

УДК 623.54+004.421

DOI: 10.22213/2410-9304-2022-1-56-68

Стрелковый тренажер «Ингибитор»: математическое обеспечение баллистики реактивного оружия

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
Ю. К. Шелковников, доктор технических наук, профессор;
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия
И. Г. Корнилов, кандидат технических наук, доцент,
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
К. Ю. Петухов, кандидат технических наук, доцент;
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
В. А. Афанасьев, кандидат технических наук,
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Описывается математическое обеспечение поддержки расчета внешней баллистики для реактивного оружия с учетом внешних факторов и для настройки параметров оружия оптико-электронного тактического тренажера 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 на расширение функциональных возможностей имитаторов оружия с поддержкой подстройки силы отдачи (от 50 % реального) и загрузки реальных звуков выстрела (от 60 % громкости), проверкой датчиков магазина, свала (влево и вправо более 5 градусов) и предохранителя (с автоматической и одиночной стрельбой), установок границ срыва спускового крючка и границ показаний датчиков прицелов (механического, оптического и ночного). Интерактивная визуальная форма дает возможность проверять показания датчиков и настраивать параметры для каждого имитатора.

Для поддержки реактивной баллистики РПГ-7 и РПГ-26, которая отличается активным участком траектории и отклонением на нем против ветра, а также существенной зависимостью от температуры и высоким случайным рассеиванием гранат, вводятся расширение математической модели для эмпирического учета этих факторов и новые ветровые модели. Приводятся результаты испытаний программного обеспечения на погрешность расчета характеристик реактивной 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, математическая модель, прицельные приспособления, реактивная баллистика, боеприпасы, граната.

Введение

Разработка электронных стрелковых тренажеров (т. е. для ручного оружия и не использующих боеприпасы) [1–12] и электронных мишеней (использующих боеприпасы) [13–15] 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 [16, 17]. Тренажер может быть просто механической на-

садкой на боевое изделие (например, командирский ящик КЯ-83 или ПУС-7), но электронные тренажеры, 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» с 2000 по 2010 год и принят на вооружение под индексом 1У33 [18–21]. Нарботки в настоящее время используются для следующего семейства тренажеров [22].

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

Тактико-техническое задание

Требования ТТЗ (см. работу С. Ф. Егорова в этом журнале за 2019 г.) к имитации баллистики реактивного оружия тренажера (а это носимые РПГ-7, РПГ-26 и 9К115 (см. работу С. Ф. Егорова, Н. И. Осипова, С. Р. Кизнерцева в этом журнале за 2019 г.)) сводятся к определению точек попадания (ТП) с учетом баллистики конкретных имитаторов оружия (ИО) и типов боеприпасов и их рассеивания, метеоусловий (температуры и давления воздуха, силы и направления ветра), установок прицелов (механического, ночного, оптического) и точек прицеливания (ТПр) для выполнения упражнений Курса стрельб. Моделирование координат гранат должно опираться на табл. 1, 2, а погрешность не должна превышать 1,0 т. д. (тысячных дальности).

Кроме этого, необходимо реализовать настройку параметров датчиков всех ИО, что сводится к загрузке соответствующих звуковых данных (для имитации не менее 60 % громкости реального выстрела) и имитации отдачи оружия с коррекцией времен открытия пневмоклапанов (не менее 50 % реального воздействия, гранатометы без отдачи). Нужно также настраивать с помощью ПО настройки ИО (ПО НИО – часть ПО пульта руководителя занятий (ПРЗ)) через встроенные в контроллеры ИО (КИО) и микшер тренажера ПО КИО и ПО микшера (см. работу С. Ф. Егорова, К. Ю. Петухова в этом журнале за 2020 г.) количество боеприпасов в магазине и их тип, уровень срыва (ошибки) спускового крючка, показания потенциометров датчиков всех видов прицелов по каждой дальности и пр.

Полный набор поддерживаемого вооружения тренажера (рис. 1) состоит из имитаторов автоматов (АК-74 с подствольным гранатометом ГП-25 3шт., АКМ 2 шт.), ручных пулеметов (РПК-74 2 шт.), пулемета Калашникова (ПКМ 1 шт.), снайперских винтовок Драгунова (СВД 2 шт.), ручных противотанковых гранатометов (РПГ-7 и РПГ-26 по 1 шт.), противотанкового комплекса 9К115 (1 шт.), пистолетов Макарова (ПМ 8 шт.) с оптическими (для СВД, РПГ-7 и 9К115) и ночными прицелами 1ПН93 (для АК, РПК, ПКМ, СВД, РПГ-7).



Рис. 1. Набор имитаторов оружия тренажера
Fig. 1. Set of simulator weapon shooting simulator

Носимый противотанковый комплекс 9К115 имеет максимальную дальность 1000 м со средней скоростью полета управляемого по проводам снаряда 180 м/с. Параметры баллистической траектории РПГ представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Параметры траектории гранат РПГ-7 на различной дальности

Table 1. Pomegranate trajectory parameters РПГ-7 at different ranges

Прицел	Превышение траектории линии прицеливания, м гранаты ПГ-7В/ ПГ-7ВМ										Сдвиг против ветра (4 м/с)	Время доле- та	Срединные отклонения рассеивания, м		
	м	50	100	150	200	250	300	350	400	450			500	м	с
100												1,4/0,8	0,5	0,2/0,1	0,2/0,1
200	0,6/0,7	1,0/0,9	0,7/0,6	0								2,7/2,2	0,9	0,3/0,2	0,4/0,3
300	0,9/1,1	1,5/1,7	1,8/2,0	1,6/1,8	0,9/1,1	0						4,1/3,3	1,3	0,4/0,3	0,5/0,4
400	1,6/1,6	2,7/2,7	3,0/3,4	3,3/3,7	3,5/3,5	2,6/3,0	1,4/1,8	0				5,5/3,8	1,8	0,5/0,4	0,6/0,6
500	1,8/2,1	3,5/3,8	4,3/5,0	5,1/5,8	5,4/6,2	5,5/6,2	5,1/5,5	4,2/4,2	2,5/2,4	0	6,9/4,4	2,3	0,7/0,5	0,8/0,7	

Вес гранаты ПГ-7В/ПГ-7ВМ 2200/2000 г, начальная скорость 120/140 м/с, макс 300 м/с, калибр 85/70 мм.

Таблица 2. Параметры траектории РПГ-26 на различной дальности

Table 2. Trajectory parameters RPG-26 at different ranges

Прицел м	Превышение траектории линии прицеливания, м					Сдвиг по ветру (4 м/сек) м	Время долета с	Срединные отклонения рассеивания, м	
	50	100	150	200	250			Вв	Вб
50	0	-1,3	-3,9			0,03	0,35	0,2	0,2
100							0,72		
150	1,3	1,3	0	-2,8	-7,1	0,26	1,10	0,5	0,5
200							1,49		
250	2,7	4,2	4,2	2,9	0	0,72	1,89	0,8	0,8

Вес гранаты 1800 г, начальная скорость 144 м/с, калибр 72,2 мм.

В данной статье описываются визуальные формы настройки параметров имитаторов оружия (ПО НИО) и дополнение математической модели баллистики тренажера на базе системы дифференциальных уравнений по дальности поддержкой особенностей реактивного оружия с учетом всех видов прицелов ИО и с оценкой погрешностей моделирования баллистической траектории.

Особенности реактивной баллистики

Реактивная баллистика (с маршевым двигателем) класса «поверхность – поверхность» подразумевает наличие активной (ускоряющейся) и пассивной (замедляющейся, баллистической) фаз полета (РПГ-7, РПГ-26) и даже возможность управления направлением полета (9К115 управляется оператором по проводам на всей рабочей дальности до 1 км). Из-за малой дальности стрельбы (по сравнению с ракетами) и малого активного (реактивного) участка боеприпасы РПГ-7 и РПГ-26 называются гранатами, а 9К115 – снарядом. Использовать отдельную математическую модель для реактивной баллистики, представленную, например, в [23], нет смысла, т. к. практически весь полет гранат идет по инерции на пассивной фазе (да и нет описания в официальных источниках параметров маршевого двигателя для нее, кроме того, что для РПГ-7 он работает 0,4–0,6 с и разгоняет гранату до 300 м/с к 100–120 м). Поэтому выбрана стандартная математическая модель тренажера (см. работу С. Ф. Егорова в этом журнале за 2021 г.), но с подбором как начальной скорости, так и баллистического коэффициента гранат в широком диапазоне изменений, с поправочными коэффициентами на ветер и даже новыми ветровыми моделями.

Баллистика реактивного оружия отличается сильной зависимостью траектории от температуры воздуха и от температуры реактивного топлива (считаем их все же одинаковыми, что привело к введению в конструкции прицелов

термокоррекции) и в относительно высоком случайном рассеивании гранат, что компенсируется крупными габаритами цели (бронетехника: 3,4 м по фронту, 2,4 м по высоте). Кроме этого, реакция гранаты (из-за «оперения» хвостовых стабилизаторов и общих габаритов гранат) на ветер весьма существенна и отличается на разных участках траектории. Отклонение от ветра на активном участке идет против ветра из-за реактивного ускорения и большего сопротивления хвостовой части стабилизаторов – «хвост» отклоняется по ветру сильнее и вектор скорости тяги идет противоположно направлению ветра. На пассивном участке, наоборот, хвостовая часть отстает и идет отклонение за головной по ветру.

У РПГ-26 и 9К115 один вид боеприпаса – «стандартный», а у РПГ-7 – 5 основных видов: три противотанковых (ПГ-7ВМ, ПГ-7ВР и ПГ-7В), один осколочный (ОГ-7В) и один объемного взрыва (ТБГ-7В), четыре последних не поддерживаются в ПО тренажера из-за отсутствия упражнений с ними в Курсе стрельб (и подробного описания баллистики в наставлениях).

Анализ табл. 1, 2 показал полное соответствие баллистики гранат РПГ-26 и ПГ-7ВМ принципу «жесткости траектории», т. е. возможности перевода одной траектории дальности прицела в другую поворотом вверх вниз вокруг точки вылета (оси Z) с соответствием всех превышений. Для гранаты ПГ-7В принцип «жесткости» не выполняется в пределах допуска (особенно на восходящей и верхней частях траектории), и, как устаревшая и снятая с вооружения, она не поддерживается ПО тренажера.

Особенности прицелов гранатометов

У ИО тренажера может быть три вида прицелов: механический (или «открытый», у всех, кроме 9К115), ночной (у АК-74, РПК-74, АКМ, ПКМ, СВД, РПГ-7) и оптический (у СВД, РПГ-7 и, естественно, только он, у 9К115). Эти прицелы задают ТПр, и линия прицеливания всегда

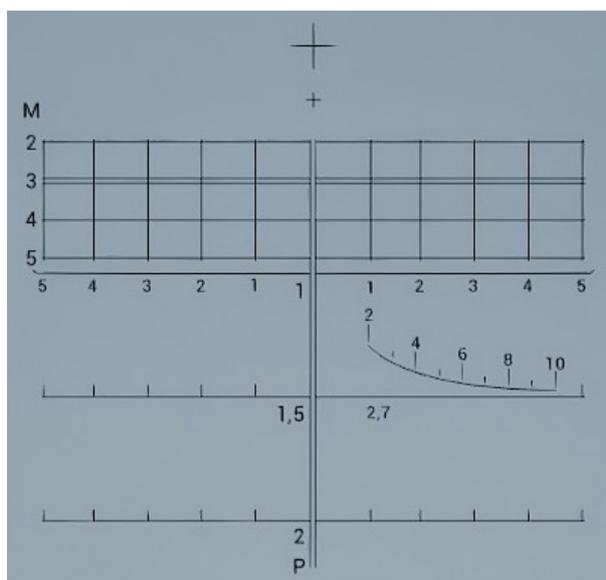
параллельна лучу лазера ИО и не изменяется при смене установок прицелов, но есть исключения именно для РПГ, когда принципиально невозможно было реализовать параллельность.

Также у РПГ есть механическая термкоррекция прицела: у РПГ-7 термомушка опускается в холод (меньше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), у РПГ-26 термоприцел механически приподнимает целик при « ± 15 » ($-15\dots+15\text{ }^{\circ}\text{C}$), относительно «+» (более

$+15\text{ }^{\circ}\text{C}$) и еще выше при «-» (меньше $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$). В имитаторах эти мушки и прицелы механически изменены и не меняют линии визуального прицеливания – показания фиксирует датчик. Но у РПГ-26 расстояние выстрела выбирается на мушке (сверху вниз 50–150–250 м, рис. 2, а) по размеру цели и, естественно, не контролируется, а луч лазера настроен параллельно средней мушке (150 м).



а



б

Рис. 2. Мушка и целик РПГ-26 (а) и оптический прицел РПГ-7 (б)

Fig. 2. Fly and pillar РПГ-26 (а) and riflescope РПГ-7 (б)

Кроме этого, у оптического прицела РПГ-7 (рис. 2, б) на всех дальностях 200–300–400–500 м (левая вертикальная шкала М) изменяются направления визуальной линии прицеливания, параллельность с лучом лазера настроена на 300 м. Оптический прицел РПГ-7, как и ночной, имеет условный (на датчике) термопереклюатель «+» (более $+0\text{ }^{\circ}\text{C}$) и «-» (меньше $-0\text{ }^{\circ}\text{C}$), что баллистически эквивалентно термомушке, поэтому достаточно настроить параметры математической модели гранатометов только для механического прицела.

Настройка параметров имитаторов оружия

ПО НИО разработано в системе программирования Borland Delphi 5.0 на проблемно ориентированном языке программирования Object Pascal и является частью ПО ПРЗ. Для настройки ИО первоначально ПО ПРЗ загружает исходные параметры настроек ИО для передачи их через ПО микшера в ПО КИО. Для этого предварительно из файлов «INI\coef-Kperiod.kf», «INI\coef-KLAP.kf», «INI\coef-LazerD.kf»

и «INI\coef-SRYV.kf» считываются значения времен срабатывания пневмоклапанов затворной рамы (для стрелковых ИО), времен срабатывания пневмоклапанов приклада (только у СВД и ПКМ для усиления отдачи), длительности импульса лазера (для всех ИО) и границы срыва крючка (для стрелковых ИО) соответственно. Далее из файлов «INI\№e-*.prp», «INI\io*?.prs» и «INI\coef-KIO.kf» (где «№e» – номер КИО от 0 до 8; «*» – номер ИО от 0 до 24; «?» – тип прицела: «п» – ночной, «о» – оптический, иначе – механический) загружаются поправки прицельной планки, пристрелки и значений АЦП КИО для ПО НИО соответственно.

Для вызова ПО НИО в начальном окне ПО ПРЗ выбирается «Настройка параметров ИО» (рис. 3). ПО НИО взаимодействует через ПО микшера с ПО КИО и получает информацию о подключенных к КИО ИО и их параметрах (в том числе значений датчиков), которые динамически обновляются в окне (рис. 4).



Рис. 3. Начальное окно ПО тренажера

Fig. 3. Initial window of simulator software

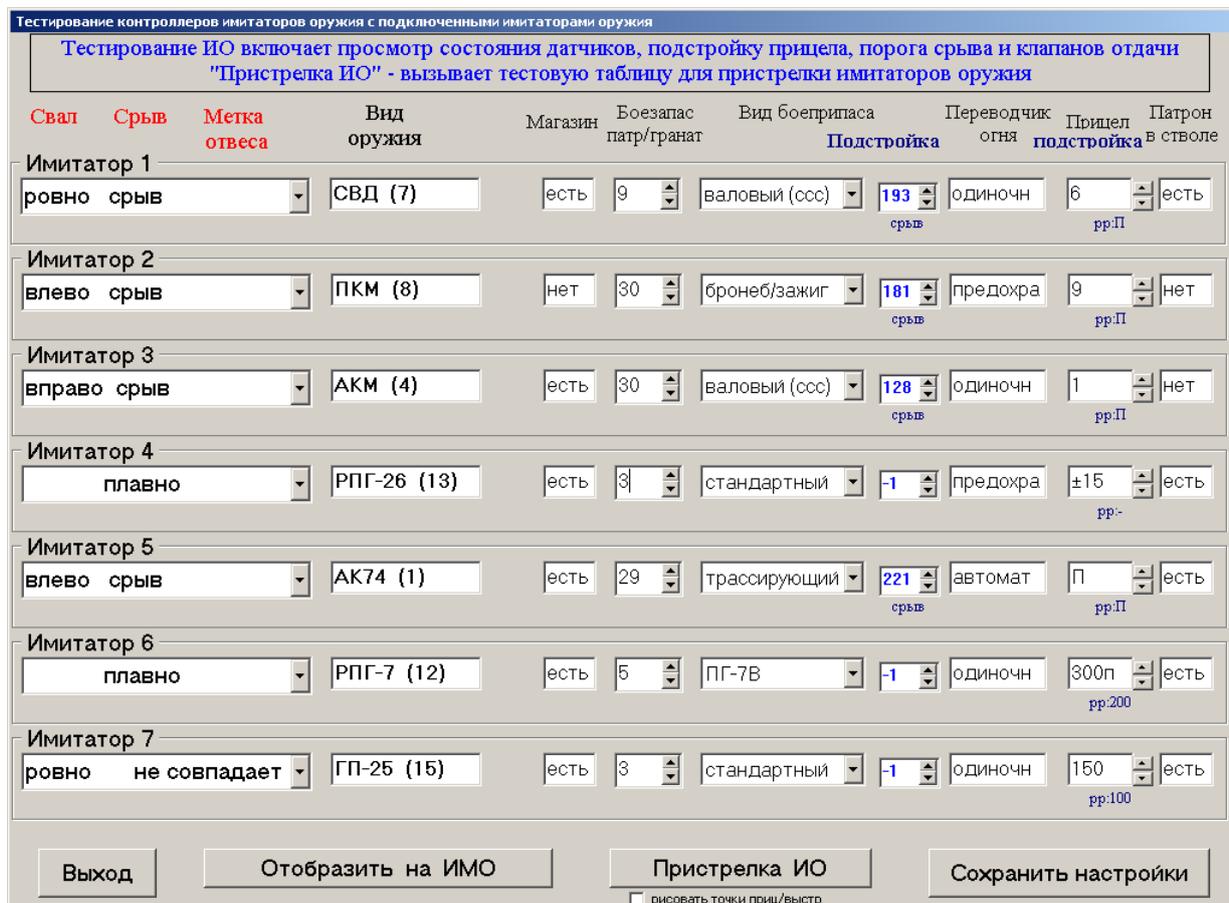


Рис. 4. Проверка и настройка имитаторов

Fig. 4. Checking and setting simulators

В первом столбце окна «Тестирование КИО и ИО» ПО НИО отображаются значения датчиков «Свал», «Срыв» и «Метка отвеса» со значениями «ровно»/«влево»/«вправо» для свала стрелковых ИО, «срыв»/«плавно» для всех ИО и «вертикально»/«не совпадает» только для отвеса ГП-25 соответственно. Во втором столбце отображается «Вид оружия» и его уникальный номер в скобках (номер в виде кода распаян в разьеме ИО и считывается КИО).

При первом запуске ПО НИО после включения КИО осуществляется загрузка звуков выстрела в КИО для конкретного ИО из файлов «WAV\io.voc». В третьем столбце отображается наличие «Магазина» (для гранатометов всегда «есть»). В четвертом столбце – «Боезапас патр/гранат», его можно изменять до 255 шт. (т. е. может не соответствовать реальной емкости магазина ИО). В пятом столбце – «Вид боеприпаса», который влияет на имитацию баллистики и разлет осколков: для калибра 5,45 это

«валовый (ссс)» / «трассирующий», для калибра 7,62 это «валовый (ссс)» / «трассирующий» / «легкий» / «тяжелый» / «бронеб/зажиг» / «снайперский», для ГП-25 это «стандартный» / «прыгающий» / «учебный», для РПГ-7 это «ПГ-7ВМ» / «ПГ-7В» / «осколочный» (два последних не реализованы, т. к. в Курсе стрельб нет соответствующих упражнений) и только «стандартный» для всех остальных ИО.

В шестом столбце «Подстройка» отображается значение границы срыва спускового крючка с возможностью откорректировать от 0 до 255, увеличение числа в окне соответствует увеличению допустимой скорости движения спускового крючка при «стрельбе», при которой «срыв» не фиксируется (кроме гранатометов, всегда отображается «-1»). При двойном клике мышью в надпись «срыв» соответствующего КИО можно переключиться в режим настройки «клапан1» и «клапан2» отдачи для ПКМ/СВД (рис. 5, а).



а



б

Рис. 5. Настройка: а – плавности срыва и б – границ прицела

Fig. 5. Setting of a) smooth break-off and b) sight boundaries

В седьмом столбце «Переводчик огня» отображается значение предохранителя «предохран» / «одиночн» / «автомат» (последний только у автоматов).

В восьмом столбце «Прицел подстройка» отображается текущее значение прицела: это для стрелкового оружия дальность в сотнях метрах или «П» - постоянный (прямой) у механического прицела или дальность в сотнях с префиксом «н» для ночного прицела или дальность в сотнях для оптического с суффиксом ветрокоррекции «л»/«п» и деления; для ГП-25 дальность в метрах и с префиксом «<» для навесной траектории; для РПГ-7 дальность в метрах с термомушкой («П» –

лето, «п» – зима) или «-(н)»/ «+(н)» и «-(о)»/ «+(о)» для ночного/оптического прицелов зимой/летом; для РПГ-26 - термокоррекция «-» для зимы, «+» для лета и «±15» для весны/осени; для 9К115 всегда «оптика»; для ПМ всегда «П». Подстройка прицела производится, когда хотя бы одно из отображаемых значений не соответствует реальным установкам на ИО при ручном тестировании. Кнопками справа в виде «стрелок» согласно рис. 5, б отображаемая в подсказке внизу (синяя) цифра изменяется на цифру, соответствующую установкам прицела оружия. Кнопкой «да» осуществляется подтверждение нового значения. Правильность отображения состояния

прицельной планки гарантируется только после подстройки всего диапазона показаний. При подстройке маховичков оптических прицелов «стрелками» перебираются сначала значения маховичка ввода углов прицеливания, а затем боковых поправок на ветер (справа налево, для СВД).

Данные от потенциометров датчиков прицелов ИО поступают с четырех АЦП КИО в диапазоне значений от 0 до 64000 (см. работу С. Ф. Егорова, К. Ю. Петухова в этом журнале за 2020 г.): от АЦП1 механического прицела, от АЦП2 оптического или ночного прицела и от АЦП3 боковых поправок оптического прицела (если нет оптического/ночного прицела, то АЦП2>44000 и АЦП3>44000) и от АЦП4 прицела ГП-25. Анализ значений АЦП позволяет определить тип подключенного прицела стрелкового ИО и, после настройки границ показаний, установленную дальность, которая задает угол бросания для расчета баллистической кривой:

Механический = (АЦП2>44000).
 Ночной Прицел = (АЦП2<44000) and
 (АЦП3>44000).
 Оптический = (АЦП2<44000) and
 (АЦП3<44000).

Для гранатомета РПГ-7 используются другие формулы:

Механический РПГ-7 = (АЦП2>44000).
 Ночной Прицел РПГ-7 = (АЦП2>1) and
 (АЦП2<8000).
 Оптический РПГ-7 = (АЦП2>8000) and
 (АЦП2<44000).

Кроме этого, ПО КИО анализирует бинарные признаки из слова состояния прицелов ИО на переключение термокоррекции прицелов РПГ.

В девятом столбце «Патрон в стволе» отображается наличие патрона или гранаты в стволе, что позволяет не только фиксировать возможность произвести выстрел, но и проверять разряженность оружия в конце упражнения.

Все изменения подстроек сохраняются в файловой базе данных по кнопке «Сохранить настройки» рис. 3 (требуется ввод пароля руководителя занятий) и загружаются при последующем запуске ПО ПРЗ.

Математическая модель реактивной баллистики

Таким образом, для реактивной баллистики выбрана базовая математическая модель на основе дифференциальных уравнений по дальности (см. работу С. Ф. Егорова в этом журнале за 2021 г.) с шагом интегрирования как для дозвукового оружия $h=0,10$ м. Активный участок

траектории полностью игнорируется у РПГ-26 и в качестве упрощения для РПГ-7 заменяется повышенной начальной скоростью.

В стандартную математическую модель отклонения от ветра введен экспериментальный коэффициент коррекции K_w для РПГ-26 и предложена новая ветровая модель для гранаты ПГ-7ВМ РПГ-7 по табл. 1 как полиномиальная функция от времени четвертой степени:

$$z^{РПГ-26} = W_z \left(t - \frac{x}{v_0 \cos(\theta_0)} \right) K_w;$$

$$z^{ПГ-7ВМ} =$$

$$= -\frac{W_z}{4} (0,88t^4 - 4,147t^3 + 5,52t^2 + 0,49t - 0,0092). \quad (1)$$

Исходя из табл. 1, 2 случайное рассеивание гранат с учетом допусков таблиц (± 5 см) пересчитано из линейных срединных отклонений в срединные угловые: $\Delta\theta$ – по высоте и $\Delta\Psi$ – по курсу и представлены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры рассеивания гранат

Table 3. Grenade dispersal parameters

$\Delta \setminus$ Гранаты	ПГ-7ВМ	РПГ-26
$\Delta\theta$, "(угл. сек.)	206,26	687,55
$\Delta\Psi$, "(угл. сек.)	288,77	687,55

Имитация баллистики 9К115 (носимого противотанкового комплекса с проводным управлением реактивного снаряда) отличается постоянной скоростью (в среднем 180 м/с, т. е. фактически только маршевый двигатель), отсутствием случайного рассеивания и практической реакции на ветер. Траектория полета управляемого снаряда всегда стремится к линии прицеливания (дальность до 1 км, но снаряд может просто не успеть вывернуть на фронтально движущуюся цель при резкой смене ТПр). Линия прицеливания изменяется вслед за ТПр (оптический прицел 9К115) и реализуется через отдельную математическую модель с постоянным контролем ТПр (модель подробно рассматривается в следующих статьях цикла из-за ее привязки к графической библиотеке ПО для отрисовки спецэффекта полета – визуальной метки снаряда).

Математическая модель внешней баллистики

Для гранат баллистический коэффициент c носит условный характер:

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

где d – наружный диаметр (м), q – вес (кг), в общем случае переменный из-за расхода реак-

тивного топлива, i_{43} – коэффициент формы (0,6...9,9 – определяется экспериментально).

Так, например, априори для гранаты РПГ-26 калибра 72,2 и весом 1800 г $c \approx 2,9 \text{ м}^2/\text{кг}$ (при $i_{43} \approx 1,0$), но граната по форме явно не похожа на гладкую пулю и реальный i_{43} много больше. Также для гранаты РПГ-7 калибра 70 и весом 2000 г $c \approx 2,5 \text{ м}^2/\text{кг}$ (при $i_{43} \approx 1,0$).

В случае РПГ-26, где активная фаза полета игнорируется, подбор в авторской моделирующей программе только i_{43} с табличной начальной скоростью $v_0 = 144 \text{ м/с}$ позволил получить удовлетворительную точность соответствия табл. 2 при $c \approx 8,89$ ($i_{43} \approx 3,07$) для времен полета (каждые 50 м граната пролетает на 0,01 с медленнее). Потом подбирались уже угол бросания для каждой дальности мушки и для температур +15, 0 и –15 °С, учитывая термоцикл. Для базовой ветровой модели (1) был рассчитан коэффициент $K_w = 1,18$.

Анализ табл. 1 для РПГ-7 показывает, что граната летит с незначительным снижением скорости, пролетая 100 м за 0,4–0,5 с с таблич-

ной начальной скоростью (140 м/с). При этом на дальности 500 м крутизна траектории гранаты ГП-7ВМ составляет $\approx 6,25 \text{ м}$ на $\approx 275 \text{ м}$, что существенно выше, чем у ГП-7В. Также у гранаты ГП-7ВМ меньше вес и калибр, случайное рассеивание и отклонение от ветра и выше бронепробиваемость, что и сделало гранату ГП-7В устаревшей. Сначала для ГП-7ВМ подбирались повышенная начальная скорость (265 м/с) и баллистический коэффициент ($c \approx 9,0 \text{ м}^2/\text{кг}$), но с высоким допуском (до $\pm 0,1 \text{ с}$) на времена подлета к рубежам. Потом подбирались углы бросания по всем установкам прицела с приоритетом низкой погрешности превышений траектории именно на ее нисходящей части (до $\pm 5 \text{ см}$). Подбор проводился как для температуры +15°, так и для –15°С с учетом термомушки. Так и сформирована табл. 4.

Таким образом, из-за больших размеров бронечелей требования ТТЗ на погрешность моделирования имеют обоснованный большой допуск (1 т. д.).

Таблица 4. Параметры баллистики реактивного вооружения, $h=0,1 \text{ м}$

Table 4. Parameters of small reactive arms ballistics, $h=0,1 \text{ m}$

ИО мушка	$v_0, \text{ м/с}$	$c, \text{ м}^2/\text{кг}$	$y_0, \text{ мм}$	Ø50	Ø150	Ø200	Ø250	Ø300	Ø400	Ø500	K_w
ГП-7ВМ +15	265	9,00	0	–	–	53'30"	–	83'20"	116'42"	153'01"	–4
ГП-7ВМ -15	265	9,00	0	–	–	56'17"	–	88'20"	124'17"	164'08"	–4
РПГ-26 +15	144	8.89	0	41'38"	130'50"	–	228'56"	–	–	–	1,18
РПГ-26 ±15	144	8.89	0	42'29"	133'51"	–	234'55"	–	–	–	1,18
РПГ-26 -15	144	8.89	0	43'25"	137'04"	–	241'23"	–	–	–	1,18

Итак, на уточненную математическую модель, дополненную поддержкой особенностей реактивной баллистики, особенностей прицелов (термокоррекции), влияют следующие факторы (по важности из ТТЗ):

1. Типы ИО и боеприпаса учитываются через начальную скорость v_0 и баллистический коэффициент боеприпаса c (табл. 4) при инициализации (2).

2. Угол бросания θ_0 определяется по конкретным показаниям датчиков прицелов дальности ИО из табл. 4 с учетом установок термоцикла или термомушки при инициализации (2).

3. Баллистическое рассеивание боеприпасов учитывается по данным табл. 3 с СКО нормального распределения $\sigma = 1,483 \cdot B$ – от бокового и верхнего срединных отклонений, влияющее на координаты y и z через $\Delta\theta$ и $\Delta\psi$ с предварительной корректировкой на аппаратную погрешность определения ТПр $\sigma_{\text{анн}} = 21,04''$ (см. работу С. Ф. Егорова в этом журнале за 2021 г.) при инициализации (2) и при пересчете результатов (4).

4. Температура T и давление p воздуха, которые оказывают существенное влияние на сопротивление воздуха и реактивную скорость, учитываются через закон подобия Ланжевена (см. работу С. Ф. Егорова, А. Ю. Вдовина, Ю. К. Шелковникова в этом журнале за 2021 г.), а $T_c = 288 \text{ К}$ (15 °С) и $p_c = 760 \text{ мм рт. ст.}$ при инициализации (2) и пересчете результатов (4).

5. Основной цикл расчета баллистики (3) идет с шагом интегрирования $h=0,1 \text{ м}$.

6. Ветер боковой W_z на время одного выстрела считается постоянным и для гранат РПГ-27 введен коэффициент коррекции K_w , а для РПГ-7 предложена новая модель (1) с отклонением против ветра при пересчете результатов (4).

Таким образом, для поддержки реактивного 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 коррекции ветрового сноса:

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

$$\left. \begin{aligned} H(y) = \frac{20000 - y}{20000 + y}; \quad \frac{du}{dx} = -c_2 H(y) v C_x \left(\frac{v}{a_c} \right); \quad \frac{d\gamma}{dx} = -\frac{g}{u^2}; \\ \frac{dy}{dx} = \gamma = \text{tg}\theta; \quad \frac{dt}{dx} = \frac{1}{u}; \quad v = u\sqrt{1 + \gamma^2}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} x' = x \frac{T}{T_c}; \quad t' = t \sqrt{\frac{T}{T_c}}; \quad v' = v \sqrt{\frac{T}{T_c}}; \quad \Delta y = dB_B \Delta B_B(t'); \quad \Delta z = dB_B \Delta B_B(t') + x' \text{tg}(\psi); \\ y' = y \frac{T}{T_c} + \Delta y; \quad z' = (K_w > 0) W_z(t' - \frac{x'}{v_0 \cos(\theta_0)}) K_w + \Delta z + \Delta D(t') - \\ - (K_w = -4) \frac{W_z}{4} (-0.0092 + 0.49t + 5.52t^2 - 4.147t^3 + 0.88t^4); \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где y, x, z – координаты центра массы боеприпаса базовой математической модели; c_2 – коэффициент сопротивления; $u = v \cos \theta$ – проекция скорости v на ось X ; t – время движения боеприпаса по траектории; $\gamma = \text{tg}\theta$ – тангенс угла θ вектора скорости; g – ускорение свободного падения (9.815 м/с^2); a – скорость звука ($a_c = 340,4 \text{ м/с}$); $C_x(v/a)$ – лобовое сопротивление воздуха по закону 1943 года, для дозвуковых РПГ $C_x = \text{const} \approx 0,157$; $H(y)$ – коэффициент изменения сопротивления воздуха по высоте траектории; W_z – скорость бокового ветра («+» – слева направо); K_w – коэффициент ветровой коррекции (в т.ч. меняет модель ветра для РПГ-7); ΔD – отклонение деривации (хотя гранаты и вращаются для устойчивости полета, у реактивного оружия D не учитывается); $\Delta y, \Delta z$ – отклонения боеприпаса по траектории из-за случайного баллистического рассеивания; y', x', z' – координаты центра массы боеприпаса математической модели с учетом всех поправок.

Испытания ПО баллистики

При испытании модифицированного ПО баллистики тренажера проводилась проверка возвы-

шения реактивной баллистической траектории над линией прицеливания, время полета до рубежей и ветровые и случайные отклонения в моделирующей программе на рассогласование с табличными значениями (табл. 1, 2). 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 данных: $\pm 5 \text{ см}$ и от $\pm 0,005 \text{ с}$ до $\pm 0,05 \text{ с}$, что при размере бронетехники $3,5 \text{ м}$ и ее скорости $4\text{--}6 \text{ м/с}$ дает погрешность координаты Z , например, от пренебрежимых $\pm 2 \dots 3 \text{ см}$ до все еще приемлемых $\pm 20 \dots 30 \text{ см}$ (менее 9% размера цели).

Результаты испытаний моделирования баллистики для РПГ-7 представлены в табл. 5 для гранаты ПГ-7ВМ и дальностей $200\text{--}500 \text{ м}$. Рассогласования Δ с табличными значениями рассчитанного времени подлета, отклонения от ветра и значение баллистического рассеивания (300 испытаний) оказались в пределах допуска. Рассогласования по восходящей и верхней частям траектории (координата Y) находятся на пределе допуска, но на самой главной части – нисходящей – полностью соответствуют ТТЗ.

Таблица 5. Погрешность моделирования траектории ПГ-7ВМ от дальности

Table 5. Error of trajectory simulation ПГ-7ВМ from range

Прицел м	Сантиметры рассогласования Δ превышения траектории ($y-y_0$) с табл. 1, см										Δ ветром (4 м/с) см	Δ врем. долета с	Срединные от- клонения, см	
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500			Вв	Вб
200	-10,1	-7,6	+4,7	+4,1							0,0	-0,091	30,2	33,5
300	-6,7	-0,8	-5,1	-2,4	+4,3	+1,7					-0,1	-0,042	42,9	50,3
400	-8,1	-3,7	+0,5	+1,7	+6,9	-7,3	-4,3	+2,2			-0,3	-0,042	58,2	66,0
500	-5,2	-8,0	-0,9	+3,1	+1,0	-10,5	-4,8	+4,3	+2,8	-3,6	-0,9	-0,047	78,4	81,3

Результаты испытаний моделирования баллистики для РПГ-26 представлены в табл. 6. Рассогласования Δ с табличными значениями рассчитанного времени подлета, превышения

траектории, отклонения от ветра и значение баллистического рассеивания (300 испытаний) полностью оказались в пределах допуска.

Таблица 6. Погрешность моделирования траектории РПГ-26 от дальности

Table 6. Error of trajectory simulation РПГ-26 from range

Прицел м	Сантиметры рассогласования Δ превышения траектории ($y-y_0$) с табл. 2, см					Δ по ветру (4 м/с) см	Δ время долета с	Проверка срединных отклонений, м	
	50	100	150	200	250			Вв	Вб
50	0	+3,4	+1,3			+0,1	+0,003	0,17	0,17
150	-0,3	+2,7	0	+2,4	-0,4	-0,9	-0,003	0,52	0,48
250	+2,6	-1,9	+7,5	+1,5	0	+1,3	+0,005	0,83	0,82

Таким образом, базовая математическая модель внешней баллистики тренажера (2)–(4), частично теоретически обоснованная в [24], с учетом предложенных авторских расширений для поддержки в том числе и реактивной баллистики гранат, получила практическую апробацию и показала свою адекватность.

Выводы

Анализ ПО НИО и ПО баллистики реактивных ИО показал:

1. Возможность оперативной подстройки параметров ИО через обмен информацией ПО НИО с ПО КИО и ПО микшера повышает надежность и реалистичность имитации процесса выстрела и особенно фиксации ошибок во время подготовки/завершения тренировки и проведения выстрела.

2. ПО баллистики, учитывая начальные параметры выстрела (показания прицелов с термодатчиком), параметры всех боеприпасов (начальную скорость, баллистический коэффициент и случайное 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.

3. Для поддержки реакции на боковой ветер на активном участке траектории (когда оперенная граната отклоняется против ветра) введена

отдельная математическая модель и коэффициент ветровой коррекции.

4. Испытания ПО баллистики на погрешность имитации возвышения баллистической кривой реактивного оружия, ее рассеивания и зависимости от бокового ветра показали соответствие требованиям ТТЗ, тренажер прошел военную приемку, что позволяет использовать ПО в современных разработках.

Таким образом, показана актуальность дальнейшего исследования и использования электронных стрелковых тренажеров на базе разработанных и испытанных математических моделей баллистики, особенно благодаря высокой гибкости программного обеспечения, позволяющих повысить реалистичность имитации параметров внешней баллистики, а также благодаря высокой эффективности, быстрой окупаемости и безопасности тренажеров в подготовке личного состава [25–28].

Библиографические ссылки

1. Muñoz J.E., Pope A.T., Velez L.E. Integrating Bio-cybernetic 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. *Bogatynov 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. *Blacker K.J., Pettijohn K. A., Roush G., Biggs A. T.* Measuring Lethal Force Performance in the Lab: The Effects of Simulator Realism and Participant Experience // HUMAN FACTORS. NOV 2021, vol. 63, no. 7, pp. 1141-1155 (article number: 0018720820916975). DOI: 10.1177/0018720820916975.
13. *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>.
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. *Егоров С. Ф., Коробейникова И. В.* Повышение точности акустической мишени за счет использования взвешенных моментов времени // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 2 (24). С. 105–108.
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. *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.
19. *Казаков В. С., Веркиенко Ю. В., Коробейников В. В., Афанасьев Н. Ю.* Оптико-электронные стрелковые тренажеры. Теория и практика. Ижевск : ИПМ УрО РАН, 2007. 260 с.
20. Решение обратной задачи внешней баллистики в информационно-измерительной системе / Афанасьев В. А., Афанасьева Н. Ю., Вдовин А. Ю., Веркиенко Ю. В. // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2008. № 3. С. 104–106.
21. 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.
22. Исследование оптико-электронных регистраторов точки прицеливания стрелковых тренажеров / С. Ф. Егоров, Ю. К. Шелковников, Н. И. Осипов, С. Р. Кизнерцев, А. А. Метелева // Проблемы механики и материаловедения. Труды Института механики УрО РАН. Ижевск, 2017. С. 227–248.
23. *Дмитриевский А. А.* Внешняя баллистика. М. : Машиностроение, 1979. – 479 с.
24. *Коновалов А. А., Николаев Ю. В.* Внешняя баллистика. Ижевск. 2003. – 192 с.
25. *Прекина Т. А., Гвоздев А. К., Мудрик И. А.* Освоение огневой подготовки курсантами МВД в современном мире с применением инновационных технологий // Эпоха науки. 2020. № 23. С. 79–82.
26. *Таков А. З., Курманова М. К.* Применение современных технологий в обучении стрельбе из боевого оружия // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 11-2. С. 412–416. DOI: 10.17513/snt.38398.
27. *Никуфоров П. В., Музафин Р. Р.* Использование стрелковых тренажеров в подготовке сотрудников ОВД // Евразийский юридический журнал. 2020. № 3 (142). С. 275–276.
28. *Ермоленко С. А., Клименко С. С., Курза А. В.* Особенности использования стрелкового тренажера СКАТТ на занятиях по огневой подготовке // Эпоха науки. 2020. № 22. С. 47–49.

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. Blacker K.J., Pettijohn K. A., Roush G., Biggs A. T. Measuring Lethal Force Performance in the Lab: The Effects of Simulator Realism and Participant Experience. *HUMAN FACTORS*. NOV 2021, vol. 63, no. 7, pp. 1141-1155 (article number: 0018720820916975). DOI: 10.1177/0018720820916975.
13. 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>.
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. Egorov S.F., Korobeinikova I.V. *Povyshenie tochnosti akusticheskoi misheni za schet ispol'zovaniya vzveshennykh momentov vremeni* [Increase in accuracy of an acoustic target due to use of the weighed time-points]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2014, no. 2, pp. 105-108 (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. 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.).
19. Kazakov V.S., Verkienko Yu.V., Korobeinikov V.V., Afanas'eva N.Yu. *Optiko-elektronnyye strelkovyye trenazhery. Teoriya i praktika* [Optical-electronic shooting exercise machines. Theory and practice]. *Izhevsk, Institute of mechanics UB RAS*, 2007, 260 p. (in Russ.).
20. 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.).
21. 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.).
22. Egorov S.F., Shelkovnikov Yu.K., Osipov N.I., Kiznertsev S.R., Meteleva A.A. *Issledovanie optiko-elektronnykh registratorov tochki pritselivaniya strelkovykh trenazherov* [Research of optical-electronic registrars of an aiming mark of shooting exercise machines].

Problemy mekhaniki i materialovedeniya. Trudy Instituta mekhaniki UrO RAN [Problems of mechanics and materials science. Works of Institute of mechanics UB RAS]. Izhevsk, 2017, pp. 227-248 (in Russ.).

23. Dmitrievskii A.A. *Vneshnyaya ballistika* [Exterior ballistics]. Moscow, 1979, 479 p. (in Russ.).

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

25. Prekina T.A., Gvozdev A.K., Mudrik I.A. *Osvoenie ognevoi podgotovki kursantami MVD v sovremenom mire s primeneniem innovatsionnykh tekhnologii* [Development of fire training by students of the MIAffairs in the modern world using innovative technologies]. *Epokha nauki*, 2020, no. 23, pp. 79-82 (in Russ.).

26. Takov A.Z., Kurmanova M.K. *Primenenie sovremennykh tekhnologii v obuchenii strel'be iz bo-*

evogo oruzhiya [Application of modern technologies in training in firing from combat weapons]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2020, no. 11-2, pp. 412-416 (in Russ.). DOI: 10.17513/snt.38398.

27. Nikiforov P.V., Muzafin R.R. *Ispol'zovanie strelkovykh trenazherov v podgotovke sotrudnikov OVD* [Use of shooting simulators in training of IAO]. *Evrasiiskii yuridicheskii zhurnal*, 2020, no. 3 (142), pp. 275-276 (in Russ.).

28. Ermolenko S.A., Klimenko S.S., Kirza A.V. *Osobennosti ispol'zovaniya strelkovogo trenazhera SKATT na zanyatiyakh po ognevoi podgotovke* [Peculiarities of SCATT shooting simulator use in fire training classes]. *Epokha nauki*, 2020, no. 22, pp. 47-49 (in Russ.).

Shooting Simulator «Inhibitor»: Mathematical Support for Ballistics Rocket 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; Associate Professor, Kalashnikov ISTU

Yu. K. Shelkovnikov, DSc in Engineering, Professor; Chief Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS;

I. G. Kornilov, PhD in Engineering, Associate Professor; Kalashnikov ISTU

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

V. A. Afanasyev, PhD in Engineering; Associate Professor, Kalashnikov ISTU

Mathematical support for the calculation of external ballistics for rocket weapons taking into account external factors and for the adjustment of weapon parameters of the optical-electronic tactical simulator for small arms "Inhibitor" developed by the Institute of Mechanics of the UdmFRC UB RAS and Computer facilities department of Kalashnikov ISTU jointly with «Kalashnikov» Concern JSC » is described.

A tactical and technical task is given to expand the functional capabilities of weapon simulators with support for adjusting the recoil force (50% of actual) and loading real sounds of a shot (60 % of actual volume), checking magazine sensors, piles (more than 5 degrees to the left and to the right) and safety fuse (for automatic and single firing), settings of trigger break limits and limits of readings of sights sensors (mechanical, optical and night). The interactive visual form allows you to check sensor readings and configure parameters for each simulator.

To support reactive ballistics of RPG-7 and RPG-26, which is distinguished by the active section of the trajectory and its deviation against the wind, as well as a significant dependence on temperature and high random dispersion of grenades, an extension of the mathematical model is introduced to empirically account these factors and new wind models. Results of software tests for error of calculation of characteristics of reactive ballistic trajectory are given.

It was concluded that further research and development of electronic shooting simulators were promising due 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), mathematical model, aiming devices, rocket ballistics, ammunition, grenade.

Получено: 15.02.22