersection of the ballistic trajectory with the surface of the shooting range, targets or local objects was solved. In addition to fixing the hit, a close miss and the time of shelling the target were recorded for subsequent assessment. To optimize the speed of the ballistic curve modeling process, its polynomial approximation was proposed in addition to the classical integration of differential equations. Studies on the error in representing the ballistic trajectory compared to the reference tables showed compliance with the requirements on the most important descending section of the trajectory within the accuracy of the above tables ± 5 cm, and on small sights ± 1.5 cm. Studies of various ballistics models' algorithms performance revealed compliance with different levels of simulator implementation: initial, basic or virtual in terms of resource intensity. It was concluded that development of a family of electronic shooting simulators will be promising due to the improvement of computing tools and development of software libraries in order expanding the functionality of the simulators and reducing their cost and, therefore, increasing competitiveness.

Keywords: shooting simulator, mathematical ballistics model, polynomial model, ballistic coefficient, throwing angle

Адрес для переписки:

Егоров С.Ф.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия
e-mail: stos.mitm@mail.ru

Address for correspondence:

Egorov S.F.
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
e-mail: stos.mitm@mail.ru

Для цитирования:

С.Ф. Егоров.
Семейство электронных стрелковых тренажёров «СТрИж»:
вычислительная оптимизация моделирования
баллистической траектории.
2025. Т. 16. № 4. С. 344–357.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-344-357

For citation:

Egorov SF.
Electronic Shooting Simulator Family "STrIzh": Computational
Optimization of Ballistic Trajectory Modeling.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(4):344–357. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-344-357

Введение

Разработка стрелковых электронных тренажёров (т. е. для ручного оружия и не использующих боеприпасы) является важной задачей, т. к. производство любого вида стрелкового вооружения, согласно нормативным документам, требует также производства тренажёра для привития навыков прицеливания и стрельбы. Электронный стрелковый тренажёр (СТ), безусловно, обладает большими функциональными возможностями и благодаря постоянному совершенствованию и удешевлению общедоступных электронных вычислительных компонент оптимизация моделирования баллистической траектории для широкого использования является актуальной задачей, обладающей практической ценностью (особенно на первоначальном этапе обучения стрельбе для постановки правильной стойки, хвата, дыхания, удержания оружия, прицеливания, производства плавного спуска курка) [1–11].

С учётом опыта разработки, модификации и внедрения профессионального СТ «Ингибитор» (индекс 1У33) проводится разработка и исследования по общедоступному семейству СТ «СТрИж» [12] с начальным, базовым и виртуальным уровнями реализации. Возможность самостоятельно собрать стрелковый тренажёр из общедоступных компонент (ноутбук, веб-камера, макеты оружия, ИК-светодиоды, проектор, лазерные излучатели, HD-камера, виртуальные шлемы, смартфоны) должна способствовать их широкому использованию. Разработка опирается в первую очередь на опыт моделирования сверхзвуковой, дозвуковой и реактивной баллистики и решении «задачи встречи» в профессиональном СТ [13].

Требования типичного тактико-технического задания, например, как в [14],

к решению баллистической «задачи встречи» профессионального стрелкового тренажёра сводятся к определению точек попадания в мишени или элементы стрельбища с учётом баллистики имитаторов оружия (ИО) с разными прицелами и боеприпасами со случайным рассеиванием, разнообразием метеоусловий (температура, давление, ветер), углами места цели и курса (т. е. по точкам прицеливания (ТПр) по всему полю регистрации). Задача была решена на базе интегрирования методом Рунге–Кутты системы дифференциальных уравнений [15] от дальности с шагом 0,1–0,2 м [13]. Но для разрабатываемого семейства общедоступных СТ «СТрИж» возможно использовать некоторые допустимые упрощения.

Целью данной работы являлась вычислительная оптимизация моделирования баллистической траектории с учётом внешних условий (температуры, давления, ветра) и с упрощениями для различных уровней реализации СТ семейства «СТрИж». Из цели исследований формулировались задачи: выбор упрощений математических моделей баллистики для разных уровней реализации семейства СТ (начальный, базовый, виртуальный), проверка погрешностей, вызванных упрощениями, анализ скорости расчёта баллистической траектории.

Математическая модель внешней баллистики

Исходя из действия на пулю первоначального импульса выстрела (внутренней баллистики), силы тяжести и сопротивления воздуха (нелинейного на сверхзвуковой скорости) получены три модели внешней баллистики [15] на базе системы дифференциальных уравнений по разным параметрам – дальности (dx), времени (dt), углу вектора скорости ($d\theta$):

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dx} &= -c_1 \Delta(y) v C_x \left(\frac{v}{a_c} \right); \quad \frac{d\gamma}{dx} = -\frac{g}{u^2}; \quad \frac{dy}{dx} = \gamma = \operatorname{tg}(\gamma); \quad \frac{dt}{dx} = \frac{1}{u}; \quad v = u \sqrt{1 + \gamma^2}; \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dt} &= -c_1 \Delta(y) v^2 C_x \left(\frac{v}{a_c} \right) \cos(\theta); \quad \frac{d\theta}{dt} = -\frac{g \cos(\theta)}{v}; \quad \frac{dx}{dt} = u = v \cos(\theta); \quad \frac{dy}{dt} = w = v \sin(\theta); \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{d\theta} &= \frac{1}{g} c_1 \Delta(y) v^3 C_x \left(\frac{v}{a_c} \right); \quad \frac{dx}{d\theta} = -\frac{v^2}{g}; \quad \frac{dy}{d\theta} = -\frac{v^2}{g} \operatorname{tg}(\theta); \quad \frac{dt}{d\theta} = -\frac{v}{g \cos(\theta)}; \quad v = \frac{u}{\cos(\theta)}; \end{aligned} \right\}$$

где x, y, z – координаты центра массы пули базовой математической модели (y – возвыше-

ние траектории над линией прицеливания; y_0 – начальная высота траектории над линией

прицеливания «целик-мушка»); t – время движения пули по траектории; u – проекция скорости v на ось X ; $y = \operatorname{tg} \theta$ – тангенс угла θ вектора скорости; c_1 – коэффициент сопротивления ($c_1 = 0,00048104c$, где c – баллистический коэффициент [15], зависит от веса и формы пули); a – скорость звука ($a_c = 340,4$ м/с); Δy – коэффициент изменения сопротивления воздуха по высоте траектории: $\Delta(y) = \frac{20000 - (y - y_0)}{20000 + (y - y_0)}$ (эмпирическая формула Венчинкина); $C_x(v/a)$ – лобовое сопротивление воздуха по закону 1943 года [15] от числа Маха; g – ускорение свободного падения ($9,815$ м/с²).

Важной характеристикой пули является баллистический коэффициент c : $c = i_{43} \frac{d^2}{q} 1000$, где d – калибр пули (м); q – вес пули (кг); i_{43} – коэффициент формы (типично 0,8–1,4; определяется экспериментально). Для пули автомата Калашникова (АК74) со стальным сердечником калибра 5,45 и весом 3,4 г $c \approx 8,65$ м²/кг [13].

Простой анализ моделей (1) на используемые вычислительные функции показывает, что система от дальности (dx) обладает самой низкой вычислительной сложностью, от использования радикала ($\sqrt{}$) для расчёта текущей скорости пули при настильных траекториях можно отказаться, заменив v на её проекцию u в $uC_x(u/a)$ и принять $\Delta(y) = 1$. Когда, как в моделях от времени (dt)

и от угла вектора скорости ($d\theta$), в цикле используются ресурсоёмкие тригонометрические функции, что делает их менее пригодными для вычислительной оптимизации в реальном времени на встроенных системах расчёта баллистики. Также возможно, опираясь на принцип «жёсткости» траектории для настильных траекторий, когда угол места цели меньше 8° ($\cos(8^\circ) = 0,99$; $\operatorname{tg}(8^\circ) = 0,14$ и $\sqrt{1 + \operatorname{tg}(8^\circ)^2} = 1,068$, когда как на прицеле 10 АК74 угол бросания θ_0 лишь $67' \approx 1,1^\circ$), использовать аппроксимацию баллистической траектории полиномом, что приемлемо, например, для СТ начального уровня.

Особенностью моделирования внешней баллистики в стрелковых тренажёрах является гибкость любых параметров дифференциальной модели (1): для углов бросания θ_0 не требуется использовать табличные значения по прицелам из наставлений на ИО, критерием точности моделирования является только эталонная таблица превышений траектории над линией прицеливания от дальности и показаний прицела (с приоритетом нисходящей ветви) и время долёта до рубежей дальности прицела (например, для АК74 (таблицы 1, 2)). Также возможно использовать и переменное значение баллистического коэффициента c , например, от дальности (времени) или скорости (угла вектора), но эффективность такого подхода не доказана [16].

Таблица 1 / Table 1

Параметры траектории АК74 от дальности
Trajectory parameters AK74 from range

Дальность / Range	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
Прицел / Sight	превышение траектории линии прицеливания, см exceeding of targeting line trajectory, cm											
1	0	0	-3	-10								
2	3	5	5	0	-10	-25						
3	6	13	17	16	11	0	-17	-43				
4	11	24	33	38	37	32	20	0	-27	-65		
5	18	37	53	64	70	71	65	52	31	0	-42	-98
Дальность / Range	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Прицел / Sight	превышения траектории линии прицеливания, м exceeding of targeting line trajectory, m											
6	0.54	0.97	1.2	1.2	0.82	0	-1.5	-3.7				
7	0.75	1.4	1.8	2.0	1.9	1.3	0	-2.1	-5.2			
8	1.0	1.9	2.7	3.1	3.2	2.9	1.9	0	-2.9	-7.0		
9	1.4	2.2	3.6	4.4	4.8	4.8	4.1	2.6	0	-3.8	-8.9	
10	1.7	3.3	4.8	5.9	6.7	7.1	6.8	5.6	3.4	0	-4.8	-11.1

Вес пули 3,4 г, дульная энергия 140 кгм, начальная скорость 900 м/с, угол вылета минус 4 мин

Weight of the bullet 3.4 g, muzzle energy 140 kgm, initial speed 900 m/s, departure angle minus 4 min

Таблица 2 / Table 2

Параметры рассеивания и поправок на боковой ветер, температуру и давление
Parameters of dispersion and corrections for crosswind, temperature, and pressure

Даль- ность, м	Срединные отклонения рассеивания, см Median dispersion deviations,				Поправки на отклонение на боковой ветер, м Correction for deviation on lateral wind (4 м/с),	Поправки по высоте на температуру, Height cor- rections for temperature / 10°C, м	Поправки по высоте на давление на 10 мм рт ст, Height cor- rections for pressure, / 10 mm Hg, м	Время полета, с Time flight, s
	первых пуль очередей, first bullets turns		последующих пуль очередей, subsequent queue bullets					
	по высоте	боковое	по высоте	боковое				
	by height	side	by height	side				
	Вв ₁	Вб ₁	Вв	Вб				
Range, m	АК74	АК74	АК74	АК74	АК74	АК74	АК74	АК74
100	4	2	3	4	0.03	0	0	0.12
200	8	4	6	8	0.11	0.01	0	0.25
300	12	6	9	12	0.23	0.02	0	0.39
400	16	8	12	16	0.52	0.04	0.01	0.57
500	20	10	15	20	0.87	0.08	0.02	0.77
600	24	12	18	24	1.34	0.16	0.04	1.01
700	29	14	22	28	2.03	0.28	0.07	1.29
800	34	17	26	32	2.86	0.47	0.13	1.60
900	39	20	31	37	3.77	0.73	0.20	1.94
1000	46	23	37	42	4.92	1.07	0.30	2.34

Таким образом, в качестве вычислительной оптимизации рассматриваются допустимость аппроксимации полиномом настильных баллистических траекторий или упрощённое (быстрое, «прямоугольное») интегрирование модели дифференциальных уравнений от дальности с выбором шага интегрирования. Для СТ начального уровня будет использоваться, например, аппроксимационная модель баллистики и имитаторы АК74, ручного пулемёта Калашникова (РПК74) и пистолета Макарова (ПМ). Для СТ базового уровня подойдёт, например, настильная дифференциальная модель баллистики с рассеиванием и с атмосферной коррекцией (температура, ветер) и имитаторами ПМ, АК74, РПК74, ручного противотанкового гранатомета 7 (РПГ-7). А для СТ виртуального уровня рекомендуется полная дифференциальная модель от дальности с простым интегрированием с рассеиванием, с атмосферной коррекцией (температура, давление, ветер) и с углами курса и места цели вплоть до навесных

траекторий, с видами боеприпасов и имитаторами с разными прицелами, включая ещё и гранатомет подствольный (ГП-25), пулемёт Калашникова модернизированный (ПКМ), снайперскую винтовку Драгунова (СВД), например.

Аппроксимационная математическая модель баллистики

Для аппроксимационной модели баллистики АК74 требуется аналитически получать время долёта пули до дальности настильной траектории и аналитически получать возвышения траектории над линией прицеливания. Для этого надо заменить дифференциальную модель регрессионным уравнением (например, полиномом 2–3 степени) для дальности 1000 м (10 прицел) и корректировать тангенсом угла рассогласования превышений при других прицелах исходя из принципа «жёсткости» настильной траектории.

При аппроксимации времён полёта по данным таблицы 1 получено уравнение:
 $t(x) = 0,000001633x^3 + 0,0006543x + 0,038$.

Проверка на рассогласование аппроксимированных времён с эталонными данными показала хорошую точность (таблица 3), учитывая погрешность эталонной таблицы $\pm 0,005$ с.

Для аппроксимации превышения траектории используется часть таблицы 1 для прицела 10 (1000 м), но с добавленными промежуточными значениями на нисходящем участке траектории для повышения их веса в расчёте регрессионных уравнений и для оптимизации

точности аппроксимации именно на рабочем (самом криволинейном) участке баллистической траектории, не забывая, что точность табличных данных ± 5 см (таблица 4, рисунок).

При аппроксимации превышений по данным таблицы 4 получено уравнение:

$$y(x) = -0,00000002703x^3 + 0,00001377x^2 + 0,013x + 0,272.$$

Проверка на рассогласование аппроксимированных превышений траектории с эталонными данными (таблица 1) показала приемлемую точность лишь на прицелах 6–10, особенно на критическом нисходящем участке (таблица 5).

Таблица 3 / Table 3

Погрешность аппроксимации времени полёта до дальностей АК74

Error of approximation of flight time to ranges AK74

Дальность / Range	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Время / Time	рассогласование $t(x)-t_0$ с таблицей 1, с / mismatch $t(x)-t_0$ with Table 1, sec									
$t(x)$	0	-0.016	-0.009	-0.009	+0.003	+0.008	+0.006	+0.007	+0.010	-0.015

Таблица 4 / Table 4

Превышения траекторией линии прицеливания на 10 прицеле АК74

Exceeding the targeting line by the trajectory on 10 sight AK74

Дальность / Range	50	100	200	300	400	500	600	700	750	800	850	900	950	1000	1150	1100	1200
Прицел / Sight	превышение траекторией линии прицеливания, м / exceeding of aiming line by trajectory, m																
10	0.85	1.7	3.3	4.8	5.9	6.7	7.1	6.8	6.3	5.6	4.7	3.4	1.9	0	-2.2	-4.8	-11.1

Таблица 5 / Table 5

Погрешность аппроксимации превышения траектории АК74

Accuracy of approximation of the trajectory AK74 exceeding

Дальность / Range	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Прицел / Sight	рассогласование $y(x)-y_0$ с таблицей 1, см / mismatch $y(x)-y_0$ with Table 1, cm										
10 $-\text{tg}(0.00)x$	-1.8	-9.5	-12.2	+4.1	+13.3	+8.5	+4.1	+3.7	+1.2	+0.2	+4.6
9 $-\text{tg}(0.00380)x$	-9.07	+22.7	-5.9	+2.5	+13.6	+11.1	+8.8	+0.5	0	+1.2	-2.3
8 $-\text{tg}(0.00705)x$	-2.2	-10.3	-13.4	+2.5	+11.1	+6.1	+1.3	0	-2.4	-3.8	
7 $-\text{tg}(0.00997)x$	-4.4	-14.8	-5.0	+3.7	+5.1	+2.9	0	-7.1	-17.2		
6 $-\text{tg}(0.01200)x$	-5.7	-16.4	-11.9	-5.5	+1.5	0	-5.2	-25.5			
5 $-\text{tg}(0.01368)x$	-5.5	-17.0	-13.4	-4.7	0	-2.1					
4 $-\text{tg}(0.01488)x$	-4.5	-15.0	-10.3	0	+4.5						
3 $-\text{tg}(0.01558)x$	-0.5	-7.0	0	+14.3							
2 $-\text{tg}(0.01600)x$	+3.3	0	+13.1								
1 $-\text{tg}(0.01690)x$	0	-7.4									

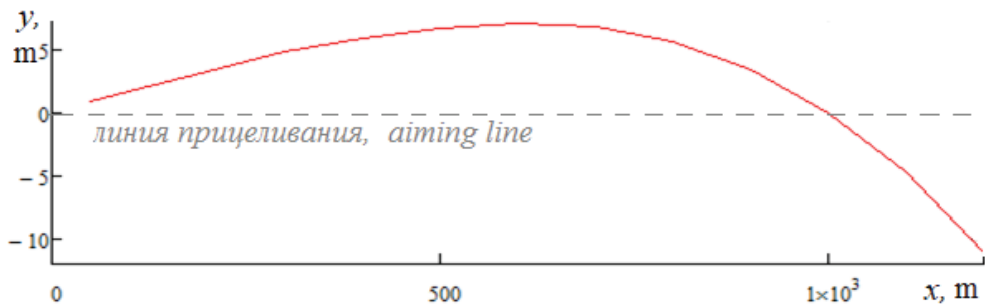


Рисунок – Баллистическая траектория пули автомата Калашникова-74 на прицеле 10, угол бросания 67°

Figure – Ballistic trajectory of the Kalashnikov-74 assault rifle at sight 10, throwing angle 67°

Поэтому пришлось для прицелов 1–5 прицела 5 с шагом 50 м:
использовать отдельную модель по таблице 6 $y_{1-5}(x)=-0,000001315x^3-0,0001552x^2+0,407x-1,091$.

Таблица 6 / Table 6

Превышения траекторией линии прицеливания на 5 прицеле АК74

Exceeding the targeting line by the trajectory on 5 sight AK74

Дальность / Range Прицел / Sight	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
	превышение траекторией линии прицеливания, см											
	exceeding of aiming line by trajectory, cm											
5	18	37	53	64	70	71	65	52	31	0	-42	-98

Проверка на рассогласование аппроксимированных превышений траектории с эталонными данными (таблица 6) показала хорошую точность на прицелах 1–5, учитывая точность этой таблицы $\pm 0,5$ см (таблица 7).

Также аналитически аппроксимируется отклонение от силы бокового ветра W_z и коррекция превышения от температуры T по таблице 2 (влияние давления игнорируется):

$$z(x) = \frac{W_z}{4}(-0,0000000001981x^4 + 0,0000006232x^3 + 0,0000493x^2 + 0,017x + 0,333);$$

$$y'(x) = y(x) + (0,0000002088x^3 - 0,0001367x^2 + 0,038x - 2,706) \frac{(T^c - 15)}{10}.$$

Таблица 7 / Table 7

Погрешность аппроксимации превышения траектории АК74

Accuracy of approximation of the trajectory AK74 exceeding

Дальность / Range Прицел / Sight	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
	рассогласование $y(x)-y_0$ с таблицей 1, см / mismatch $y(x)-y_0$ with Table 1, cm											
6 +tg(-0.16)x	-	-2.1	-	-3.1	-	-0.05	-	-2.7	-	-2.1	-	0
5 -tg(-0.0015)x	+0.8	-0.11	-0.75	-0.11	+0.8	+1.0	+1.5	+1.3	+0.5	0	-0.15	+2.1
4 -tg(0.131)x	+1.1	-0.4	-0.7	-0.8	+0.5	+0	-0.15	0	-1.5	-1.6		
3 -tg(0.2338)x	+0.8	-0.1	-0.7	-0.1	-0.13	+0	-0.4	+0.4				
2 -tg(0.3081)x	-0.2	-0.1	-0.7	-0	+0.85	+1.1						
1 -tg(0.3523)x	+0.3	-0	-0.1	+0.1								

Следует отметить, что аппроксимационная модель от времени лучше вписывается в алгоритм анимации мишенной обстановки, когда её изображение обновляется каждые 1/30 с и модель от времени позволяет получить на каждом цикле по текущему времени выстрела текущую пролетевшую дальность и возвышение пули (т. е. пространственные координаты):

$$y(t) = 0,075 + 15,223t - 9,838t^2 + 1,91t^3 - 0,222t^4;$$

$$x(t) = 1,052 + 885,515t - 393,392t^2 + 116,086t^3 - 13,317t^4.$$

Таким образом, простая аппроксимационная модель баллистической траектории вполне приемлема для СТ начального уровня, где погрешность регистратора точки прицеливания так относительно велика (а это веб-камера, которая фиксирует пятно ИК-излучателя для расчёта ТПр), что вносить в моделируемую баллистическую кривую выстрела обязательное случайное рассеивание пуль нет необходимости (но можно и внести случайной коррекцией ТПр по таблице 2 за вычетом погрешности регистратора ТПр [12]). И особенно актуальна для СТ виртуального уровня с микропроцессором в ИО (описывается в следующих статьях цикла).

Настильная упрощённая дифференциальная математическая модель

Используя вышеупомянутые допущения о настильном характере стрельбы и замене в модели от dx (1) скорости v на её проекцию u ($\cos(\approx 0) \approx 1$), получаем:

$$c, v_0, y_0 - \text{из таблиц ИО}; \theta_0 - \text{из таблиц прицелов};$$

$$dx = 1m; \gamma = \text{tg}(\theta_0);$$

$$T = 0c; x = 0m; u = v_0/\cos(\theta_0 \approx 0); c_1 = 0,00048104c;$$

$$a_c = 340,4 \text{ m/v}; y = y_0;$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dx} &= -c_2 u c_x \left(\frac{u}{a_c} \right); \\ \frac{dt}{dx} &= \frac{1}{u}; \quad \frac{d^2}{dx^2} = -\frac{g}{u^2} = -g \frac{dt}{dx} \frac{dt}{dx}; \\ \frac{dy}{dx} &= {}^3 = \text{tg}(\theta); \\ x &= x + dx; \quad u = u + \frac{du}{dx}; \\ {}^3 &= {}^3 + \frac{d\gamma}{dx}; \quad y = y + \frac{dy}{dx} = y + \gamma; \\ t &= t + \frac{dt}{dx}; \end{aligned} \right\} v = u\sqrt{1+\gamma^2}$$

Коррекция траектории от изменения температуры T ($T_c = 288 \text{ }^\circ\text{K} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$) и давления p ($p_c = 760 \text{ мм рт.ст.}$) осуществляется исходя из закона подобия Ланжевена [15]:

$$x' = x \frac{T}{T_c}; \quad y' = y \frac{T}{T_c}; \quad t' = t \sqrt{\frac{T}{T_c}}; \quad v' = v \sqrt{\frac{T}{T_c}}$$

с инициализацией:

$$c_2 = 0,00048104c \frac{p}{p_c};$$

$$u = v_0(1 + 0,000638(T - T_c))\sqrt{\frac{T_c}{T}} / \cos(\theta_0);$$

все корректирующие коэффициенты в цикле (T/T_c , $\sqrt{T/T_c}$ являются константами для одного выстрела и практически не вносят вклад в снижение вычислительной эффективности расчёта баллистической траектории.

Для поддержки отклонения траектории от ветра и случайного рассеивания вводится боковая координата z (традиционная для баллистики система координат) и ветровая модель от её боковой составляющей W_z [15]. Ветровая модель опирается также на таблицу 2, где указаны эталонные ветровое отклонения. Там же приведены верхние и боковые срединные отклонения B для первого выстрела в очереди и последующих для «лучших» стрелков и пересчитаны в угловые $\Delta\theta$ и $\Delta\psi$ в таблице 8, т. е. верхнее B случайно изменяет угол бросания (координату y), а боковое B случайно изменяет координату z . Учтена в модели и угловая скобапп аппаратной ошибки регистратора точки прицеливания [13], которая вычитается из табличных значений случайного рассеивания:

$$\theta = N(\theta_0, \sqrt{(1,483\Delta\theta_{AK74})^2 - \sigma_{am}^2});$$

$$\psi = N(0, \sqrt{(1,483\Delta\psi_{AK74})^2 - \sigma_{am}^2});$$

$$z' = W_z(t' - \frac{x'}{v_0 \cos(\theta_0)}) + x' \text{tg}(\psi),$$

где $\text{tg}(\psi)$ – также константа, как и $1/v_0 \cos(\theta_0)$; $N(M, \sigma)$ – нормальный закон распределения.

Экспериментальный подбор баллистического коэффициента с осуществляется в программе моделирования баллистики, добываясь соответствия табличным значениям времени подлёта пули к рубежам дальности (таблица 2). Потом в программе подбирается угол бросания θ_i для каждой дальности прицела, добываясь около нулевого возвышения точки попадания

на этой дальности. Критерием точности является минимальная погрешность на всей нисходящей части баллистической траектории (диапазона как минимум -150 м...ТП...+100 м), т. к. установка прицела всегда делается больше реальной дальности до мишени и прицеливание осуществляется «под» мишень и поражение идёт на нисходящем участке баллистической траектории.

Итак, все погрешности упрощённой настильной математической модели с простым интегрированием компенсируются подбором углов бросания АК74 для прицелов П-1000 (П = 440 м, когда превышение траектории меньше высоты грудной мишени 50 см, таблица 8). Модель включает блок инициализации:

c, v_0, y_0, θ_0 – из таблицы 8; $dx = 1\text{ м}$; $y = y_0$; $t = 0\text{ с}$; $x = 0\text{ м}$;

$$\theta = N(\theta_0, \sqrt{(1,483\Delta\theta_{AK74})^2 - \sigma_{am}^2});$$

$$\psi = N(0, \sqrt{(1,483\Delta\psi_{AK74})^2 - \sigma_{am}^2}); \quad \gamma = \text{tg}(\theta);$$

$$c_2 = 0,00048104c \frac{P}{P_c};$$

$$u = v_0(1 + 0,000638(T - T_c))\sqrt{\frac{T_c}{T}} / \cos(\theta_0);$$

$$a_c = 340,4\text{ м / с};$$

и цикл интегрирования с пересчётом корректирующими константами:

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dx} &= -c_2 u C_x \left(\frac{u}{a_c} \right); \\ \frac{dt}{dx} &= \frac{1}{u}; \quad \frac{d\gamma}{dx} = -\frac{g}{u^2} = -g \frac{dt}{dx} \frac{dt}{dx}; \\ \frac{dy}{dx} &= \gamma = \text{tg}(\theta); \\ x &= x + dx; \quad u = u + \frac{du}{dx}; \quad \gamma = \gamma + \frac{d\gamma}{dx}; \\ y &= y + \frac{dy}{dx} = y + \gamma; \quad t = t + \frac{dt}{dx}; \\ x' &= x \frac{T}{T_c}; \quad y' = y \frac{T}{T_c}; \\ t' &= t \sqrt{\frac{T}{T_c}}; \quad v' = u \sqrt{\frac{T}{T_c}}; \\ z' &= W_z(t' - \frac{x'}{v_0 \cos(\theta_0)}) + x' \text{tg}(\psi). \end{aligned} \right\}$$

Проверка превышения траектории и реакции на ветер и температуру показали соответствие требованиям и представлены в таблице 9 (некоторые выбросы за ± 5 см связаны скорее всего с ошибками или упрощениями эталонной таблицы или их округлением на малых значениях).

Таблица 8 / Table 8

Параметры настильной модели баллистики АК74 Ballistics Floor Model Parameters AK74

	v_0 , m/s	c	y_0 , cm	$\theta_{П}$	θ_{100}	θ_{200}	θ_{300}	θ_{400}	θ_{500}	θ_{600}	θ_{700}	θ_{800}	θ_{900}	θ_{1000}	$\Delta\theta$ 1/+, “	$\Delta\psi$ 1/+, “
AK74	900	8.65	-5.1	14'01”	4'00”	6'38”	9'13”	12'44”	17'15”	22'56”	30'10”	39'17”	50'23”	63'29”	85.57 / 63.94	42.28 / 82.51

Таблица 9 / Table 9

Погрешности рассогласования траектории АК74 Trajectory mismatch errors AK74

	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	$W_z = 4\text{ м/с}$	$T = 25^\circ\text{C}$	$T = -15^\circ\text{C}$
	рассогласование $y(x) - y_0$ с таблицами 1–2, см / mismatch $y(x) - y_0$ with Tables 1–2, cm													
10	+2.6	+4.9	-2.8	+3.5	+5.2	-0.1	+0.1	+4.5	+3.6	+0.17	-3.6	-11.5	-11.8	-25
9	-5.6	+38.4	+2/6	+0.7	+4.2	+0.7	+2.7	-1.1	-0.14	-1.7	-13.7	+0.02	-11	-16
8	+2.0	+3.7	-4.6	+1.1	+2.2	-3.6	-3.9	-0.1	-1.5	-5.5		+0.01	-7	-6.7
7	+0.4	+0.5	+5.7	+4.9	-0.6	-3.0	+0,01	-2.6	-10.6			+2	-2	-5
6	+0.3	+1.2	+2.3	+0.3	+1.7	+0.13	+2.1	-11.7				+5	-3.1	-1
5	+0.6	+0.8	+1.1	+1.4	+0	-2.2						+3	-1	-0.4
4	+0.2	+0.1	+0.1	+0.1	-1.6							+1.6	-0.9	+0.7
3	+0.5	+0.7	-0	+0.2								+5.3	-0.7	+1.5
2	+0.1	-0.1	+0.2									+1	-0.7	+1.8
1	+0	+0.3										+0.2	-0	+0.2

Таким образом, несмотря на существенную вычислительную оптимизацию интегрирования дифференциальной модели баллистики (шаг $dx = 1$ м, простое прямоугольное интегрирование, замена скорости её проекцией, что упростило вычисление) погрешность вычисления превышений траектории и отклонения от ветра и колебаний температуры не вышла за точность самой эталонной таблицы и может использоваться в моделировании баллистики даже для профессиональных тренажёров, но только настильных траекторий (без угла места цели).

Полная дифференциальная математическая модель

Для реализации внешней баллистики в СТ виртуальных уровней рекомендуется опираться на используемое в профессиональном СТ «Ингибитор» математическое обеспечение [13, 15], которое учитывает все внешние факторы полной модели баллистики на основе дифференциальных уравнений от дальности с интегрированием методами Рунге–Кутты и Мильна (хотя выше и доказано, что в сложном интегрировании с малым шагом нет необходимости). Деривация (отклонение пули вправо из-за вращения) не реализована в модели и считается, что автоматически компенсируется конструкцией прицелов. В решение «задачи встречи» с препятствиями возможно опираться на [13].

АК74 имеет механический прицел дальности П(440)-100-200-300-400-500-600-700-800-900-1000 и ночной прицел 400-500-600-700-800-900-1000 (линия прицеливания выше), другие ИО могут иметь еще и оптический прицел (и даже с настройкой коррекции ветра, например СВД). Виды боеприпасов АК74 дополнены только трассирующими со стандартными баллистическими характеристиками, но другие ИО могут иметь бронебойно-зажигательные, осколочные и даже «прыгающие» (например, ГП-25). Рассчитанные по ТПр на экране с учётом фиксированного положения стрелка углы места цели и курса изменяют в математической модели углы θ и ψ . Возможно задавать высоту над уровнем моря с пересчётом T и p : $T(y) = T_c - 0,0065y$, где $T_c = 288,15$ °K (15 °C) и линейно до высоты $y = 10$ км; p – давление:

$p(y) = p_c(0,998 - 0,00009275y + 0,000000002692y^2)$, где $p_c = 760$ мм рт. ст. и нелинейно до $y = 10$ км.

Таким образом, полная дифференциальная модель баллистики позволяет учесть все внешние факторы стрельбы и повысить реалистичность стрелковых упражнений для выработки навыков прицеливания и стрельбы в различных условиях, а в качестве оптимизации рекомендуется использовать шаг простого интегрирования не менее $h = 1,0$ м с пересчётом углов бросания прицелов (таблица 8).

Алгоритм баллистической «задачи встречи»

Особенности алгоритма баллистической «задачи встречи» (анализ попадания в мишень, с учётом близкого промаха, в местный предмет, в поверхность стрельбища) СТ [13]:

1. Алгоритм анимации мишенной обстановки, частью которого является моделирование баллистики с «задачей встречи», синхронизируется с регистратором ТПр, а это, например, цифровая камера, выдающая минимум 30 кадров/с, на которых выделяются координаты ИК-излучателей и вычисляется ТПр и текущее время и сохраняются в кольцевом буфере на несколько секунд. По нажатию спускового крючка ИО вычисляется линейно интерполированная по времени ТПр из кольцевого буфера (он также используется для анализа траектории прицеливания) с учётом задержки внутренней баллистики (1 мс) и апостериорной ТПр (т. е. истинная ТПр выстрела определяется с некоторой задержкой).

2. Алгоритм анимации для реалистичности также должен поддерживать не менее 30 кадров/с генерации изменяемой мишенной обстановки с расчётом баллистической кривой и решением «задачи встречи». Т. е. изображение обновляется с шагом $1/30$ с, за это время пуля пролетает не более 25 м, а движущиеся мишень с максимальной боковой скоростью 2 м/с (бронетехника до 4 м/с) пройдёт не более 7 см, что компенсируется линейной интерполяцией по времени долёта до неё.

3. «Задача встречи» с мишенью решается на отрезках баллистической траектории в ≈ 1 м, сначала проверкой на попадание в габарит объекта (с некоторой рамкой для фиксации близкого промаха), а потом решением геометрических задач пересечения аппроксимированной прямой

линией участка баллистической траектории с плоскостью объекта (мишень, местный предмет) или с поверхностью стрельбища.

4. Далее в алгоритме анимации могут отображаться спецэффекты полёта трассирующей пули (гранаты) и поражения мишени или промаха в стрельбище в виде пыли на стрельбище.

5. В случае аппроксимационной модели баллистики на каждом шаге «задачи встречи» рассчитывается время долёта активных выстрелов до всех объектов и только в случае долёта вычисляются координаты превышения с проверкой на поражение (или близкий промах), т. е. быстродействие зависит от количества активных объектов.

Таким образом, погрешности линейных интерполяций в «задаче встречи» являются вполне допустимыми для обеспечения высокого быстродействия синхронного алгоритма анимации по генерации реалистичной меняющейся мишенной обстановки в реальном времени с обработкой асинхронных выстрелов.

Проверка вычислительной эффективности оптимизации расчёта баллистики

В таблице 10 представлена проверка быстродействия алгоритмов расчёта баллистической траектории на IBM PC с 30 кратным повторением (1 с анимации) просчёта до 1000 м. Испытания подтвердили априорные предположения, что определяющим является шаг интегрирования (который влияет на погрешность линеаризации баллистической траектории, но незначительно).

А в таблице 11 представлена проверка быстродействия алгоритма «задачи встречи» на базе расчёта баллистической траектории в 300 кратном повторении (10 с) просчёта лишь 25 м/шаг (кроме метода 1, быстродействие которого зависит от количества активных объектов).

Особенность метода 1 в том, что не требуется расчёт всей траектории в 25 м, а на каждом шаге «задачи встречи» (1/30 с) рассчитываются лишь превышение траектории и время до и после всех объектов $\pm 0,5$ м с проверками на долёт и попадание (или близкий промах).

Вопросы эффективности моделирования баллистической кривой относятся скорее к прикладной сфере и защищены коммерческой тайной, поэтому публикаций на эту тему не много [17–19]. Например, в патенте [Электронный стрелковый тренажёр «тэст» RU2640952C2 2018.01.12] задекларирован стрелковый тренажёр, в котором выстрел моделируется по баллистическим таблицам (из наставлений на вооружение) с учётом температуры, влажности, давления, ветра, угла места цели и даже деривации, что практически соответствует предложенной аппроксимации регрессионными уравнениями (полиномами) табличных данных.

Но подробнее всего вопросы вычислительной оптимизации моделирования баллистики рассмотрены в [20], где анализируется ряд методов: Эйлера (Euler), Рунге–Кутты (RK), Верле (Velocity Verlet) и показано, что их быстродействие отличается не более чем в 2 раза и также зависит от шага интегрирования. Но лучший по точности и, естественно, самый медленный метод Рунге–Кутты, который является основным и в нашем исследовании.

Таблица 10 / Table 10

Сравнительный анализ быстродействия алгоритмов баллистики

Comparative analysis of the ballistics algorithms performance

Алгоритмы (30 повторений) Algorithms (30 reps)	Абсолютное время, мкс Newtonian time, μ s	Относительное relative
Аппроксимация полиномом (шаг 1 м) Polynomial fit (step 1 m)	275	1
Настильный, прямоугольный метод (шаг 1 м) Flat, rectangular method (1 m step)	280	1
Полный, метод Рунге–Кутты (шаг 1 м) Full, Runge–Kutta method (step 1 m)	360	1.3
Полный, метод Рунге–Кутты (шаг 0.2 м) Full, Runge–Kutta method (step 0.2 m)	1800	6.6

Таблица 11 / Table 11

Сравнительный анализ быстродействия алгоритмов «задачи встречи»

Comparative analysis of the "meeting problem" algorithms performance

Алгоритмы (300 повторений) Algorithms (300 reps)	Абсолютное время, мкс Newtonian time, μs	Относительное relative
Аппроксимация полиномом (3 объекта) Polynomial fit (3 objects)	9	1
Настильный, прямоугольный метод (шаг 1 м) Flat, rectangular method (1 m step)	70	7.8
Полный, метод Рунге–Кутты (шаг 1 м) Full, Runge–Kutta method (step 1 m)	86	9.6
Полный, метод Рунге–Кутты (шаг 0.2 м) Full, Runge–Kutta method (step 0.2 m)	400	44.4

Таким образом, на современных вычислительных средствах IBM PC быстродействие алгоритмов моделирования баллистической траектории не имеет существенного значения и принципиально отличаются лишь выбранным шагом расчёта, но если использовать их на встроенных системах (например, на микропроцессорах ИО), то появляется обоснованный выбор по соотношению «скорость / качество».

Заключение

Анализ вычислительной оптимизации математических моделей моделирования баллистической траектории для решения «задачи встречи» показал:

1. Для стрелковых тренажёров виртуального уровня нет особой необходимости использовать вычислительную оптимизацию, а наоборот необходимо опираться на максимальную имитацию как внешней баллистики (с углами места цели и курса, со случайным рассеиванием и зависимостью от температуры, давления, ветра), так и на поддержку широкой номенклатуры имитаторов оружия с боеприпасами и прицелами, что позволяет использовать в структурах Министерства обороны Российской Федерации с быстрой окупаемостью на боеприпасах (особенно гранатах) и безопасности огневой подготовки. Рекомендуется опираться на опыт разработки профессионального тренажёра «Ингибитор», но использовать простое интегрирование системы дифференциальных уравнений от дальности с шагом 0,2–0,5 м.

2. Для стрелковых тренажёров базового уровня с внешними вычислительными

средствами вполне достаточно настильной модели (без угла места цели, считаем расположение стрелка напротив точки прицеливания, но с поддержкой случайного рассеивания и зависимости от температуры, давления, ветра) на базе дифференциальных уравнений от дальности с простым интегрированием с шагом 1 м, и не такого широкого класса имитаторов оружия. Испытания на погрешность и быстродействие показали соответствие требованиям, что позволяет широко использовать тренажёры базового уровня в структурах Министерства внутренних дел и учебных центрах.

3. Для стрелковых тренажёров начального уровня (например, со встроенными вычислительными средствами) актуально упрощение математической модели внешней баллистики до полиномиальной аппроксимации (без угла места цели, но с поддержкой случайного рассеивания и зависимости от температуры и ветра). Испытания на погрешность и быстродействие показали соответствие требованиям, что позволяет снизить требования к необходимой технической базе, а значит расширить внедрение тренажёров начального уровня даже в школах.

Таким образом, исходя из актуальности дальнейшей разработки и использования электронных стрелковых тренажёров предлагается базироваться на исследованные и испытанные математические модели внешней баллистики, особенно благодаря высокой гибкости программного обеспечения, позволяющего в реальном времени решать «задачу встречи» с мишенной обстановкой стрельбища на произвольной аппаратной базе.

В дальнейших статьях цикла планируется исследование конструкций имитаторов оружия с контролем срыва крючка и с вариантами реализации отдачи, а также с анализом точности макетов и с исследованием конструкций и математических моделей стрелковых тренажеров виртуальной реальности.

Список использованных источников

1. Огрыза А.В. Практическая значимость использования электронных тренажеров на занятиях по огневой подготовке / А.В. Огрыза, С.А. Ульрих, А.Н. Таран // Евразийский юридический журнал. 2022. – № 1 (164). – С. 419–420.
2. Иньшин Ю.Ю. Стрелять хорошо и много инновационные подходы в обучении курсантов стрельбе с использованием боевого лазерного интерактивного высокоточного комплекса «БЛИКВТ» / Ю.Ю. Иньшин, А.В. Липаткин // Вестник военного образования. – 2022. – № 3 (36). – С. 28–33.
3. Моисеенко А.А. Применение инновационных технологий в процессе обучения огневой подготовке курсантов и слушателей образовательных организаций МВД России / А.А. Моисеенко, Д.М. Еноткина // Вестник Барнаульского юридического института МВД России. – 2023. – № 1 (44). – С. 343–346.
4. Горлов О.Ю. Методика разработки упражнений учебных стрельб из пистолета в типовых ситуациях служебной деятельности (на примере охранно-конвойных подразделений по-лиции) / О.Ю. Горлов // Полицейская деятельность. – 2023. – № 1. – С. 43–54. DOI: 10.7256/2454-0692.2023.1.38047
5. Булавин А.А. Внедрение игрового и соревновательного методов обучения в практические занятия по огневой подготовке со слушателями УИС / А.А. Булавин, Г.М. Ватылев // Вестник МПА ВПА (сборник научных трудов). – 2023. – № 3. – С. 132–137.
6. Горбунов Б.Д. Использование дополненной реальности для улучшения эффективности обучения по огневой и тактической подготовке / Б.Д. Горбунов // Современные научные исследования и инновации. – 2023. – № 4 (144). – С. 55–64.
7. Митрофанов О.А. Разработка комплекса мер по актуализации и совершенствованию обучения сотрудников МЧС огневой подготовке / О.А. Митрофанов, С.В. Безнедельный, А.А. Воеводин // Современный ученый. – 2024. – № 1. – С. 206–211.
8. Воробьева С.М. Развитие массового студенческого спорта на примере секции пулевой стрельбы Московского авиационного института / С.М. Воробьева // Известия Тульского государственного университета. Физическая культура. Спорт. – 2024. – № 11. – С. 68–74. DOI: 10.24412/2305-8404-2024-11-68-74
9. Петрушин А.В. Совершенствование качества стрельбы из положения стоя у квалифицированных биатлонистов с использованием стрелкового тренажера СКАТТ / А.В. Петрушин // Ученые записки университета имени П.Ф. Лесгафта. – 2024. – № 8. – С. 166–169.
10. Викторов А.А. Анализ материально-технического обеспечения дисциплины «Огневая подготовка» / А.А. Викторов // Символ науки: международный научный журнал. – 2024. – Т. 1. – № 3-2. – С. 139–143.
11. Зиямбетов В.Ю. Стендовая стрельба в рамках военно-прикладной физической подготовки студентов-курсантов военных учебных центров / В.Ю. Зиямбетов // Актуальные проблемы физической и специальной подготовки силовых структур. – 2025. – № 1. – С. 125–128.
12. Егоров С.Ф. Семейство электронных стрелковых тренажеров «СТрИж»: уровни реализации и структура свободного программного обеспечения / С.Ф. Егоров // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14. – № 4. – С. 251–267. DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-251-267
13. Егоров С.Ф. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: программное обеспечение баллистической «задачи встречи» / С.Ф. Егоров, Ю.К. Шелковников // Интеллектуальные системы в производстве. – 2022. – Т. 20. – № 2. – С. 114–127. DOI: 10.22213/2410-9304-2022-2-114-127
14. Егоров С.Ф. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: функциональная схема программного обеспечения / С.Ф. Егоров // Интеллектуальные системы в производстве. – 2019. – Т. 17. – № 2. – С. 19–29. DOI: 10.22213/2410-9304-2019-2-19-29
15. Коновалов А.А. Внешняя баллистика / А.А. Коновалов, Ю.В. Николаев. Ижевск. – 2003. – 192 с.
16. Егоров С.Ф. Исследование необходимости использования переменного значения баллистического коэффициента при моделировании траектории пули в стрелковом тренажере / С.Ф. Егоров, А.Ю. Вдовин // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2023. – Т. 23. – № 2. – С. 253–263. DOI: 10.18500/1816-9791-2023-23-2-253-263
17. Karapetyan A., Ter-Martirosyan A., Badalyan B., Karapetyan A. Modelling and Testing of the Application Designed for Ballistic Calculations of Detected Objects. Journal Electrical and Electronic Engineering. – 2020. – Vol. 8. – № 1. – С. 16–20. DOI: 10.11648/j.jeee.20200801.13

18. Jokela A.C. Modeling Ballistic Trajectories with Calculus and Numerical Methods, 2024 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tinycomputers.io/posts/modeling-ballistic-trajectories-with-calculus-and-numerical-methods.html>

19. Zvîncu N-D, Garnier A, Moldoveanu C-E, Dîrloman F-M, Ungureanu M-I, Berechet D-C, Simion A-C. Ballistic Assessment for Shooting Range Validation in Case of Direct Fire. Journal of Military Technology. – 2024. – Vol. 7. – № 1. DOI: 10.32754/JMT.2024.1.01

20. Go Y-B, Kang Y-J. Numerical Ballistic Modeling in Game Engines. International Journal of Advanced Smart Convergence. – 2023. – Vol. 12. – №. 2. – Pp. 117–126. DOI: 10.7236/IJASC.2023.12.2.117

References

1. Ogryza AV, Ul'rikh SA, Taran AN. Practical significance of using electronic simulators in fire training classes. Eurasian Law Journal. 2022;1(164):419-420. (In Russ.).

2. In'shin YuYu, Lipatkin AV. Shoot well and many innovative approaches in training cadets in shooting using the combat laser interactive high-precision complex "BLIK-VT". Bulletin of Military Education. 2022;3(36):28-33. (In Russ.).

3. Moiseenko AA, Enotkina DM. The use of innovative technologies in the process of training in the fire training of cadets and students of educational organizations of the MIA of Russia. Bulletin of the Barnaul Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2023;1(44):343-346. (In Russ.).

4. Gorlov OYu. Methodology for the development of training exercises from a pistol in typical situations of official activity (using the example of security and escort police units). Policing. 2023;1(1):43-54. (In Russ.).

DOI: 10.7256/2454-0692.2023.1.38047

5. Bulavin AA, Vatyev GM. Implementation of game and competitive training methods in practical fire training sessions with UIS students. IPA VPA Bulletin (collection of scientific papers). 2023;3(3):132-137. (In Russ.).

6. Gorbunov BD. Use augmented reality to improve the effectiveness of fire and tactical training. Modern scientific research and innovation. 2023;4(4):55-64. (In Russ.).

7. Mitrofanov OA, Beznedel'nyi SV, Voevodin AA. Development of a set of measures to update and improve the training of employees of the Ministry of Emergency Situations in fire training. Modern scientist. 2024;1(1):206-211. (In Russ.).

8. Vorob'eva SM. The development of mass university sports on the example of the bullet shooting section of the Moscow Aviation Institute. News of Tula State University. Physical education. Sports. 2024;11(1):68-74. (In Russ.). DOI: 10.24412/2305-8404-2024-11-68-74

9. Petrushin AV. Improving the quality of shooting from a standing position among qualified biathletes using the SKATT shooting simulator. Scientific notes of the University named after P.F. Lesgaft. 2024;8(8):166-169. (In Russ.).

10. Viktorov AA. Analysis of material and technical support of the discipline "Fire training". Symbol of science: international scientific journal. 2024;1(3-2):139-143. (In Russ.).

11. Ziambetov VYu. Bench shooting as part of the military applied physical training of student cadets of military training centers. Actual problems of physical and special training of power structures. 2025;1(1):125-128. (In Russ.).

12. Egorov SF. Family of electronic shooting simulators «STrIzh»: levels of implementation and structure of free software. Devices and methods of measurements. 2023;14(4):251-267. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-251-267

13. Egorov SF, Shelkovnikov YuK. Shooting simulator «Inhibitor»: ballistic «meeting task» software. Intelligent systems in production. 2022;20(2):114-127. (In Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2022-2-114-127

14. Egorov SF. Shooting simulator «Inhibitor»: functional diagram of the software. Intelligent systems in production. 2019;17(2):19-29. (In Russ.).

DOI: 10.22213/2410-9304-2019-2-19-29

15. Konovalov AA, Nikolaev YuV. Exterior ballistics. Izhevsk. 2003:192. (In Russ.).

16. Egorov SF, Vdovin AYU. Study of the need to use a variable value of the ballistic coefficient when modeling the trajectory of a bullet in a shooting simulator. News of Saratov University. New series. Series: Mathematics. Mechanics. Computer science. 2023;23(2):253-263. (In Russ.). DOI: 10.18500/1816-9791-2023-23-2-253-263

17. Karapetyan A, Ter-Martirosyan A, Badalyan B, Karapetyan A. Modelling and Testing of the Application Designed for Ballistic Calculations of Detected Objects. Journal Electrical and Electronic Engineering. 2020;8(1):16-20. DOI: 10.11648/j.jee.20200801.13

18. Jokela AC. Modeling Ballistic Trajectories with Calculus and Numerical Methods [Electronic resource] – Electronic data. [2024]. Access mode: <https://tinycomputers.io/posts/modeling-ballistic-trajectories-with-calculus-and-numerical-methods.html>

19. Zvîncu N-D, Garnier A, Moldoveanu C-E, Dîrloman F-M, Ungureanu M-I, Berechet D-C, Simion A-C. Ballistic Assessment for Shooting Range Validation in Case of Direct Fire. Journal of Military Technology. 2024;7(1). DOI: 10.32754/JMT.2024.1.01

20. Go Y-B, Kang Y-J. Numerical Ballistic Modeling in Game Engines, International Journal of Advanced Smart Convergence, 2023;12(2):117-126.

DOI: 10.7236/IJASC.2023.12.2.117