

УДК 623.54:004.421

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-3-121-133

Стрелковый тренажер «Ингибитор»: математическое обеспечение баллистики оружия калибра 7,62

С. Ф. Егоров, кандидат технических наук, доцент,

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

А. Ю. Вдовин, кандидат технических наук, доцент

ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

И. В. Коробейникова, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

К. Ю. Петухов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. Н. Сяктерев, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Описывается программное обеспечение поддержки расчета внешней баллистики для оружия калибра 7,62 мм с учетом внешних факторов тактического тренажера оптико-электронного для стрелкового оружия «Ингибитор», разработанного в Институте механики УдмФИЦ УрО РАН и на кафедре «Вычислительная техника» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова совместно с АО «Концерн «Калашников».

Приводится тактико-техническое задание для баллистического расчета траектории до 2 км дальности имитаторов оружия с лазерным излучателем точки прицеливания с учетом внешних факторов: типов прицелов, особенно оптического, баллистического рассеивания пуль, отклонения пули от бокового ветра и деривации, которые оказывают существенное влияние на баллистическую траекторию. Реализованная дифференциальная математическая модель внешней баллистики, опираясь на угол прицеливания имитатора оружия в зависимости от показаний прицела, начальную скорость и баллистический коэффициент различных типов боеприпасов в реальном времени, строит баллистическую траекторию с поправками на температуру и давление воздуха и зависимостью от бокового ветра и случайного рассеивания пуль для дальнейшего решения «задачи встречи» с препятствиями. Приведенные результаты испытаний программного обеспечения на погрешность расчета координат баллистической траектории показали полное соответствие требованиям и адекватность математических моделей.

Сделан вывод о перспективности дальнейших исследований и разработке электронных стрелковых тренажеров благодаря совершенствованию вычислительных средств и развитию программных библиотек с целью повышения точности имитации внешней баллистики тренажеров с учетом многих внешних факторов, расширения функциональных возможностей и снижения себестоимости и, значит, повышения конкурентоспособности.

Ключевые слова: стрелковый тренажер, внешняя баллистика, математическая модель, теория поправки, баллистическая траектория, ветровой снос, рассеивание.

Введение

Разработка электронных стрелковых тренажеров (т. е. для ручного оружия и не использующих боеприпасы) [1–11] и электронных мишеней (использующих боеприпасы) [12–14] является важной задачей, т. к. производство любого вида стрелкового вооружения, согласно нормативным документам, требует и производства тренажера для привития навыков прицеливания и стрельбы, а также мишеней-тиров или стрельбищ в качестве боевых тренажеров и испытательных стендов для исследования и совершенствования конструкции изделий [15–19]. Тренажер может быть просто механической насадкой на боевое изделие (например, командирский ящик КЯ-83), но электронные тренажеры или мишени, безусловно, обладают большими функциональными возможностями.

Стрелковый тренажер «Ингибитор» разрабатывался и модифицировался в Институте механики УдмФИЦ УрО РАН и на кафедре «Вычислительная техника» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова совместно с АО «Концерн «Калашников» и принят на вооружение под индексом 1У33 [20–23]. Нарботки в настоящее время используются для следующего семейства тренажеров [24].

Целью статьи является описание разработки и испытания математической модели внешней баллистики в программном обеспечении тактического тренажера оптико-электронного для стрелкового оружия «Ингибитор» (по теме программного обеспечения тренажера ожидается 13–15 статей за 2019–2023 гг.).

Тактико-техническое задание

Требования ТТЗ [см. работу С. Ф. Егорова в этом журнале за 2019 г.] к имитации баллистики оружия калибра 7,62 тренажера (а это стрелковое вооружение АКМ, ПКМ и СВД с ночными и оптическими прицелами [см. работу С. Ф. Егорова, К. Ю. Петухова в этом журнале за 2020 г.]) сводятся к определению точек попадания (ТП) с учетом баллистики конкретных имитаторов оружия (ИО) и типов их боеприпасов, случайного рассеивания, угла места цели, метеоусловий (температуры и давления воздуха, силы и порывов бокового ветра), еще, естественно, установок прицела (механического, оптического или ночного) и точек прицеливания (ТПр) и даже учитывая порядок выстрела в очереди. При этом моделирование

координат траектории должно опираться на табл. 1–4 из наставлений на АКМ, ПКМ и СВД [25], а погрешность не должна превышать 0,3 т. д. (тысячных дальности).

Таким образом, основной целью расчета внешней баллистики имитаторов оружия калибра 7,62 является определение возвышения пули, бокового отклонения и время ее пролета до каждой из дальностей с учетом внешних факторов (кроме температуры и давления воздуха, еще и бокового ветра и рассеивания) для дальнейшего решения «задачи встречи» с препятствием (целью-мишенью, местным предметом, рельефом) на каждом шаге дистанции и последующей отрисовки спецэффектов (трассирующих боеприпасов, разрывов, попаданий).

Таблица 1. Параметры траектории АКМ на различной дальности
Table 1. Trajectory parameters AKM at different ranges

Дальность м	Угол прицеливания		Угол падения		Высота тр-ии М	Дальность до вершины траектории м	Время полета с	Конечная скорость м/с	Энергия у падения Кгм
	град, мин	тыс.	град, мин	тыс.					
100	0 07	1,9	0 04	1,1	0,03	51	0,15	623	157
200	0 11	3,1	0 09	2,5	0,13	105	0,32	537	117
300	0 16	4,4	0 18	5,0	0,34	162	0,52	459	86
400	0 22	6,1	0 31	8,6	0,71	221	0,76	391	63
500	0 31	8,6	0 48	13	1,3	282	1,04	334	47
600	0 42	12	1 09	19	2,3	344	1,35	304	37
700	0 54	15	1 35	26	3,7	406	1,69	284	32
800	1 08	19	2 06	35	5,5	468	2,05	266	29
900	1 24	24	2 39	44	7,9	525	2,43	250	26
1000	1 43	29	3 17	55	10,8	582	2,84	235	23

Вес пули ссс 7,9 г, дульная энергия 207 кгм, начальная скорость 715 м/с, угол вылета минус 2 мин.

Дальность Прицел	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
	Сантиметры превышения											
1	0	0	-7	-20								
2	5	10	9	0	-17	-45						
3	13	25	31	30	20	0	-31	-77				
4	22	44	60	69	68	57	35	0	-52	-123		
5	34	68	96	116	127	129	119	95	55	0	-83	-187
Дальность Прицел	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
	Метры превышения											
6	0,98	1,8	2,2	2,1	1,4	0	-2,7	-6,4				
7	1,3	2,5	3,3	3,6	3,2	2,1	0	-3,5	-8,4			
8	1,8	3,4	4,6	5,4	5,5	4,7	3,0	0	-4,5	-10,5		
9	2,3	4,3	6,0	7,3	7,9	7,7	6,4	4,0	0	-5,3	-12,5	
10	2,8	5,4	7,6	9,3	10,5	10,8	10,1	8,2	4,9	0	-6,7	-15,3

Таблица 2. Параметры траектории ПКМ на различной дальности

Table 2. Trajectory parameters ПКМ at different ranges

Дальность м	Угол прицеливания		Угол падения		Высота тр-и м	Дальность до вершины траектории м	Время полета с	Конечная скорость м/с	Энергия у падения кгм
	град, мин	тыс.	град, мин	тыс.					
100	0 11	3,1	0 03	0,8	0,02	51	0,13	746	272
200	0 13	3,6	0 07	1,9	0,09	103	0,27	675	223
300	0 16	4,4	0 11	3,1	0,22	157	0,43	608	182
400	0 20	5,6	0 17	4,7	0,42	213	0,60	545	146
500	0 25	6,9	0 25	6,9	0,77	271	0,79	486	116
600	0 30	8,3	0 36	10	1,3	331	1,01	432	91
700	0 36	10	0 50	14	2,0	394	1,26	384	72
800	0 44	12	1 07	19	3,0	459	1,53	343	57
900	0 53	15	1 28	24	4,3	525	1,83	316	49
1000	1 03	18	1 53	31	6,0	591	2,15	299	43
1100	1 15	21	2 21	39	8,0	656	2,49	284	39
1200	1 29	25	2 52	48	11	719	2,85	270	35
1300	1 44	29	3 26	57	14	779	3,23	257	32
1400	2 00	33	4 03	67	18	837	3,63	245	29
1500	2 18	38	4 44	79	22	893	4,06	233	26

Вес пули ссс 9,6 г, дульная энергия пули 329 кгм, начальная скорость 825 м/с, угол вылета минус 6 мин.

Дальность Прицел	Сантиметры превышения											
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
1	0	0	-2	-11								
2	3	7	7	0	-10	-25						
3	7	15	19	17	11	0	-21	-48				
4	13	26	35	40	39	32	18	0	-32	-71		
5	20	40	57	68	75	75	68	54	32	0	-41	-94

Дальность Прицел	Метры превышения																
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700
6	0,55	0,97	1,2	1,1	0,73	0	-1,4	-3,4									
7	0,75	1,4	1,8	1,9	1,7	1,1	0	-1,7	-4,3								
8	0,98	1,8	2,5	2,9	2,9	2,5	1,6	0	-2,2	-5,5							
9	1,2	2,4	3,3	3,9	4,2	4,1	3,5	2,2	0	-2,9	-7,0						
10	1,5	2,9	4,1	5,1	5,7	5,9	5,6	4,5	2,7	0	-3,8	-8,9					
11	1,9	3,6	5,2	6,5	7,4	7,9	7,9	7,3	5,9	3,5	0	-4,7	-11				
12	2,3	4,4	6,4	8,1	9,4	10,5	11	10,5	9,5	7,6	4,4	0	-5,7	-13			
13	2,7	5,3	7,7	9,8	11,5	13	14	14	13,5	12	9,2	5,3	0	-5,8	-15		
14	3,2	6,3	9,1	11,5	14	16	17	18	17,5	16,5	14,5	11	6,2	0	-8	-18	
15	3,7	7,3	10,5	14	16,5	19	21	22	22,5	22	20	17	13	7,2	0	-9,5	-20,5

Таблица 3. Параметры траектории СВД на различной дальности

Table 3. Trajectory parameters СВД at different ranges

Дальность м	Угол прицеливания		Угол падения		Высота тр-и м	Дальность до вершины траектории м	Время полета сек	Конечная скорость м/сек	Энергия у падения кгм
	град, мин	тыс.	град, мин	тыс.					
100	0 05	1,4	0 03	0,8	0,02	51	0,13	755	279
200	0 07	1,9	0 06	1,7	0,09	103	0,27	685	229
300	0 10	2,8	0 10	2,8	0,22	157	0,42	618	187
400	0 14	3,9	0 16	4,4	0,43	213	0,59	554	150
500	0 18	5,0	0 24	6,7	0,75	271	0,78	495	120
600	0 23	6,4	0 35	9,7	1,2	331	0,99	441	95
700	0 29	8,1	0 48	13	1,9	394	1,23	392	75
800	0 36	10	1 05	18	2,8	459	1,50	350	60
900	0 45	12	1 26	24	4,0	525	1,80	320	50
1000	0 55	15	1 50	31	5,7	591	2,12	302	45
1100	1 07	19	2 17	38	7,8	656	2,46	286	40
1200	1 21	23	2 47	46	10,5	719	2,82	272	36
1300	1 36	27	3 20	56	13,5	779	3,20	259	33

Вес пули ссс 9,6 г, дульная энергия пули 337 кгм, начальная скорость 830 м/с, угол вылета минус 0 мин.

Прицел \ Дальность	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
	Сантиметры превышения											
1	0	0	-4	-14								
2	3	6	5	0	-11	-28						
3	8	16	19	18	11	0	-18	-44				
4	14	27	37	40	39	33	20	0	-28	-65		
5	21	40	55	66	70	70	64	50	28	0	-43	-94

Прицел \ Дальность	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
	Метры превышения													
6	0,56	0,97	1,2	1,1	0,7	0	-1,3	-3,4						
7	0,74	1,3	1,7	1,9	1,6	1,0	0	-1,7	-4,3					
8	0,97	1,8	2,4	2,7	2,8	2,4	1,5	0	-2,2	-5,5				
9	1,2	2,2	3,1	3,7	4,0	3,9	2,8	2,0	0	-2,9	-7,0			
10	1,5	2,8	4,0	4,9	5,4	5,7	5,3	4,3	2,6	0	-3,7	-8,9		
11	1,8	3,5	5,0	6,2	7,1	7,6	7,7	7,1	5,7	3,4	0	-4,6	-10,5	
12	2,2	4,3	6,2	7,8	9,1	10,0	10,5	10,0	9,2	7,3	4,3	0	-5,5	-12,5
13	2,6	5,1	7,4	9,5	11,3	12,5	13,5	13,5	13,0	11,5	8,9	5,1	0	-6,6

Таблица 4. Параметры рассеивания и поправок на боковой ветер и атмосферу
Table 4. Parameters of dispersion and corrections to the side wind and atmosphere

Дальность, м	Срединные отклонения рассеивания , см								Поправки на отклонение на боковой ветер (4 м/с), м			Поправки по высоте на температуру на 10°C, м			Поправки по высоте на давление на 10 мм рт. ст., м		
	первых пуль очередей				последующих пуль очередей												
	по высоте		боковое		по высоте		боковое		АКМ	ПКМ	СВД	АКМ	ПКМ	СВД	АКМ	ПКМ	СВД
	Вв ₁	Бб ₁	Вв	Бб													
	АКМ	СВД	АКМ	СВД	АКМ	ПКМ	АКМ	ПКМ	АКМ	ПКМ	СВД	АКМ	ПКМ	СВД	АКМ	ПКМ	СВД
100	4	1,3	4	1,4	6	6	11	8	0,03	0,02	0,02	0	0	0	0	0	0
200	8	2,6	8	2,8	12	12	22	16	0,16	0,10	0,10	0,01	0,01	0,01	0	0	0
300	12	3,9	12	4,2	18	18	33	24	0,40	0,26	0,26	0,03	0,02	0,02	0,01	0	0
400	16	5,2	16	5,6	24	24	44	32	0,80	0,48	0,48	0,08	0,05	0,05	0,02	0,01	0,01
500	21	7,1	20	7,0	30	30	55	40	1,4	0,72	0,72	0,16	0,10	0,10	0,04	0,02	0,02
600	26	9,4	24	8,8	37	36	66	48	2,0	1,1	1,12	0,28	0,18	0,17	0,07	0,03	0,03
700	31	12,1	29	10,8	44	42	77	56	2,8	1,6	1,64	0,46	0,29	0,28	0,12	0,05	0,05
800	37	15	34	13	52	49	89	64	3,7	2,2	2,24	0,73	0,44	0,43	0,19	0,09	0,08
900	44	19	39	16	60	56	101	72	4,7	2,9	2,9	1,1	0,65	0,64	0,27	0,15	0,14
1000	52	25	45	21	69	64	114	80	5,7	3,7	3,7	1,5	0,93	0,92	0,37	0,22	0,21
1100		32		27		73		89		4,6	4,6		1,3	1,3		0,31	0,30
1200		39		34		83		98		5,5	5,5		1,7	1,7		0,41	0,41
1300		47		43		94		107		6,6	6,5		2,3	2,3		0,55	0,53
1400						107		116		7,7			3,0			0,70	
1500						122		126		8,9			3,7			0,89	

В данной статье рассматривается дополнительное математической модели баллистики тренажера с учетом рассеивания пуль и силы бокового ветра на базе дифференциальных уравнений с оценкой погрешностей моделирования.

Математическая модель рассеивания пуль

Для введения учета баллистического рассеивания пуль в математическую модель внешней баллистики имитаторов оружия тренажера [26], изначально требующей всего двух размерностей системы координат (дальность X и возвышение Y), приходится ввести третью боковую координату Z (рис. 1).

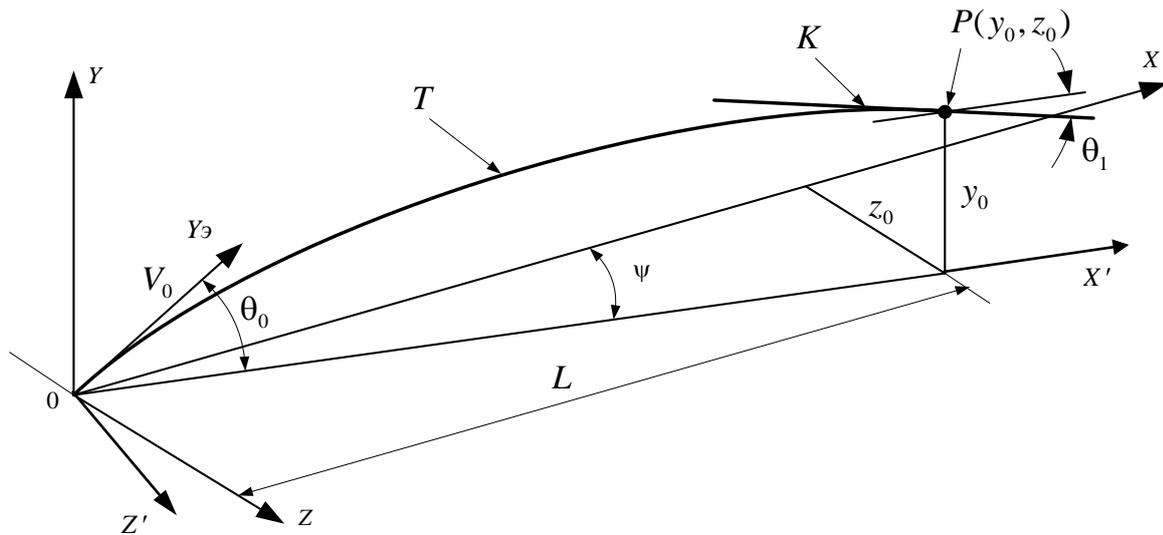


Рис. 1. Система координат тренажера и баллистическая траектория: траектория пули T , проходящая через ТП $P(y_0, z_0)$ с V_0 – начальная скорость; ψ – угол курса; θ_0 – угол бросания; L – дальность; K – касательная, θ_1 – угол падения

Fig. 1. Simulator coordinate system and ballistic trajectory: bullet trajectory T passing through TP with V_0 - initial velocity; ψ - heading angle; θ_0 - throwing angle; L - range; K - tangent, θ_1 - angle of incidence

Прицельный выстрел планируется в системе XYZ , но из-за баллистического рассеивания, связанного с допусками на характеристики патрона (вес и диаметр пули, вес и температура пороха) и на параметры ствола, из-за нутации, прецессии и пр. случайных факторов (в т.ч. хват со свалом и удержание - навыки обучаемого), фактический выстрел осуществляется со случайным «боковым» B_b и «верхним» B_v средними отклонениями от ТПр (табл. 4, когда 50% ТП в пределах $\pm B$ от ТПр). Таким образом, система координат фактического выстрела $X'YZ'$ отличается на угол курса $\Delta\psi$ и изменение угла бросания θ_0 на $\Delta\theta$. Углы перехода

систем координат отражены в таблице 5 (в угл. сек”) по данным таблицы 4 (в см и для лучших стрелков из положения лежа с упором) и с учетом, что с.к.о. рассеивания $\sigma = 1,483 * B$ по нормальному закону распределения $N(0, \sigma)$ [27] (индексы: «1» – первый выстрел в очереди, «+» – последующие):

$$\begin{aligned}\psi' &= N(0, 1,483 * \Delta\psi); \\ \theta' &= N(0, 1,483 * \Delta\theta); \\ N(M, \sigma) &= M + \left(\sum_1^{12} \text{Rand}() - \frac{12}{2}\right)\sigma.\end{aligned}\quad (1)$$

Таблица 5. Параметры рассеивания стрелкового вооружения

Table 5. Parameters of small arms dispersal

ИО	АКМ ₁	АКМ ₊	СВД снайп	СВД ссс	ПКМ	АК-74	АК-74	РПК-74	РПК-74
$\Delta\theta, ''$	99,00	127,88	27,44 (или 0 и полином (2))	39,44	127,88 (или 0 и (3))	85,57	63,94	63,94	82,52
$\Delta\psi, ''$	84,57	229,99	29,50 (или 0 и полином (2))	43,52	165,94 (или 0 и (3))	42,28	82,51	62,91	82,50

У СВД наблюдается ярко выраженная нелинейная зависимость рассеивания от дальности (особенно начиная с 500 м: табл. 4, выбрано для «снайперского» патрона и оптического прицела для лучших стрелков лежа с упора), поэтому она аппроксимирована функцией от времени полета в см B . Например, полиномом 3 степени (2) тоже относится к ПКМ (3):

$$\Delta B_B^{свд}(t) = 0,065t^3 + 2,523t^2 + 5,80t + 0,823; \quad (2)$$

$$\Delta B_B^{свд}(t) = 0,968t^3 - 1,707t^2 + 8,901t + 0,532;$$

$$\Delta B_B^{пкм}(t) = 1,276t^3 - 7,632t^2 + 39,684t + 1,921; \quad (3)$$

$$\Delta B_B^{пкм}(t) = 1,285t^3 - 11,152t^2 + 54,789t + 2,112.$$

Таким образом, математическая модель рассеивания (1) корректируется для СВД и ПКМ от случайных угловых начальных отклонений

к нелинейно возрастающим координатным смещениям от времени t :

$$\begin{aligned} dB_B &= N(0, 1, 483); \\ dB_B &= N(0, 1, 483); \\ \Delta y &= dB_B * \Delta B_B^{\text{СВД-ПКМ}}(t); \\ \Delta z &= dB_B * \Delta B_B^{\text{СВД-ПКМ}}(t). \end{aligned} \quad (4)$$

Рассеивание полностью определяет такую важную характеристику качества оружия, как кучность боя: чем меньше рассеивание, тем кучность выше. Из табл. 5 видно, что наибольшей кучностью, как и ожидалось, обладает

СВД, а наименьшей – ПКМ и АКМ очередью, поэтому АКМ активно заменяется АК-74.

Математическая модель отклонения от ветра

Боковой ветер оказывает самое частое и существенное влияние на баллистическую траекторию, особенно с учетом непостоянства его скорости и направления (рис. 2). Самое главное, что надо понять, то что ветер не просто отклоняет пулю, а меняет ее курс, т. е. при прекращении ветра пуля продолжает лететь и отклоняться вбок от линии прицеливания уже с измененным курсом.

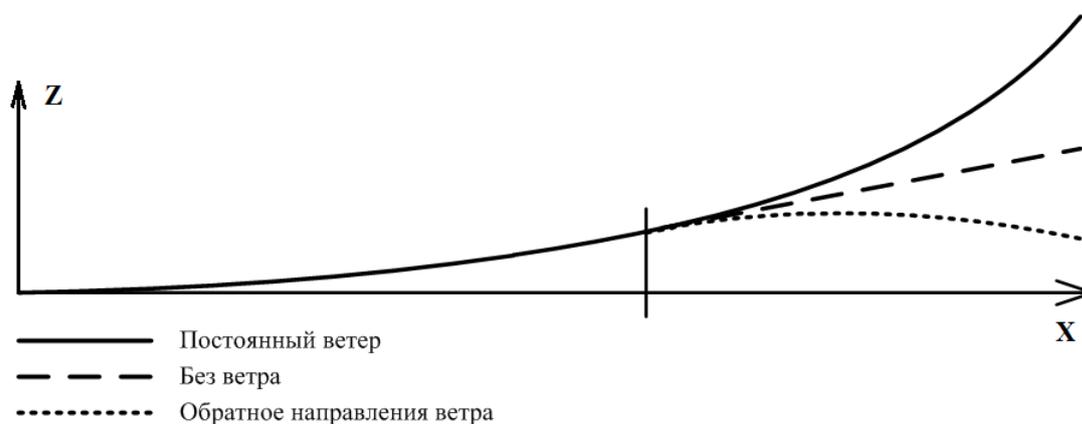


Рис. 2. Боковое смещение пули от ветра (вид сверху)
Fig. 2. Lateral displacement of the bullet from the wind (top view)

Расчет бокового смещения z пули под влиянием ветра, зная скорость боковой составляющей ветра W_z , полную горизонтальную дистанцию стрельбы x , начальную скорость полета пули v_0 , угол вылета (бросания) θ_0 и расчетное время полета t , можно произвести по формуле [28]:

$$z = W_z * \left(t - \frac{x}{v_0 * \cos(\theta_0)} \right) \quad (5)$$

Формула выведена с допущениями, что угол бросания мал (настильные траектории) и скорость ветра много меньше скорости пули (а стрелять при ветре более 12 м/с не рекомендуется наставлениями из-за непредсказуемости результата, т.к. сильный ветер почти всегда порывистый и переменный). А также игнорируется продольная составляющая ветра из-за незначительного влияния на возвышение траектории (примерно 2,5 см на 1 км дальности при 1 м/с, но ее можно учесть сложением с начальной скоростью пули).

Хотя в ТТЗ на тренажер есть требование поддержки порывистого ветра (сила которого меняется случайным образом от 0 до заданного значение W_{\max} через каждые несколько секунд и отражается непосредственно на экране и отклонением местных предметов, например, деревьев), на время одного выстрела ветер считается постоянным (иначе не будет повторяемости результата и обучающего эффекта, а ТП фактически будет случайна).

У СВД с оптическим прицелом ПСО-1 боковой маховичок, значение которого $N_{\text{бок}}$ известно, как раз задает коррекцию на ветер, каждое деление изменяет угол курса на 1 т.д. (3.44' угл. минуты, с шагом 0,5 т. д.). Но можно при прицеливании выбирать соответствующие боковые риски на прицельной сетке ПСО-1 (рис. 3):

$$\text{оптикаСВД}_{\text{бок}}'' = 3,44' * 60 * N_{\text{бок}}.$$

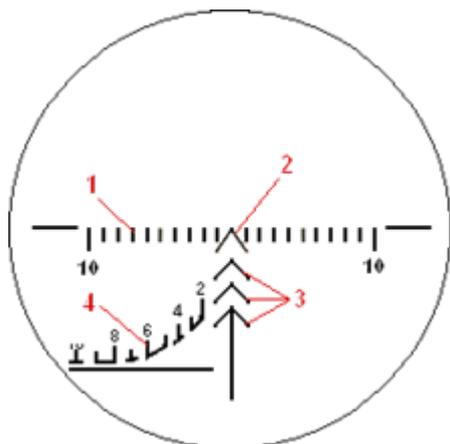


Рис. 3. PSO-1 СВД: элементы прицельной сетки оптики: 1 – шкала боковых поправок (± 1 т.д.); 2 – основной угольник для стрельбы до 1000 м (совместно с верхним маховичком); 3 – дополнительные прицельные угольники (1100, 1200, 1300 м); 4 – дальномерная шкала по росту 1,7 м

Fig. 3. PSO-1 SVD: elements of the reticle of the optics: 1 - lateral correction scale (± 1 etc.); 2 - the main square for shooting up to 1000 m (together with the upper handwheel); 3 - additional aiming squares (1100, 1200, 1300 m); 4 - rangefinder scale for height 1.7 m

Таблица 6. Отклонение пули вправо у стрелкового оружия
Table 6. Deflection of bullet right in small arms

ИО	Деривация на дальностях, см														
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
АК-74	0	0	1	2	3	5	8	12	18	27	–	–	–	–	–
РПК-74	0	0	1	2	3	4	7	11	16	23	–	–	–	–	–
АКМ	0	1	2	4	7	12	19	28	40	55	–	–	–	–	–
СВД	0	0	1	2	4	6	9	13	19	27	36	47	60	–	–
ПКМ	0	0	1	2	4	6	9	13	19	27	36	47	60	76	95

Математическая модель внешней баллистики

Важной характеристикой пули ИО 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 (0,8...1,4 - определяется экспериментально, в общем случае зависит от v и θ , так для калибра 5,45 c незначительно возрастает от дальности, а для калибра 7,62

уменьшается). Для пули со стальным сердечником «ссс» калибра 7,62 и весом 7,9 г (АКМ) $c \approx 8,82$ м²/кг ($i_{43} = 1,2$), а с весом 9,6 г (ПКМ, СВД) $c \approx 6,60$ м²/кг ($i_{43} = 1,091$). Подбор i_{43} осуществляется в программе моделирования баллистики, добиваясь соответствия времени подлета пули к рубежам дальности табличным значениям (например, табл. 1), потом, рассчитав c , подбирается уже угол бросания для каждой дальности прицела, добиваясь нулевого возвышения ТП на этой дальности [29]. Так и сформирована табл. 7.

$$\Delta D_{\text{свд-пкм}}(t) = -0,446 + 1,475t + 4,551t^2 + 0,311t^3,$$

$$\Delta D_{\text{акм}}(t) = -0,002916 + 0,563t + 5,819t^2 + 0,286t^3,$$

$$\Delta D_{\text{ак-рпк74}}(t) = -0,431 + 2,557t + 2,116t^2 + 0,8t^3.$$

(6)

Таблица 7. Параметры баллистики стрелкового вооружения 7,62 и 5,45
Table 7. Parameters of small arms ballistics 7.62 and 5.45

ИО патрон	v_0 , м/с	c	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}	θ_{13}	θ_{14}	θ_{15}
АКМ ссс	715	8.82	5°22''	8°52''	13°54''	20°24''	28°41''	39°06''	51°43''	66°28''	83°20''	102°24''	–	–	–	–	–
СВД ссс	830	6.52	4°22''	6°27''	9°32''	13°17''	17°42''	22°55''	29°06''	36°28''	45°15''	55°34''	67°25''	80°48''	95°43''	–	–
ПКМ ссс	825	6.60	4°24''	6°31''	9°40''	13°29''	18°01''	23°22''	29°44''	37°20''	46°24''	57°03''	69°14''	82°59''	98°16''	115°09''	133°41''
АК74 ссс	900	8.65	4°01''	5°48''	8°41''	12°22''	16°58''	22°43''	30°01''	39°10''	50°20''	63°28''	–	–	–	–	–
РПК74 ссс	960	8.55	3°44''	5°11''	7°38''	10°46''	14°39''	19°28''	25°31''	33°09''	42°39''	54°05''	–	–	–	–	–

Итак, на уточненную математическую модель баллистики влияют следующие факторы (по важности из ТТЗ):

1. Типы ИО и боеприпаса учитывается через начальную скорость v_0 и баллистический коэффициент пули c - зависит от ее формы и массы (табл. 7), у калибра 7,62 есть специальные типы боеприпасов (разные для АКМ и для СВД с ПКМ): «ссс» (7,9/9,6 г) – пуля со стальным сердечником (стандартная, есть еще трассирующая с теми же параметрами), «бр-з» (7,7/10,4 г) – бронебойно-зажигательная, «зж» (6,6/10,0 г) – зажигательная, «медл» (12,6/- г) – замедленная; «снайп» (-/9.8 г) – снайперская и др.

2. Угол бросания θ_0 определяется по конкретным показаниям прицелов дальности ИО (а их 10–15 для калибра 7,62) из табл. 7 и через угол места цели по ТПр от лазерного излучателя ИО (будет рассмотрено в следующих статьях). Оптический прицел СВД позволяет вводить дополнительные углы курса $\psi_{\text{свд}}$ выстрела (до ± 10 тысячных по 1 т. д. визуально, что не фиксируется, или щелчком бокового маховичка по 0.5 т. д., что фиксируется ПО) для компенсации бокового ветра: оптикаСВД_{бок} = $3,44' * 60N_{\text{бок}}$. Некая компенсация деривации бывает встроена в прицелы (при увеличении дальности прорезь прицела смещается влево), в ПОС-1 СВД считается постоянное смещение влево на 0,15 т. д., но деривация не была реализована в ПО тренажера, т. к. не было в ТТЗ, хотя и рассмотрена в данной статье (6).

3. Табличные значения превышения баллистической траектории над линией прицеливания требуют введения параметра $y_0 = -5.1$ см, равного возвышению мушки над точкой вылета (одинаковое значение для механического прицела всех образцов стрелкового автоматического оружия калибра 7,62 и 5,45).

4. Баллистическое рассеивание боеприпасов σ (с.к.о.) учитывается по данным табл. 5 с с.к.о. нормального распределения $\sigma = 1.483 * B$ - от верхнего и бокового срединных отклонений и от порядка выстрела в очереди из табл. 5, влияющее на координаты y и z через $\Delta\theta$ и $\Delta\psi$ по (1) - угловой математической модели или через Δy и Δz по (2)-(4) – математической модели нелинейных отклонений для СВД и ПКМ.

5. Температура T и давление p воздуха, которые оказывают существенное влияние на сопротивление воздуха пуле, учитываются через закон подобия Ланжевена [см. работу С. Ф. Егорова, А. Ю. Вдовина, Ю. К. Шелковникова в этом журнале за 2021 г.], а $T_c = 288^\circ\text{K}$ (15°C) и $p_c = 760$ мм р.с..

6. Ветер боковой с порывами W_z , учитывается по отдельной математической модели с боковой координатой z (5), на время одного выстрела скорость ветра считается постоянной, но за порывами (постоянными случайными изменениями силы до заданного значения) надо следить перед каждым выстрелом и вводить поправки прицеливания согласно наставлениям.

В данной статье рассматриваются только вопросы учета случайного рассеивания и определения отклонения от бокового ветра пуль стрелкового оружия калибра 7,62 и 5,45, подробное решение остальных задач моделирования баллистики оружия тренажера планируется в следующих статьях цикла.

Таким образом, математическая модель баллистики на базе системы дифференциальных уравнений на основе закона подобия Ланжевена, учитывающий влияние температуры T и давления воздуха p , по координате дальности x с шагом интегрирования $h=0,2$ м [см. работу С. Ф. Егорова, А. Ю. Вдовина, Ю. К. Шелковникова в этом журнале за 2021 г.] расширена с учетом баллистического рассеивания и отклонения пули от ветра вводом боковой координаты z :

$$\left. \begin{aligned} c, v_0, \theta_0 - \text{из табл. 7}; \quad \Delta\theta, \Delta\psi, \Delta B_B(t), \Delta B_E(t) - \text{из табл. 5}; \quad dB_B = N(0, 1, 483); \\ dB_E = N(0, 1, 483); \quad \theta = N(\theta_0, 1, 483 * \Delta\theta); \quad \psi = N(0, 1, 483 * \Delta\psi) + \text{оптикаСВД}_{\text{бок}}; \\ y_0 = -0,051; \quad c_2 = 0,00048104c \frac{p}{p_c}; \quad v = v_0(1 + 0,000638(T - T_c))\sqrt{\frac{T_c}{T}}; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dx} = -c_2 v C_x \left(\frac{v}{a_c} \right); \quad \frac{d\gamma}{dx} = -\frac{g}{u^2}; \quad \frac{dy}{dx} = \gamma = \text{tg}\theta; \quad \frac{dt}{dx} = \frac{1}{u}; \quad v = u\sqrt{1 + \gamma^2} \end{aligned} \right\}; \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} x' &= x \frac{T}{T_c}; \quad t' = t \sqrt{\frac{T}{T_c}}; \quad v' = v \sqrt{\frac{T}{T_c}}; \quad \Delta y = dB_B * \Delta B_B(t'); \quad y' = y \frac{T}{T_c} + \Delta y; \\ \Delta z &= dB_B * \Delta B_B(t') + x' \operatorname{tg}(\psi); \quad z' = W_z \left(t' - \frac{x'}{v_0 \cos(\theta_0)} \right) + \Delta z + \Delta D(t'), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где y, x, z – координаты центра массы пули базовой мат модели; c_2 – коэффициент сопротивления; $u = v \cos \theta$ – проекция скорости v на ось X ; t – время движения пули по траектории; $\gamma = \operatorname{tg} \theta$ – тангенс угла θ вектора скорости; g – ускорение свободного падения ($9,815 \text{ м/с}^2$); a – скорость звука ($a_c = 340.4 \text{ м/с}$ при $T_c = 288 \text{ К}$ и $p_c = 760 \text{ мм рт.ст.}$); $C_x(v/a)$ – лобовое сопротивление воздуха по закону 1943 года; W_z – скорость бокового ветра; ψ – угол курса; ΔD – деривация (отклонение вправо); y', x', z' – координаты центра массы пули мат модели с учетом всех поправок.

Таким образом, после инициализации по (7) запускается цикл интегрирования модели (8) с шагом h до дальности 2000 м или возвышения – 50 м с пересчетом координат по (9) для учета всех атмосферных факторов и рассеивания.

Испытания ПО баллистики

При испытании модифицированного ПО баллистики калибра 7,62 тренажера проводилась проверка возвышения баллистической траектории и ее боковое отклонение в моделирующей программе на рассогласование с табличными значениями возвышения над линией прицеливания (табл. 1–3) из наставления на

АКМ, ПКМ и СВД [30]. Таблицы составлены для «стандартных погодных» условий ($+15 \text{ }^\circ\text{C}$ тепла, давление 760 мм рт. ст.) и не отличаются высокой точностью: имеют так называемую погрешность последней значащей цифры важных для испытания данных $\pm 0,005 \text{ с}$, $\pm 0,5''$ и от $\pm 0,5 \text{ см}$ до $\pm 5 \text{ см}$.

Погрешности возвышения траектории – рассогласования координат ($y - y_0$) с табл. 1 – генерируемой ПО баллистики представлены в табл. 8 для АКМ для дальности до 500 м и оказались в пределах допуска из ТТЗ в 0,3 т. д. Введение в модель $y_0 = -5,1 \text{ см}$ существенно снизило погрешность моделирования.

Погрешности среднего B случайного отклонения траектории – рассогласования координат ($y - y_0$) и ($z - z_0$) с табл. 4 – генерируемой ПО баллистики при 300 испытаниях представлены в табл. 10 для ПКМ и оказались в пределах допуска.

Погрешности ветрового отклонения – рассогласования координат ($z - z_0$) с табл. 4 – генерируемой ПО баллистики траектории представлены в табл. 9 для СВД и оказались в пределах допуска (тоже относится и к деривации).

Таблица 8. Погрешность моделирования возвышения траектории АКМ на различной дальности

Table 8. Error of rise trajectory simulation AKM at different ranges

Дальность	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
Прицел	Сантиметры рассогласования ($y - y_0$) с табл. 1											
1	+0,19	-0,01	+0,48	-0,29								
2	+0,28	+0,17	-0,24	+0,06	-0,04	+1,05						
3	-0,4	-0,19	-0,28	-0,65	-0,43	-0,03	-0,09	+1,37				
4	+0,06	-0,28	-0,92	-1,83	-1,16	-0,3	+0,08	-0,0	+1,06	+2,57		
5	+0,11	-0,18	-0,78	-0,64	+0,07	-0,02	+0,42	+1,38	+2,49	+0,03	+4,15	+5,2

Таблица 9. Погрешность моделирования рассеивания ПКМ на различной дальности

Table 9. Error of dispersal simulation PKM at different ranges

Дальность	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Рассеивание	Сантиметры рассогласования ($y - y_0$)/($z - z_0$) с табл. 4 – рассеивание														
Вв, ($y - y_0$)	+0,99	+0,61	+0,51	-0,19	-1,33	+0,26	-0,2	+0,72	-2,6	-1,29	+2,82	+1,89	+0,49	+2,31	-2,41
Вб, ($z - z_0$)	+0,06	-0,15	-0,33	-1,57	-1,84	-1,3	+0,73	+0,68	+0,56	+0,12	-0,64	+4,02	+3,52	+4,6	-2,58

Таблица 10. Погрешность моделирования отклонения траектории СВД на различной дальности

Table 10. Error of deflection trajectory simulation SVD at different ranges

Дальность	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Ветер	сантиметры рассогласования ($z - z_0$) с табл. 4, 6 – боковой ветер, деривация												
Ветер 4 м/с	+0,39	-0,30	-3,2	-5,4	-1,9	-5,1	-9,7	-9,9	-4,4	-3,3	-4,0	+2,6	+6,7
Деривация	-0,19	+0,27	-0,1	+0,06	-0,02	-0,22	-0,18	+0,03	-0,27	-0,86	-0,5	+0,13	+1,4

Таким образом, базовая математическая модель внешней баллистики (7)–(9), теоретически обоснованная в [31], с моделями рассеивания и авторским методом подбора параметров и аппроксимацией табличных зависимостей, получила практическую апробацию в вопросах баллистического рассеивания и зависимости от бокового ветра (и деривации) и показала свою адекватность.

Выводы

Анализ ПО тренажера для поддержки баллистики ИО калибра 7,62 показал:

1. ПО баллистики, учитывая начальные параметры выстрела (показания прицела и возвышение мушки), параметры боеприпаса (начальную скорость, баллистический коэффициент и рассеивание) и метеословия (температуру и давление воздуха, силу бокового ветра), просчитывает баллистическую траекторию в реальном масштабе времени, что позволяет добиться реалистичности и требуемых точности и быстродействия благодаря реализованному алгоритму решения дифференциальной математической модели.

2. Для поддержки случайного рассеивания введены две коррекции математической модели баллистики, что позволяет добавлять разные типы ИО.

3. Испытания ПО баллистики на погрешность имитации возвышения баллистической кривой и ее рассеивания и зависимости от бокового ветра (и даже деривации) показали соответствие требованиям ТТЗ и прошли военную приемку, что позволяет использовать ПО в современных разработках.

Таким образом, показана актуальность дальнейшего исследования и использования электронных стрелковых тренажеров, особенно благодаря высокой эффективности и гибкости программного обеспечения, позволяющих повысить реалистичность имитации параметров внешней баллистики, а также благодаря окупаемости и безопасности тренажеров в подготовке личного состава.

Библиографические ссылки

1. Muñoz 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. 2019. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-27950-9_12.

2. Lábr M., Hagara L. Using open source on multiparametric measuring system of shooting // *ICMT 2019 - 7th International Conference on Military Technologies*. DOI: 10.1109/MILTECHS.2019.8870093.

3. Bogatinov D., Lameski P., Trajkovic V. Firearms training simulator based on low cost motion tracking sensor // *MULTIMEDIA TOOLS AND APPLICATIONS*. 2017, vol. 76, no. 1, pp. 1403-1418. DOI: <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, no. UNSP 104456M. DOI: <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, no. UNSP 104456L. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2281618>.

6. Fan YC., Wen CY. A Virtual Reality Soldier Simulator with Body Area Networks for Team Training // *SENSORS*. 2019, vol. 19, no. 451. DOI: [10.3390/s19030451](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 // *Multimed Tools Appl*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08141-8>.

8. Fedaravičius A., Pilkauskas K., Slizys E., Survilaita A. Research and development of training pistols for laser shooting simulation system // *Defence Technology*. 2019. DOI: <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, no. 2, pp. 61-63. DOI: [10.4302/plp.v12i2.1025](https://doi.org/10.4302/plp.v12i2.1025).

10. Taylor P. Dispatch Priming and the Police Decision to Use Deadly Force // *POLICE QUARTERLY*. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 311-332. DOI: [10.1177/1098611119896653](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, no. 4, pp. 601-614. DOI: [10.24425/mms.2020.134841](https://doi.org/10.24425/mms.2020.134841).

12. Aphanasiev V. A., Yuran S. I. Determination of point estimates in an information measuring system on the basis of light shields // *Journal of Measurements in Engineering*. 2019. T. 7. № 2. С. 90-95. DOI: [10.21595/jme.2019.20442](https://doi.org/10.21595/jme.2019.20442).

13. Afanasyev V. A., Mayshev A. E., Anisimov K. Y. Elaboration of mathematical model of flight trajectory of material point in atmosphere // *Vibroengineering Procedia 33, Vibration and Acoustics: Challenges in Mechanical Engineering*. Ser. "33rd International Conference on Vibroengineering" 2018. С. 246-251. DOI: [10.21595/vp.2018.20121](https://doi.org/10.21595/vp.2018.20121).

14. Исследование возможности уменьшения погрешности световой мишени из-за нутации и прецессии пули / В. А. Афанасьев, В. С. Казаков, В. Е. Лялин, В. В. Коробейников // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2013. Т. 2. С. 251–252.

15. Афанасьев В. А., Коробейникова И. В., Коробейников В. В. Контроль изделий по кучности стрельбы методом последовательного анализа // Вестник КИГИТ. 2010. № 1 (10). С. 46–54.

16. Алексеев С. А. Системные методы исследования конструкций стрелкового оружия // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 3. С. 5–14. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-5-14.

17. Алексеев С. А. Задачи анализа и синтеза на этапах проектирования систем стрелково-пушечного вооружения // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 1. С. 11–18. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-11-18.

18. Технологические особенности сборки и испытания модульного оружия / С. А. Писарев, Р. В. Минибаев, Д. С. Романов, И. В. Токарев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 3. С. 42–47. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-42-47.

19. К вопросу возможности применения модульной конструкции оружия с перспективным патроном / С. А. Писарев, Р. В. Минибаев, Д. С. Романов, И. В. Токарев, Л. А. Фитилев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 2. С. 33–38. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-2-33-38.

20. Корнилов И. Г., Афанасьева Н. Ю., Веркиенко Ю. В. Обратная модель системы «проектор – экран – оптико-электронный преобразователь» стрелкового тренажера // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2007. № 1. С. 63–65.

21. Корнилов И. Г. Измерительно-вычислительная система определения точки попадания в стрелковом тренажере коллективного боя // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2012. № 2. С. 110–113.

22. Егоров С. Ф., Казаков В. С. История создания оптико-электронного стрелкового тренажера «Ингибитор» // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сборник трудов регион. научно-технической очно-заочной конф. / науч. ред. В. А. Куликов. Ижевск, 2016. С. 134–142.

23. Оптико-электронные стрелковые тренажеры. Теория и практика / В. С. Казаков, Ю. В. Веркиенко, В. В. Коробейников, Н. Ю. Афанасьева. Ижевск : ИПМ УрО РАН, 2007. 260 с.

24. Скуматов Н. И., Егоров С. Ф. Исследование точности аппроксимации баллистической траектории для снайперской винтовки Драгунова // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сборник трудов регион. научно-технической очно-заочной конф. / науч. ред. В. А. Куликов. Ижевск, 2017. С. 176–184.

25. Таблицы стрельбы по наземным целям из стрелкового оружия калибров 5.45 и 7.62 мм. М. : Воениздат, 1977. – 264 с.

26. Ермолаев С. И., Комаров Л. Б., Чурбанов Е. В. Внешняя баллистика. Л., 1958. 716 с.

27. Афанасьева Н. Ю., Афанасьев В. А., Веркиенко Ю. В. Теория вероятности и математическая статистика : учебное пособие для студентов. Ижевск, ИжГТУ, 2006 – 248 с.

28. Коновалов А. А., Николаев Ю. В. Внешняя баллистика. М. : ЦНИИ информации, 1979. 228 с.

29. Исследование уравнений внешней баллистики для решения обратной задачи / В. А. Афанасьев, Н. Ю. Афанасьева, А. Ю. Вдовин, Ю. В. Веркиенко // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2008. № 4. С. 105–107.

30. Таблицы стрельбы по наземным целям из стрелкового оружия калибров 5.45 и 7.62 мм. М. : Воениздат, 1977. 264 с.

31. Коновалов А. А., Николаев Ю. В. Внешняя баллистика. Ижевск. 2003. 192 с.

References

1. Muñoz 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. 2019. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-27950-9_12.

2. Lábr M., Hagara L. Using open source on multiparametric measuring system of shooting. *ICMT 2019 - 7th International Conference on Military Technologies*. DOI: 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, no. 1, pp. 1403-1418. DOI: <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, no. UNSP 104456M. DOI: <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, no. UNSP 104456L. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2281618>.

6. Fan YC., Wen CY. A Virtual Reality Soldier Simulator with Body Area Networks for Team Training. *SENSORS*. 2019, vol. 19, no. 451. DOI: 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. *Multimed Tools Appl*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08141-8>.

8. Fedaravičius A., Pilkauskas K., Slizys E., Survila A. Research and development of training pistols for

laser shooting simulation system. Defence Technology. 2019. DOI: <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, no. 2, pp. 61-63. DOI: 10.4302/plp.v12i2.1025.

10. Taylor P. Dispatch Priming and the Police Decision to Use Deadly Force. POLICE QUARTERLY. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 311-332 (1098611119896653). DOI: 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, no. 4, pp. 601-614. DOI: 10.24425/mms.2020.134841.

12. Aphanasiev V. A., Yuran S. I. Determination of point estimates in an information measuring system on the basis of light shields. Journal of Measurements in Engineering. 2019. T. 7. № 2. С. 90-95. DOI: 10.21595/jme.2019.20442.

13. Afanasyev V. A., Mayshev A. E., Anisimov K. Y. Elaboration of mathematical model of flight trajectory of material point in atmosphere. Vibroengineering Procedia 33, Vibration and Acoustics: Challenges in Mechanical Engineering. Cep. "33rd International Conference on Vibroengineering" 2018. С. 246-251. DOI: 10.21595/vp.2018.20121.

14. Afanas'ev V.A., Kazakov V.S., Lyalin V.E., Korobeynikov V.V. *Issledovanie vozmozhnosti umen'sheniya pogreshnosti svetovoi misheni iz-za nutatsii i pretsessii puli* [Study of the possibility of reducing the error of the light target due to nutation and precession of the bullet]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo*. 2013, vol. 2, pp. 251-252 (in Russ.).

15. Afanas'ev V.A., Korobeinikova I.V., Korobeinikov V.V. *Kontrol' izdelii po kuchnosti strel'by metodom posledovatel'nogo analiza* [Control of articles by accuracy of firing by method of sequential analysis]. *Vestnik KIGIT*, 2010, no. 1, pp. 46-54 (in Russ.).

16. Alekseev S. A. *Sistemnye metody issledovaniya konstruksii strelkovogo oruzhiya* [System Methods of Research of Small Arms Designs] // *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 5-14 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-5-14.

17. Alekseev S. A. *Zadachi analiza i sinteza na etapakh proektirovaniya sistem strelkovo-pushechnogo vooruzheniya* [Tasks of analysis and synthesis at the design stages of small arms systems] // *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 11-18 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-11-18.

18. Pisarev S.A., Minibaev R.V., Romanov D.S., Tokarev I.V. *Tekhnologicheskie osobennosti sborki i ispytaniya modul'nogo oruzhiya* [Technological features of assembly and testing of modular weapons]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 42-47 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-42-47.

19. Pisarev S.A., Minibaev R.V., Romanov D.S., Tokarev I.V., Fitilev L.A. *K voprosu vozmozhnosti primeneniya modul'noi konstruksii oruzhiya s perspektivnym patronom* [On the question of the possibility of using a modular design of weapons with a perspective cartridge]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 33-38 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-2-33-38.

20. Kornilov I.G., Afanas'eva N.Yu., Verkienko Yu.V. *Obratnaya model' sistemy «proektor – ekran – optiko-elektronnyi preobrazovatel'» strelkovogo trenazhera* [Reverse model of the system "projector - screen - optoelectronic converter-tel" rifle simulator]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2007, no. 1, pp. 63-65 (in Russ.).

21. Kornilov I.G. *Izmeritel'no-vychislitel'naya sistema opredeleniya tochki popadaniya v strelko-vom trenazhere kollektivnogo boya* [Measuring and computational system for determining the point of hit in the collective combat shooter]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2012, no. 2, pp. 110-113 (in Russ.).

22. Egorov S.F., Kazakov V.S. *Istoriya sozdaniya optiko-elektronnogo strelkovogo trenazhera «Ingibitor»* [History of creation of the optical-electronic shooting "Inhibitor" exercise machine]. *Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii. Sbornik trudov reg-oi nauchno-tekhnikheskoi ochno-zaochnoi konf.* [Information technologies in science, the industry and education. Collection of works regional scientific and technical intramural and extramural conf.] (ed. Kulikov V.A.). Izhevsk, 2016, pp. 134-142 (in Russ.).

23. Kazakov V.S., Verkienko Yu.V., Korobeinikov V.V., Afanas'eva N.Yu. *Optiko-elektronnye strelkovye trenazhery. Teoriya i praktika* [Optical-electronic shooting exercise machines. Theory and practice]. Izhevsk, Institute of mechanics UB RAS, 2007, 260 p. (in Russ.).

24. Skumatov N.I., Egorov S.F. *Issledovanie tochnosti approksimatsii ballisticheskoi traektorii dlya sniperskoi vintovki Dragunova* [Ballistic trajectory approximation accuracy study for Dragunov sniper rifle]. *Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii. Sbornik trudov reg-oi nauchno-tekhnikheskoi ochno-zaochnoi konf.* [Information technologies in science, the industry and education. Collection of works regional scientific and technical intramural and extramural conf.] (ed. Kulikov V.A.). Izhevsk, 2017, pp. 176-184 (in Russ.).

25. *Tablitsy strel'by po nazemnym tselyam iz strelkovogo oruzhiya kalibrov 5.45 i 7.62 mm*. [Tables of fire against ground targets from small arms of caliber 5.45 and 7.62 mm] Moscow, 1977, 264 p. (in Russ.).

26. Ermolaev S. I., Komarov L. B., Churbanov E. V. *Vneshnyaya ballistika* [Exterior ballistics] Leningrad, 1958, 716 p. (in Russ.).

27. Afanas'eva N.Yu., Afanas'ev V.A., Verkienko Yu.V. *Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]

Uchebnoe posobie dlya studentov [Student Tutorial] Izhevsk, 2006, 248 p. (in Russ.).

28. Konovalov A. A., Nikolaev Yu. V. *Vneshnyaya ballistika* [Exterior ballistics] Moscow, 1979, 228 p. (in Russ.).

29. Afanas'ev V.A., Afanas'eva N.Yu., Vdovin A.Yu., Verkienko Yu.V. *Issledovanie uravnenii vneshnei ballistiki dlya resheniya obratnoi zadachi* [Study of external ballistics equations to solve the in-

verse problem] *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2008, no. 4, pp. 105-107 (in Russ.).

30. *Tablitsy strel'by po nazemnym tselyam iz strelkovogo oruzhiya kalibrov 5.45 i 7.62 mm*. [Tables of fire against ground targets from small arms of caliber 5.45 and 7.62 mm] Moscow, 1977, 264 p. (in Russ.).

31. Konovalov A. A., Nikolaev Yu. V. *Vneshnyaya ballistika* [Exterior ballistics] Izhevsk, 2003, 192 p. (in Russ.).

Shooting Simulator «Inhibitor»: Mathematical Support for Ballistics of 7.62 Caliber Weapons

S. F. Egorov, PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Scientific Associate, Udmurt Federal Research Center UB RAS;

A. Yu. Vdovin, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU;

I. V. Korobeynikova, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU;

K. Yu. Petukhov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU;

V. N. Syakterev, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU;

The software for support of external ballistics calculation for weapons of 7.62 mm caliber is described taking into account external factors for the optical-electronic tactical exercise machine for small arms "Inhibitor" developed at the Institute of Mechanics UdmFRC UB RAS and at Computer facilities department of Kalashnikov ISTU jointly with JSC «Kalashnikov» Concern».

A tactical and technical task is given for ballistic calculation of the trajectory up to 2 km of range of weapon simulators with a laser emitter of the targeting point taking into account external factors: types of sights, especially optical, ballistic scattering of bullets, deflection of the bullet from the side wind and derivation, which have a significant impact on the ballistic trajectory. The implemented differential mathematical model of external ballistics relying on the aiming angle of the weapon simulator depending on the sight readings, the initial speed and ballistic coefficient of various types of ammunition in real time builds a ballistic trajectory with adjustments for the air temperature and pressure and dependence on lateral wind and random dispersion of bullets to further solve the "problem of meeting" with obstacles. The given results of software tests for the error in calculating the coordinates of the ballistic trajectory showed full compliance with the requirements and adequacy of mathematical models.

It was concluded that further research and development of electronic shooting simulators were promising thanks to the improvement of computing tools and the development of software libraries in order to increase the accuracy of simulating external ballistics of simulators taking into account many external factors, expand functional networks and reduce cost and, therefore, increase competitiveness.

Keywords: shooting exercise machine (shooting simulator), external ballistics, mathematical model, theory of corrections, ballistics trajectory, wind demolition, dispersal.

Получено: 18.08.2021