

УДК 623.54; 004.421

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-4-76-87

Стрелковый тренажер «Ингибитор»: математическое обеспечение баллистики дозвукового оружия

С. Ф. Егоров, кандидат технических наук, доцент, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

Описывается математическое обеспечение поддержки расчета параметров внешней баллистики для дозвукового оружия с учетом внешних факторов для тактического оптико-электронного стрелкового тренажера «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 и точки попадания дозвуковых имитаторов оружия ПМ и ГП-25 с лазерным излучателем точки прицеливания с учетом внешних факторов: положения прицельной планки всех видов прицелов (механического, оптического, ночного) с процедурой их предварительной пристрелки (переводом координат лазерного пятна в координаты визуальной точки прицеливания), особенностей навесных траекторий ГП-25 (падение давления воздуха с высотой траектории), температуры и давления воздуха, силы ветра, баллистического рассеивания за вычетом аппаратной погрешности регистратора точки прицеливания (геометрическое вычитание независимых случайных погрешностей). Реализованные в программном обеспечении математические модели внешней баллистики, опираясь на угол прицеливания имитатора оружия, начальную скорость и баллистический коэффициент разных типов боеприпасов в реальном времени в системе координат тренажера, строят баллистическую траекторию с целью решения «задачи встречи». Приводятся результаты испытаний программного обеспечения на погрешность расчета характеристик баллистической траектории.

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 дозвуковая баллистика, математическая модель, регистратор точки прицеливания, баллистическая траектория, рассеивание, пристрелка.

Введение

Разработка электронных стрелковых тренажеров (т. е. для ручного оружия и не использующих боеприпасы) [1–11] и электронных мишеней (использующих боеприпасы) [12–18] 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 [19–24]. 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. Ка-

лашникова совместно с АО «Концерн «Калашников» и принят на вооружение под индексом 1У33 [25–28]. Нарботки в настоящее время используются для следующего семейства тренажеров [29].

Целью статьи является описание разработки и испытания математической модели баллистики программного обеспечения тактического тренажера оптико-электронного для стрелкового оружия «Ингибитор».

Тактико-техническое задание

Требования ТТЗ (см. работу автора в этом журнале за 2019 г.) к имитации баллистики дозвукового оружия тренажера (а это стрелковое вооружение ПМ и ГП-25 с механическими прицелами) сводятся к определению точек попадания (ТП) по точкам прицеливания (ТПр) с учетом баллистики конкретных имитаторов оружия (ИО), типов боеприпасов и их рассеивания, еще установок прицела (механических, оптических, ночных) и, естественно, метеоусловий (температуры и давления воздуха, силы и направления

ветра). Погрешность моделирования координат не должна превышать 0,3 т. д. (тысячных дальности) и опираться на табл. 1, 2.

Таким образом, основной целью расчета внешней баллистики имитаторов дозвукового оружия является определение траекторного возвышения всех типов боеприпаса и время его пролета до каждой из дальностей с учетом внешних атмосферных факторов и точек прице-

ливания всех видов прицелов на модели стрельбища для дальнейшего решения «задачи встречи» с препятствием (целью-мишенью, местным предметом, рельефом) на каждом шаге дистанции и последующей отрисовки спецэффектов (трассирующих или даже видимых боеприпасов как для ГП-25, разрывов гранат, попаданий и т. п.).

Таблица 1. Параметры траектории ПМ на различной дальности

Table 1. Trajectory parameters ПМ at different ranges

Дальность	Высота траектории	Высота траектории при прямом (+12.5)	Время полета	Конечная скорость	Энергия у падения	Срединные отклонения рассеивания, см	
						Вв	Вб
м	см	см	с	м/с	Дж		
10	0,0	+5,0				2	2
15	0,3	+7,8				3	3
20	0,2	+10,2				4	4
25	0	+12,5	0,08	306	285,6	4,5	4,5
30	-0,5	+13,9				6	6
40	-2,5	+16,0				7	7
50	-5,7	+16,8	0,17	295	265,4	8	8
75			0,25	285	247,7		
100			0,34	277	234,0		
125			0,43	268	219,1		
150			0,53	261	207,8		
175			0,63	254	196,8		
200			0,73	247	186,1		

Вес пули 6,1 г, дульная энергия 312 Дж, начальная скорость 315 м/с, калибр 9 мм, $y_0 = -1,4$ см.

Таблица 2. Параметры траектории ГП-25 на различной дальности

Table 2. Trajectory parameters ГП-25 at different ranges

Дальность	Угол бросания	Срединные отклонения рассеивания, см		
		Вд	Вб	Вв
м	градусы			
100 – настильных	$\approx 6^\circ$			
150 – настильных	$\approx 10^\circ$			
200 – настильных	$\approx 14^\circ$			
250 – настильных	$\approx 18^\circ$			
300 – настильных	$\approx 22^\circ$			
350 – настильных	$\approx 27^\circ$			
400 – настильных	$\approx 44^\circ$	660	300	≈ 848
350 – навесных	$\approx 63^\circ$			
300 – навесных	$\approx 68^\circ$			
250 – навесных	$\approx 72^\circ$			
200 – навесных	$\approx 76^\circ$			

Вес выстрела 255 г, начальная скорость 76 м/с, калибр 40 мм.

В данной статье рассматривается только дополнение математической модели баллистики тренажера на базе дифференциальных уравнений (см. работу С. Ф. Егорова, А. Ю. Вдовина, И. В. Коробейниковой и др. в этом журнале за

2021 г.) с учетом навесных траекторий, с учетом всех видов прицелов и с пристрелкой каждого их них, с учетом аппаратной ошибки системы регистрации ТПр, а также с оценкой погрешностей моделирования дозвуковой баллистики.

Особенности баллистики ГП-25

Баллистическая траектория (возвышения и времена на рубежах, влияние ветра и пр.) в нормативных документах на ГП-25 не описана, поэтому результаты моделирования не с чем сравнивать, и, учитывая, что поражение носит осколочный характер, когда ТП определяется на поверхности стрельбища, требования к точности моделирования баллистической траектории снижены. В табл. 2 для ГП-25 параметр случайного рассеивания V_B (верхний срединный) заменен на V_D (дальний срединный). Считая, что тангенс угла падения на $\approx 33\%$ больше, чем у угла бросания на 400 м, выводим формулу $V_B^{\text{ГП-25}} = 1,33 \tan(\theta_0) V_D^{\text{ГП-25}}$.

Радиус 100 % поражения осколками считается 7 м для стандартного выстрела ГП-25 и 10 м для «подпрыгивающего» на 75 см вверх типа (для учебного безосколочного – 0 м, используется на стрельбищах, для зачета поражения требуется попадание в габарит цели, состоящей из

двух мишеней, и есть еще газовый боеприпас, но в тренажере он не реализован).

Согласно правилам стрельбы из нормативных документов, коррекция прицеливания осуществляется по результатам предыдущих выстрелов (в том числе и для учета ветра) и по Курсу стрельб на одну цель выделяется 3 выстрела. Настильные установки прицела (рис. 1) идут 100-

150-200-250-300-350-400 м (при настильной траектории увеличение угла бросания увеличивает дальность полета) и навесные 350-300-250-200 м (при навесной траектории увеличение угла бросания уменьшает дальность полета). Табл. 2 составлена по схеме прицела ГП-25 ручным измерением с погрешностью не лучше $\pm 1^\circ$.



Рис. 1. Настильные и навесные траектории ГП-25 и схема прицела
Fig. 1. Floor and hinged trajectories of GP-25 and sight diagram

Для стрелкового автоматического настильного оружия (в том числе и ПМ) баллистическое рассеивание реализовано как начальные случайные боковые $\Delta\psi$ и верхние $\Delta\theta$ угловые средние отклонения (табл. 3 по табл. 1, 2), т. е. как линейно зависящие от расстояния (см. работу С. Ф. Егорова, А. Ю. Вдовина, И. В. Коробейниковой и др. в этом журнале за 2021 г.). В случае ГП-25 из-за крутизны навесных траекторий можно использовать зависимость от времени полета (как и у СВД и ПКМ) и исходя из данных табл. 2 и 7 получаем линейную зависимость:

$$\Delta B_B^{\text{ГП-25}}(t) = \frac{3}{9,6}t; \Delta B_D^{\text{ГП-25}}(t) = \frac{6,6}{9,6}t;$$

$$\Delta B_B^{\text{ГП-25}}(t) = 1,33 \tan(\theta_0) \Delta B_D^{\text{ГП-25}}(t);$$

$$N(M, \sigma) = M + \left(\sum_1^{12} \text{Rand}() - \frac{12}{2} \right) \sigma; \quad (1)$$

$$dB_B = N(0, 1.483); dB_D = N(0, 1.483);$$

$$\Delta y(t) = dB_B * \Delta B_B^{\text{ГП-25}}(t); \Delta z(t) = dB_D * \Delta B_D^{\text{ГП-25}}(t).$$

Координаты траектории при интегрировании математической модели в случае ГП-25 для реализации рассеивания необходимо корректировать на каждом шаге по (1) на $\Delta y(t)$ - возвышение и $\Delta z(t)$ - боковое отклонение.

Учет погрешности фиксации точки прицеливания

При определении ТПр с помощью регистратора оптико-электронного (РОЭ) тренажера по импульсному лазерному пятну от ИО на экране через ПО РОЭ возникает погрешность фиксации

координат ТПр [30]. При испытании тренажера «Ингибитор» аппаратная ошибка РОЭ ($\Delta_{\text{РОЭ}}$) согласно военной приемке не превышала 0,2 т. д. по абсолютной величине (т. е. на 400 м дает отклонения не более 8 см), что при нормальном распределении и достоверности 95 % дает согласно [31] ее среднеквадратическое отклонение (СКО) $\sigma_{\text{анп}}$:

$$\sigma_{\text{анп}} = \frac{\Delta_{\text{РОЭ}}}{1,96} = \frac{0,2}{1,96} = 0,102 \text{ т. д.} = 21,04'';$$

$$\Delta_{\text{анп}} = \frac{\sigma_{\text{анп}}}{1,483} = 14,2''.$$

Это соответствует $\sigma_{\text{анп}} = 0,51$ мм на проекционном экране в 5 метрах от дульного среза, и срединная погрешность $\Delta_{\text{анп}}$ лишь в два раза меньше срединного отклонения пуля для самого кучного ИО СВД $\approx 28,5''$ (табл. 3).

Аппаратная ошибка фиксации точки прицеливания $\sigma_{\text{анп}}$ накладывается на программно моделируемое баллистическое рассеивание $\sigma_{\text{прог}}$ и увеличивает его, поэтому требуется геометрически вычесть независимую аппаратную погрешность из табличной $\sigma_{\text{таб}}$ ($\sigma = 1,438B$ - связь СКО и срединного отклонения):

$$\sigma_{\text{таб}}^2 = \sigma_{\text{анп}}^2 + \sigma_{\text{прог}}^2; \sigma_{\text{прог}} = \sqrt{\sigma_{\text{таб}}^2 - \sigma_{\text{анп}}^2}; \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{таб}}^{\text{верх}} = 1,483\Delta\theta; \sigma_{\text{таб}}^{\text{бок}} = 1,483\Delta\psi.$$

В табл. 3 представлены срединные отклонения из табл. 1, 2, пересчитанные в угловые до ($\Delta\theta$, $\Delta\psi$) и после ($\Delta\theta^*$, $\Delta\psi^*$) коррекции аппаратной погрешности $\Delta_{\text{анп}}$ для каждого ИО по (2).

Таблица 3. Параметры рассеивания стрелкового вооружения до и после коррекции $\Delta_{\text{анп}}$ Table 3. Parameters of small arms dispersal before and after correction $\Delta_{\text{анп}}$

ИО	АКМ ₁	АКМ+	СВД	ПКМ	АК74 ₁	АК74+	РПК74 ₁	РПК74+	ПМ	ГП-25	ГП-25*
$\Delta\theta, ''$	99,00	127,47	27,44+	127,88	85,57	63,94	63,94	82,52	371,3	1119	$B_{\text{Д}}=0,34923t \text{ м}$
$\Delta\Psi, ''$	84,57	228,95	29,50+	165,94	42,28	82,51	62,91	82,50	371,3	531	$B_{\text{Б}}=0,15846t \text{ м}$
$\Delta\theta^*, ''$	97,98	126,68	23,48+	127,09	84,38	62,34	62,34	81,29	371	1118,9	$B_{\text{Д}}=0,343t \text{ м}$
$\Delta\Psi^*, ''$	83,37	228,51	25,86+	165,33	39,82	81,28	61,29	81,27	371	530,8	$B_{\text{Б}}=0,1523t \text{ м}$

Математическая модель дозвуковой баллистики

К дозвуковым ИО тренажера относятся ПМ и ГП-25. Отличительная особенность их – в высоком баллистическом рассеивании, что компенсируется либо малой стрелковой дистанцией (ПМ фактически до 50 м), либо осколочным характером поражения (ГП-25). Для ГП-25 также характерна возможность использования навесной баллистической траектории (рис. 1, когда одинаковая дальность стрельбы доступна двумя способами и угол вылета может быть 76°).

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = -c_2 H(y) v^2 C_x (v/a) \cos \theta \text{ или } \frac{dv}{dt} = -c_2 H(y) v^2 C_x (v/a) - g \sin \theta; \\ \frac{d\theta}{dt} = -\frac{g \cos \theta}{v} = -\frac{g}{u}; \quad u = v \cos \theta = \frac{v}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}}; \\ \frac{dx}{dt} = u = v \cos \theta; \quad \frac{dy}{dt} = w = v \sin \theta. \end{cases}$$

Исследования в моделирующей программе баллистики показали, что переход на дифференциальные уравнения от времени не имеет смысла. Но необходимо в модели дифференциальных уравнений от дальности, которая используется для сверхзвукового оружия (см. работу С. Ф. Егорова, А. Ю. Вдовина, Ю. К. Шелковникова в этом журнале за 2021 г.), уменьшить в 2 раза шаг интегрирования для ПМ (до $h=0,1$ м) и в 8 раз для ГП-25 (до $h=0,025$ м), при этом погрешность интегрирования не будет превышать 0,3 см. Такой подход, когда единая математическая модель используется для различных типов ИО с конкретными ее параметрами, удобнее для реализации в ПО тренажера.

Пристрелка ИО по видам прицелов

Если у всех автоматических стрелковых ИО тренажера калибра 7,62 и 5,45 лазерный инфракрасный указатель ТПр смонтирован на стволе в пламегасителе (дульном тормозе-компенсаторе, рис. 2), то у ГП-25 (еще и у РПГ-7), где необходима имитация манипуляций с «выстрелом» (гранатой) в виде ручной зарядки, излучатель смонтирован на прицеле сбоку и перемещается вместе с ним, что особенно актуально для ГП-25, где углы прицеливания ствола превышают

Соппротивление воздуха падает с высотой (а навесная траектория ГП-25 может достигать 225 м) и в математическую модель вводится функция коэффициента сопротивления воздуха

$$\text{А. П. Ветчинкина: } H(y) = \frac{20000 - y}{20000 + y}.$$

Источники [32, 33] рекомендуют для дозвукового оружия математическую модель баллистики на базе дифференциальных уравнений от времени с шагом интегрирования $10^{-4} \dots 10^{-5}$ с (переменные описаны далее в базовой модели):

45° для навесных траекторий (т. е. выходят за пределы зоны регистрации экрана, рис. 1, 2). У всех видов прицелов ИО (механических, ночных, оптических) линия прицеливания (глазцелик-мушка-цель) параллельна лазерному лучу и не сдвигается при изменении установок дальности прицелов (потребовалась механическая переделка всех прицелов ИО, изменения дальности фиксируются датчиками и влияют на угол бросания математической модели баллистики). Это сделано для относительной инвариантности модели ТПр от расстояния до экрана и угла места цели (минимизации погрешностей, но по углам экрана погрешность все равно будет выше), которые могут располагаться в секторе до 60° и по высоте до 45° , т. е. расстояние до экрана может меняться до +50 % (т. е. от 5 до 7,5 м). Для полной инвариантности модели ТПр необходим полусферический экран при постоянном месте стрельбы в его центре.

Таким образом, лазерное пятно излучателя ИО не соответствует ТПр прицелов (всегда параллельно смещено, чаще вниз от линии прицеливания, но у ГП-25 еще и влево), и поэтому требуется процедура пристрелки ИО со всеми видами прицелов (первоначальную пристрелку

осуществляют разработчики), после которой координаты лазерного пятна ($X_{\text{ТПр}}, Y_{\text{ТПр}}$) в системе координат экрана (СКЭ) корректируются

и становятся истинными координатами ТПр ($X^*_{\text{ТПр}}, Y^*_{\text{ТПр}}$) (см. работу С. Ф. Егорова, К. Ю. Петухова в этом журнале за 2020 г.).

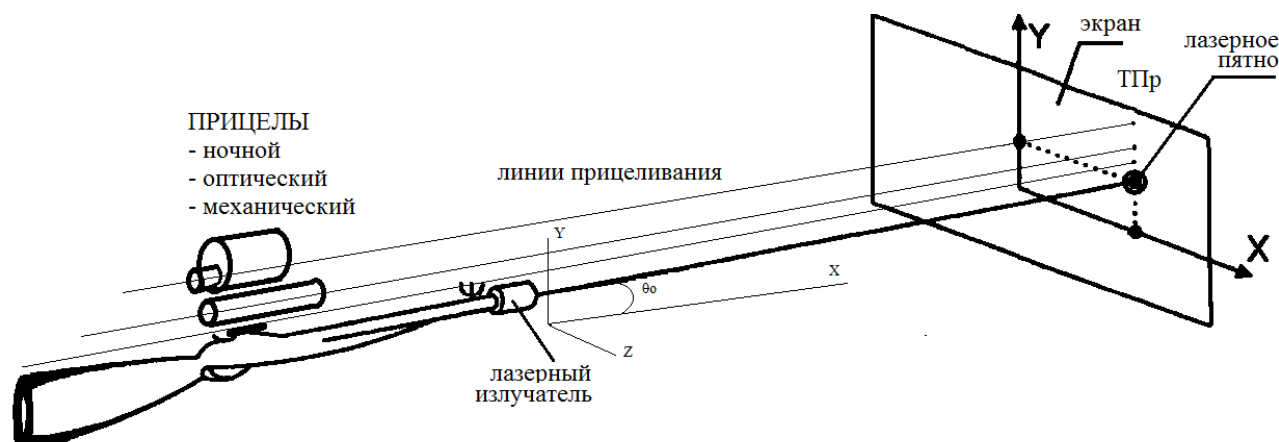


Рис. 2. Линии прицеливания всех видов прицелов
Fig. 2. Targeting lines of all kinds of sights

Согласно ТТЗ, пристрелка ИО, для уточнения координат ТПр, реализована по наставлениям на стрелковое оружие по 4 выстрелам с отбросом одного в случае его «оторванности» (рис. 3), при этом координаты принимаются от ПО РОЭ – регистратора оптико-электронного (см. работу С. Ф. Егорова, И. Г. Корнилова и др. в этом журнале за 2020 г.) при отключенной пневмоотдаче на ИО.

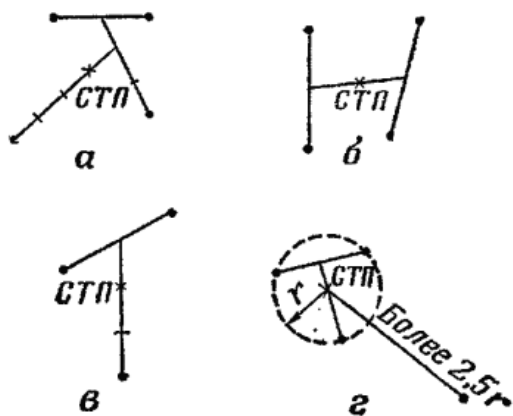
Процедура пристрелки производится при визуальной фиксации отклонения точек «попадания» от точек реального «прицеливания» в упражнении тренажера «Проверка пристрелки ИО» на величину, превышающую требования ТУ для данного оружия. Первоначально на всех ИО линия прицеливания постоянна при изменении установок дальности прицелов и параллельна с лучом ИК-лазера системы фиксации ТПр, т. е. имеет всегда фиксированное смещение, которое настроено разработчиками. Корректировка пристрелки осуществляется согласно инструкции (требование ТТЗ), отображаемой на панорамном экране: необходимо не менее 4 раз «выстрелить» из устойчивого положения в ближайшее к стрелку перекрестье под «яблочко» (координаты которого в ПО известны X^*, Y^*). Далее программа рассчитывает и сохраняет корректировки пристрелки в файловой базе данных «IN\io*?.prs» конфигурации для дальнейшего использования в ПО тренажера (после ввода пароля руководителем занятий).

На рис. 3 иллюстрируется стандартный алгоритм расчета СТП (средней точки попадания) и по ней поправок пристрелки. Для определения СТП по 4 пробоинам в случае удовлетворительной кучности нужно:

- 1) соединить прямой линией две ближайшие пробоины и расстояние между ними разделить пополам;
- 2) полученную точку соединить с третьей пробоиной и расстояние между ними разделить на три равные части;
- 3) точку деления, ближайшую к двум первым пробоинам, соединить с четвертой пробоиной и расстояние между ними разделить на четыре равные части.

Точка деления, ближайшая к первым трем пробоинам, и будет средней точкой попадания (СТП – рис. 3, а).

СТП можно определить, если соединить пробоины попарно, затем соединить середины обеих прямых и полученную линию разделить пополам. Точка деления и будет средней точкой попадания (СТП – рис. 3, б). Если 4 пробоины расположены не кучно, когда фиксируется «отрыв» – одна из пробоин удалена от СТП трех остальных более чем на 2,5 радиуса круга, вмещающего эти пробоины (СТП – рис. 3, в), средняя точка попадания определяется по трем более кучно расположенным пробоинам.



Определение средней точки попадания:
 а, б — по четырем пробойнам;
 в — по трем пробойнам;
 г — определение оторвавшейся пробойны

Рис. 3. Принцип расчета пристрелки ИО по СТП
 Fig. 3. Firing calculation principle

Пристрелка тренажера осуществляется по вышеуказанному алгоритму, только вместо пробойн (точек попадания) учитываются точки прицеливания, которые выдает ПО РОЭ (а точнее, координаты лазерных пятен $X_{ТПр}, Y_{ТПр}$), и прицельные приспособления ИО механически не перестраиваются, а производится программная коррекция координат ПО РОЭ до ТПр (визуальной линии прицеливания, на ΔX и ΔY до $X^*_{ТПр}, Y^*_{ТПр}$). В ПО тренажера «ручной» алгоритм пристрелки модернизирован на учет $N = 4$ (настраивается) последних выстрелов:

$$X^*_{ТПр} = X_{ТПр} + \Delta X; \quad Y^*_{ТПр} = Y_{ТПр} + \Delta Y;$$

$$\Delta X = X^* - \left(\sum_N X_{ТПр} \right) / N;$$

$$\Delta Y = Y^* - \left(\sum_N Y_{ТПр} \right) / N.$$

Таблица 5. Параметры баллистики дозвукового вооружения ГП-25

Table 5. Parameters of small subsonic arms ballistics ГП-25

ИО	v_0 , м/с	y_0 , см	h , м	$\Theta 100 \approx 6^\circ$	$\Theta 150 \approx 10^\circ$	$\Theta 200 \approx 14^\circ$	$\Theta 250 \approx 18^\circ$	$\Theta 300 \approx 22^\circ$	$\Theta 350 \approx 27^\circ$
ГП-25	76	0	0,025	$c = 17,97$	$c = 17,91$	$c = 17,85$	$c = 17,79$	$c = 16,91$	$c = 15,71$
ГП-25 (навесные прицелы)				$\Theta^{\wedge} 400 \approx 44^\circ$	$\Theta^{\wedge} 350 \approx 63^\circ$	$\Theta^{\wedge} 300 \approx 68^\circ$	$\Theta^{\wedge} 250 \approx 72^\circ$	$\Theta^{\wedge} 200 \approx 76^\circ$	
				$c = 14,94$	$c = 11,22$	$c = 11,28$	$c = 11,33$	$c = 11,45$	

Итак, на уточненную математическую модель с учетом особенностей дозвуковой баллистики, а также аппаратной погрешности и пристрелки ТПр влияют следующие факторы (по важности из ТТЗ):

Математическая модель внешней баллистики

Характеристикой боеприпаса является баллистический коэффициент c :

$$c = i_{43} \frac{d^2}{q} 1000,$$

где d – калибр (м), q – вес (кг), i_{43} – коэффициент формы (типичное значение 0,5...3 – определяется экспериментально, в общем случае зависит от v и θ). Для пули калибра 9 и весом 6,1 г (ПМ) $c \approx 16,60$ м²/кг ($i_{43} = 1,25$), а для выстрела калибра 40 с весом 255 г (ГП-25) в диапазоне $c \approx 10...18$ м²/кг ($i_{43} = 1,6...2,8$), что связано с негладкой формой «выстрела». Подбор i_{43} осуществляется в авторской программе решения задачи обратной баллистики [34, 35]. Для ПМ рассчитывается c по соответствию времени подлета боеприпаса к рубежам дальности табличным значениям (табл. 1) и подбирается угол бросания для каждой дальности прицела, добываясь нулевого возвышения ТП на этой дальности: у ПМ прицел постоянный 25 м ($\Theta 25$), но может и быть пристрелян на возвышение 12,5 см ($\Theta 25^*$). Для ГП-25, наоборот, по углам бросания дальностей прицела подбирается баллистический коэффициент для каждой прицельной дальности свой. Разный подход связан с большим размером «выстрела» ГП-25, навесным характером траектории, долгим временем полета и нутацией, когда надо учитывать не только лобовое сопротивление воздуха, но и его боковую составляющую, что и делает баллистический коэффициент ГП-25 переменным. Так и сформированы табл. 4, 5.

Таблица 4. Параметры баллистики дозвукового вооружения ПМ

Table 4. Parameters of small subsonic arms ballistics ПМ

ИО	v_0 , м/с	y_0 , см	c , кг/м ³	h , м	$\Theta 25$	$\Theta 25^*$
ПМ	315	-1,4	16,6	0,1	6'18"	23'30"

1. Типы ИО и боеприпаса учитываются через начальную скорость v_0 и баллистический коэффициент боеприпаса c (табл. 4, 5), у ГП-25 все типы «выстрелов» имеют одинаковые баллистические параметры, но баллистический ко-

эффицент зависит от установок прицела (угла бросания).

2. Виды прицелов не влияют на математическую модель, в реальности линии прицеливания механического, оптического и ночного прицелов имеют разное по высоте начало из-за механических особенностей конструкции, но всегда пересекаются в ТПр на одной установленной дальности. В ИО линии прицеливания всех видов прицелов параллельны лучу лазера.

3. Угол бросания θ_0 определяется по конкретным показаниям прицелов дальности ИО из табл. 4, 5 с учетом высоты мушки над точкой вылета y_0 .

4. Баллистическое рассеивание боеприпасов учитывается по данным табл. 3 с СКО нормального распределения $\sigma = 1,483 * B$ – от бокового и верхнего срединных отклонений (для ГП-25 пересчитывается от дальнего), влияющее на координаты y и z через $\Delta\theta$ и $\Delta\psi$ (или Δy и Δz) с предварительной корректировкой на аппаратную погрешность РОЭ.

5. Температура T и давление p воздуха, которые оказывают существенное влияние на со-

противление 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 $T_c = 288$ К (15 °С) и $p_c = 760$ мм рт. ст.

6. Ветер боковой W_z на время одного выстрела считается постоянным.

В данной статье рассматривались только вопросы учета аппаратной погрешности ТПр в случайном рассеивании боеприпасов, а также учет навесных траекторий и пристрелка, подробное решение остальных задач моделирования баллистики тренажера планируется в следующих статьях цикла.

Таким образом, для поддержки дозвукового оружия математическая модель баллистики тренажера на базе системы дифференциальных уравнений от дальности (см. работу С. Ф. Егорова, А. Ю. Вдовина, Ю. К. Шелковникова в этом журнале за 2021 г.) расширена с учетом навесных траекторий, с компенсацией аппаратной погрешности координат ТПр и переменным шагом интегрирования:

$$\left. \begin{aligned} c, v_0, \theta_0, y_0, h - \text{из табл. 4 и 5}; \quad \Delta\theta, \Delta\psi, \Delta B_B(t), \Delta B_E(t) - \text{из табл. 3}; \\ \theta = N(\theta_0, \sqrt{(1,483\Delta\theta)^2 - \sigma_{\text{анн}}^2}); \quad \psi = N(0, \sqrt{(1,483\Delta\psi)^2 - \sigma_{\text{анн}}^2}) + \text{оптикаСВД}_{\text{бок}}; \\ dB_B = N(0, 1.483); \quad dB_E = N(0, 1.483); \\ c_2 = 0.00048104c \frac{p}{p_c}; \quad v = v_0(1 + 0.000638(T - T_c))\sqrt{\frac{T_c}{T}}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} H(y) = \frac{20000 - y}{20000 + y}; \quad \frac{du}{dx} = -c_2 H(y) v C_x \left(\frac{v}{a_c} \right); \quad \frac{d\gamma}{dx} = -\frac{g}{u^2}; \\ \frac{d\gamma}{dx} = \gamma = \text{tg}\theta; \quad \frac{dt}{dx} = \frac{1}{u}; \quad v = u\sqrt{1 + \gamma^2}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} x' = x \frac{T}{T_c}; \quad t' = t \sqrt{\frac{T}{T_c}}; \quad v' = v \sqrt{\frac{T}{T_c}}; \quad \Delta y = dB_B \Delta B_B(t'); \quad \Delta z = dB_E \Delta B_E(t') + x' \text{tg}(\psi); \\ y' = y \frac{T}{T_c} + \Delta y; \quad z' = W_z \left(t' - \frac{x'}{v_0 \cos(\theta_0)} \right) + \Delta z + \Delta D(t'), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

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; $\gamma = \text{tg}\theta$ – тангенс угла θ вектора скорости; g – ускорение свободного падения (9,815 м/с²); a – скорость звука ($a_c = 340,4$ м/с); $C_x(v/a)$ – лобовое сопротивление воздуха по закону 1943 года;

$H(y)$ – коэффициент изменения сопротивления воздуха по высоте траектории; W_z – скорость бокового ветра; ΔD – деривация (у дозвукового оружия не учитывается); y', x', z' – координаты центра массы пули мат модели с учетом всех поправок.

Испытания ПО дозвуковой баллистики

При испытании модифицированного ПО дозвуковой баллистики тренажера проводилась проверка возвышения баллистической траектории, ее рассеивание (300 попыток), время полета, отклонение от ветра и пр. в моделирующей программе на рассогласование ($y - y_0$) с табличными значениями (табл. 1, 2).

Результаты испытаний по ПМ представлены в табл. 6 для дальности до 100 м и оказались в пределах допуска из ТТЗ в 0,3 т. д. Рассчитано отклонение от ветра и показана его незначительность, баллистическое рассеивание моделируется в ПО баллистики в пределах допуска.

Таблица 6. Рассогласования Δ параметров траектории ПМ на различной дальности
Table 6. Misalignment Δ of trajectory parameters ПМ at different ranges

Дальность м	Δ высоты траектории см	Δ высоты траектории при прямом (+12,5) см	Δ времени полета с	Δ конечной скорости м/с	Δ от ветра 4 м/с	Срединные отклонения рассеивания, см	
						Вв	Вб
10	-0,06	-0,07	-	-	0,2	1,83	1,76
15	-0,02	-0,08	-	-	0,4	2,77	2,76
20	+0,04	+0,04	-	-	0,6	3,33	3,66
25	0	0	+0,001	-3,4	0,8	4,39	4,55
30	-0,01	+0,6	-	-	1,1	5,57	5,41
40	+0,05	+1,7	-	-	1,8	7,18	6,84
50	+0,4	+2,9	-0,0048	-3,2	2,7	9,48	8,87
75	-	-	+0,0023	-3,0	5,8	-	-
100	-	-	+0,0025	-4,1	10,1	-	-

Результаты испытаний моделирования по ГП-25 представлены в табл. 7 для всех дальностей (настильных и навесных). Рассчитаны высота траектории и время полета, оценено от-

клонение от ветра и показана его существенное влияние, баллистическое рассеивание моделируется в пределах допуска (на 400 м $V_0 = 3,11$ м и $V_B = 8,78$ м).

Таблица 7. Параметры смоделированной траектории ГП-25 на различной дальности
Table 7. Modeling trajectory parameters ГП-25 at different ranges

Дальность м	Угол бросания (прицеливания) градусы	Угол падения градусы	Высота тр-ии м	Дальность до вершины траектории м	Время полета с	Конечная скорость м/с	Δ от ветра 4 м/с м
100	5,373°	5,88	2,5	52	1,42	66,4	0,38
150	8,532°	9,74	6,02	77	2,21	62,2	0,87
200	12,13°	14,43	11,76	105	3,09	58,5	1,61
250	16,364°	20,19	20,5	132	4,08	55,2	2,63
300	21,231°	26,71	33,2	159	5,19	53,5	3,81
350	27,22°	34,33	51,8	189	6,49	52,9	5,23
400^	43,98°	53,34	113,6	215	9,60	53,8	9,15
350^	62,17°	67,9	188,5	185	12,38	60,06	10,08
300^	67,5°	72,16	204,7	160	12,91	60,7	10,4
250^	72,003°	75,7	216,2	132	13,28	61,2	10,53
200^	76,004°	78,83	224,5	105	13,53	61,4	10,6

Таким образом, базовая математическая модель внешней баллистики тренажера (3)–(5), частично теоретически обоснованная в [36], с учетом предложенных расширений, получила практическую апробацию в вопросах учета дозвукового оружия и показала свою адекватность.

Выводы

Анализ ПО тренажера для поддержки баллистики дозвуковых ИО показал:

1. ПО баллистики, учитывая начальные параметры дозвукового выстрела (показания при-

целов), параметры всех боеприпасов (начальную скорость, баллистический коэффициент и рассеивание), просчитывает баллистическую траекторию в реальном масштабе времени с меньшим шагом интегрирования, что позволяет добиться реалистичности и требуемых точности и быстродействия благодаря единой дифференциальной математической модели от дальности.

2. Для учета аппаратной ошибки фиксации ТПр в параметры случайного рассеивания ИО введена геометрическая коррекция СКО, что

повышает точность моделирования траектории в реальных условиях.

3. Испытания ПО баллистики на погрешность имитации возвышения баллистической кривой дозвукового оружия, ее рассеивания и зависимости от бокового ветра 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 multi-parametric 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.
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. 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., Vdovin A. Yu., Kornilov I. G.* Weight functions of light shield and the signal at the input of optical sensor at the intersection of the bullets of light shield. // *JOURNAL OF MEASUREMENTS IN ENGINEERING*. JUNE 2019, VOL. 7, ISSUE 2. P. 74–83. DOI: <https://doi.org/10.21595/jme.2019.20441>.
13. *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.
14. *Афанасьев В. А., Коробейникова И. В.* Модели акустических мишеней для сверхзвуковых и дозвуковых скоростей движения пуль // *Системная инженерия*. 2015. № 1 (1). С. 53–64.
15. *Коробейников В. В., Коробейникова И. В.* Варианты моделей акустических мишеней // *Вестник КИГИТ*. 2012. № 1 (19). С. 18–23.
16. Исследование возможности уменьшения погрешности световой мишени из-за нутации и прецессии пули / В. А. Афанасьев, В. С. Казаков, В. Е. Лялин, В. В. Коробейников // *Надежность и качество : труды международного симпозиума*. 2013. Т. 2. С. 251–252.
17. *Вдовин А. Ю., Марков Е. М.* Оптимизация положения световых экранов в системах определения скорости и баллистического коэффициента с использованием лазерного излучателя // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2014. № 3. С. 129–132.
18. *Марков Е. М., Вдовин А. Ю.* Разработка мобильной телевизионной системы для измерения параметров дробового выстрела на основе камеры видеонаблюдения // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2014. № 4. С. 121–123.
19. *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.
20. *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.

21. Петухов К. Ю. Алгоритмы обработки сигналов при цифровых измерениях в информационно-измерительных системах для стрелкового оружия : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2003. 156 с.

22. Петухов К. Ю. Автоматизация измерения скорости детали в момент встречи с упором // Вестник КИГИТ. 2010. № 1 (10). С. 116–117.

23. Петухов К. Ю., Шаяхметов М. Р. Передискретизация как метод борьбы с шумом // Вестник КИГИТ. 2012. № 7 (25). С. 4–8.

24. Петухов К. Ю. Алгоритмы обработки цифровых измерений, эквивалентных преобразованиям аналоговых сигналов // Вестник КИГИТ. 2010. № 1 (10). С. 118–121.

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

26. 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.

27. Егоров С. Ф., Казаков В. С. История создания опико-электронного стрелкового тренажера «Ингибитор» // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сборник трудов регион. науч.-техн. оч.-заоч. конф. / науч. ред. В. А. Куликов. Ижевск, 2016. С. 134–142.

28. Опико-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.

29. Егоров С. Ф., Казаков В. С., Коробейников В. В. Стрелковый тренажер на общедоступных компонентах // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 1 (17). С. 182–185.

30. Корнилов И. Г. Подсистема визуализации целей, имитации выстрела и определения точки попадания в стрелковом тренажере : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2006. 128 с.

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

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

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

34. Решение обратной задачи внешней баллистики в информационно-измерительной системе / В. А. Афанасьев, Н. Ю. Афанасьева, А. Ю. Вдовин, Ю. В. Веркиенко // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2008. № 3. С. 104–106.

35. 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.

36. 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 multi-parametric 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.

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., Vdovin A. Yu., Kornilov I. G. Weight functions of light shield and the signal at the input of optical sensor at the intersection of the bullets of light shield. JOURNAL OF MEASUREMENTS IN ENGINEERING. JUNE 2019, VOL. 7, ISSUE 2. P. 74–83. DOI: <https://doi.org/10.21595/jme.2019.20441>.

13. 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.

14. Afanas'ev V.A., Korobeinikova I.V. *Modeli akusticheskikh mishenei dlya sverkhzvukovykh i dozvukovykh skorostei dvizheniya pul'* [Acoustic target models for supersonic and subsonic bullet speeds]. *Sistemnaya inzheneriya*. 2015, no. 1, pp. 53-64 (in Russ.).

15. Korobeynikov V.V., Korobeynikova I.V. *Varianty modelei akusticheskikh mishenei* [Acoustic Target Model Options]. *Vestnik KIGIT*, 2012, no. 1, pp. 18-23 (in Russ.).

16. 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.).

17. Vdovin A.Yu., Markov E.M. *Optimizatsiya polozheniya svetovykh ekranov v sistemakh opredeleniya skorosti i ballisticheskogo koefitsienta s ispol'zovaniem lazernogo izluchatelya* [Optimizing the Position of Light Screens in Velocity and Ballistic Coefficient Systems Using a Laser Emitter] *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2014, no. 3, pp. 129-132 (in Russ.).

18. Markov E.M., Vdovin A.Yu. *Razrabotka mobil'noi televizionnoi sistemy dlya izmereniya parametrov drobovogo vystrela na osnove kamery videonablyudeniya* [Development of a mobile television system for measuring the parameters of a shot boom based on a CCTV camera] *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2014, no. 4, pp. 121-123 (in Russ.).

19. Alekseev S. A. *Sistemnye metody issledovaniya konstruktssii 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.

20. 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.

21. Petukhov K.Yu. *Algoritmy obrabotki signalov pri tsifrovyykh izmereniyakh v informatsionno-izmeritel'nykh sistemakh dlya strelkovogo oruzhiya* [Algorithms of signal processing at digital measurements in information-measuring systems for small arms]: PhD thesis. Izhevsk, 2003, 156 p. (in Russ.).

22. Petukhov K.Yu. *Avtomatizatsiya izmereniya skorosti detali v moment vstrechi s uporom* [Automation of part speed measurement at the moment of meeting with stop]. *Vestnik KIGIT*. 2010, no. 1, pp. 116-117 (in Russ.).

23. Petukhov K.Yu., Shayakhmetov M.R. *Perediskretizatsiya kak metod bor'by s shumom* [Reexamination as a noise control method] *Vestnik KIGIT*. 2012, no. 7, pp. 4-8 (in Russ.).

24. Petukhov K.Yu. *Algoritmy obrabotki tsifrovyykh izmerenii, ekvivalentnykh preobrazovaniyam analogovykh signalov* [Algorithms for processing digital measurements equivalent to analog signal conversions] *Vestnik KIGIT*. 2010, no. 1, pp. 118-121 (in Russ.).

25. 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.).

26. 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.).

27. 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 tehnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii. Sbornik trudov reg-oi nauchno-tekhnikeskoi 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.).

28. 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.).

29. Egorov S.F., Kazakov V.S., Korobeynikov V.V. *Strelkovyi trenazher na obshchedostupnykh komponentakh* [Shooting simulator on public components] *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2011, no. 1, pp. 182-185 (in Russ.).

30. Kornilov I.G. *Podsystema vizualizatsii tselei, imitatsii vystrela i opredeleniya tochki popadaniya v strelkovom trenazhere* [The subsystem of visualization is more whole, imitations of a shot and definition of a point of hit in the shooting exercise machine]: PhD thesis. Izhevsk, 2006, 128 p. (in Russ.).

31. Afanas'eva N.Yu., Afanas'ev V.A., Verkienko Yu.V. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics] *Uchebnoe posobie dlya studentov* [Student Tutorial] Izhevsk, 2006, 248 p. (in Russ.).

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

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

34. Afanas'ev V.A., Afanas'eva N.Yu., Vdovin A.Yu., Verkienko Yu.V. *Reshenie obratnoi zadachi vneshnei ballistiki v informatsionno-izmeritel'noi sisteme* [Solving the inverse problem of external ballistics in the information and measurement system] *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2008, no. 3, pp. 104-106 (in Russ.).

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

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

Shooting Simulator «Inhibitor»: Mathematical Support for Subsonic Weapon Ballistics

S. F. Egorov, PhD in Engineering, Associate Professor, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

The mathematical support for calculation of external ballistics for subsonic weapons is described taking into account external factors for the tactical optical-electronic simulator 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».

The tactical and technical assignment is given for ballistic calculation of the trajectory and point of hit of subsonic simulators of PM weapon and GP-25 with the laser emitter of the targeting point taking into account external factors: position of the sighting bar of all types of sights (mechanical, optical, night) with the procedure of their preliminary sighting (transformation of coordinates of the laser spot into coordinates of the visual targeting point), features of the mounted trajectories of the GP-25 (air pressure drop with the height of the trajectory), air temperature and pressure, wind force, ballistic scattering minus the hardware error of the sighting point recorder (geometric subtraction of independent random errors). Mathematical models of external ballistics implemented in the software relying on the aiming angle of the weapon simulator, the initial speed and ballistic coefficient of various types of ammunition in real time in the simulator coordinate system make up a ballistic trajectory in order to solve the "meeting problem". Results of software tests for the error in the calculation of ballistic trajectory characteristics are given.

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 simulator, external subsonic ballistics, mathematical model, aiming point recorder, ballistics trajectory, dispersal, adjustment fire.

Получено: 17.11.2021