

УДК 623.7.014

doi: 10.53816/20753608\_2025\_3\_35

**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ  
ОТ ПРОТИВОТАНКОВЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ РАКЕТ  
С УЧЕТОМ ОШИБОК ПРИЦЕЛИВАНИЯ  
НЕУПРАВЛЯЕМЫХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ**

**A SIMULATION MODEL OF PHYSICAL PROTECTION OF OBJECTS  
FROM ANTI-TANK GUIDED MISSILES TAKING  
INTO ACCOUNT THE AIMING ERRORS OF UNGUIDED MEANS  
OF PROTECTION**

*По представлению чл.-корр. РАРАН А.М. Сазыкина*

*А.Н. Глушков, П.С. Маргарян, Я.А. Камзельский*

*ВУНЦ ВВС «ВВА» им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина*

*A.N. Glushkov, P.S. Margaryan, Ya.A. Kamzelsky*

Приводится модель физической защиты наземных объектов вооружения, военной и специальной техники от противотанковых управляемых ракет. Рассматривается случай, когда для защиты объектов применяются противоракеты комплексов активной защиты с неуправляемым полетом до точки подрыва боевой части. Ее инициирование осуществляется с помощью неконтактного взрывателя.

**Ключевые слова:** противоракета, противотанковая управляемая ракета, боевая часть, поражающий элемент, имитационное моделирование, вероятность поражения.

A model of physical protection of ground-based weapons, military and special equipment from short-range anti-tank guided missiles is presented. The case is being considered when anti-missiles of active protection complexes with uncontrolled flight to the point of detonation of a warhead are used to protect objects.

**Keywords:** anti-missile, anti-tank guided missile, warhead, striking element, simulation, probability of defeat.

В настоящее время проблема защиты объектов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) от высокоточного оружия (ВТО) приобрела особую остроту. С одной стороны это связано с большим количеством видов систем ВТО стоящих на вооружении армий стран НАТО, а с другой с непрерывным наращиванием их боевых возможностей за счет совершенствования характеристик систем и принятия на вооружение новых образцов [1]. По данным [2] современный

парк ВТО США и их союзников насчитывает более 1,5 млн единиц образцов вооружения, что обуславливает актуальность проведения работ, связанных с созданием средств защиты от них. Одним из перспективных направлений решения этой задачи является создание комплексов активной защиты (КАЗ). Принцип их работы заключается в физическом воздействии на атакующий боеприпас (АБ) полем поражающих элементов (ПЭ), образующихся в результате подрыва

боевой части (БЧ) противоракеты (ПР), выстреливаемой в направлении на цель, которая обнаруживается и сопровождается лазерно-локационным датчиком (ЛД) КАЗ. Для поражения АБ поле ПЭ должно обладать энергией, превышающей порог поражения.

Основу проектирования КАЗ (обоснование тактико-технических требований (ТТТ) и разработка технических путей их практической реализации) составляет математическое моделирование. Из-за большого количества типов ВТО, защищаемых объектов и возможных боевых ситуаций, данная задача пока не имеет законченного решения. Цель настоящей работы — разработка имитационной модели физической защиты наземных объектов ВВСТ от противотанковых управляемых ракет (ПТУР) с помощью неуправляемых средств поражения КАЗ с учетом ошибок их прицеливания. Принято, что ПТУР применяются с коротких дистанций (например, диверсионными разведывательными группами (ДРГ), действующими из засад). В качестве объектов защиты рассматриваются отдельные автомобили из колонны, включающей несколько машин, осуществляющих доставку специальных грузов (боеприпасов, запасных частей, горюче-смазочных материалов и т.д.) в части боевого применения. В качестве поражающего фактора рассматривается осколочное действие ПЭ ПР, инициирующее детонацию БЧ ПТУР.

Структурная схема имитационной модели физической защиты наземных объектов ВВСТ от противотанковых управляемых ракет представлена на рис. 1.

Модель включает в себя блок исходных данных  $I$ , а также блоки оценки параметров осколочного поля ПЭ, вероятности инициирования БЧ ПТУР, числовых характеристик ошибок прицеливания, обусловленных точностными характеристиками информационной подсистемы (ИП) КАЗ и вероятности поражения ПТУР соответственно 2–5.

Оцениваемыми динамическими характеристиками поля ПЭ являются:  $V_{д1}$  — результирующая скорость на переднем крае поля ПЭ;  $V_{д2}$  — результирующая скорость на заднем крае поля ПЭ;  $\gamma_1$  — передний динамический угол осколочного поля;  $\gamma_2$  — задний динамический угол осколочного поля;  $V_{д}$  — средняя результирующая скорость поля ПЭ. Их расчет выполняется в блоке 2 с использованием методики МГТУ им. Н.Э. Баумана «Ливень» [3]. Отличие предлагаемой модели состоит лишь в том, что в ней рассматривается воздушный взрыв, а в методике «Ливень» наземный, остальные допущения и ограничения идентичны. Используемые исходные данные представлены в таблице.

Для формализации значений числовых характеристик ошибок прицеливания, использованы результаты работ [5, 6], где проведены исследования потенциальной точности прицеливания ПР в АБ в зависимости от точности измерения его координат. Исследования выполнены для атакующих боеприпасов, оснащенных оптическими головками самонаведения (ОГС). Принято, что для их пеленгации в КАЗ используется лазерно-локационный датчик,



Рис. 1. Структурная схема имитационной модели физической защиты объектов ВВСТ от противотанковых управляемых ракет

Исходные данные

Категория	Наименование параметра	Значение
Параметры ПТУР	Уязвимый элемент	БЧ
	Скорость полета, м/с	600
	Дюралевый эквивалент, м	$3 \cdot 10^{-3}$
Параметры БЧ ПТУР	Тип БЧ	Кумулятивная
	Вид БЧ	Цилиндр с радиусом основания $5 \cdot 10^{-2}$ м и высотой 0,2 м
Параметры ПР	Скорость полета, м/с	300
	Калибр, мм	57
	Максимальная дальность поражения, м	10
	Минимальная дальность поражения, м	1
Параметры ПЭ БЧ ПР	Тип БЧ	Осколочная
	Количество ПЭ, шт.	980
	Тип ПЭ	Куб
	Начальная скорость ПЭ, м/с	1301
	Линейный размер ПЭ, м	$5 \cdot 10^{-3}$
	Плотность материала ПЭ, г/см <sup>3</sup>	17,5
	Параметр формы	1,5
	Передний статистический угол разлета ПЭ, град.	10
	Задний статистический угол разлета ПЭ, град.	110
	Усредненный коэффициент аэродинамического сопротивления	1,21
Характеристики заряда БЧ ПР	Тип ВВ	Окфол
	Количество окружных сечений осколочной оболочки	30
	Плотность ВВ, г/см <sup>3</sup>	1,75
	Скорость детонации, м/с	8700
Параметры информационной подсистемы КАЗ	Длина волны зондирующего излучения КАЗ, мкм	0,95
	Дальность локации, м	50–200
	Эффективный радиус излучающей апертуры, м	0,2
	Эффективный радиус пространственной когерентности зондирующего излучения, м	$10^{-2} \div a \rightarrow \infty$
	Длительность зондирующего импульса, с	$10^{-9} - 10^{-8}$
	Время когерентности зондирующего импульса, с	$10^{-9}$
	Фокусное расстояние приемной апертуры КАЗ, м	0,05
	Эффективный радиус приемной апертуры КАЗ, м	0,3
	Эффективный размер приемной матрицы ЛД КАЗ, м	0,005
Параметры ОГС ПТУР	Эффективный радиус приемной апертуры ПТУР, м	3
	Эффективный радиус отражателя, м	0,005
	Фокусное расстояние приемной апертуры ОГС, м	0,05
Параметры атмосферы	Плотность воздуха, кг/см <sup>3</sup>	1,225

работающий по бликовому сигналу, структура которого в плоскости наблюдения КАЗ формализована на основе метода Гюйгенса — Кирхгофа [6]. Для нее с использованием метода максимального правдоподобия [7] получены выражения для числовых характеристик ошибок измерения лазерно-локационным датчиком угловых координат и дальности до АБ. Установлено, что упомянутые ошибки распределены по нормальному закону и имеют нулевое среднее [5]. Значения их дисперсий  $\sigma_r^2$  и  $\sigma_\phi^2$  оценивались в блоке 4 по формулам:

$$\sigma_r^2 \approx \frac{\left(\frac{C}{\Delta f}\right)^2}{2}; \quad \sigma_\phi^2 = \frac{a_n^2}{2l_0^2},$$

где  $\Delta f = \frac{1}{\tau_u} + \frac{1}{\tau_k}$ ;  $a_n = a_\phi \sqrt{\xi_2}$  — эффективный радиус изображения отраженного ОГС ПТУР сигнала в плоскости наблюдения ЛД;  $a_\phi$  — эффективный размер приемной матрицы ЛД КАЗ;

$$\xi_2 = \frac{a_n^2}{a_\phi^2} \left[ \frac{q_{in}^2}{\xi_1} + \frac{a^4 l_\phi^2}{a_n^4 L^2} \left( \Omega_L^{-2} + \frac{a_n^2}{a^2} \right) \right];$$

$$\Omega_\phi = \frac{ka_\phi^2}{l_\phi}; \quad q_{in} = 1 - \frac{l_\phi}{f_\phi} + \frac{l_\phi}{L};$$

$$\Omega_L = \frac{ka^2}{L}; \quad \Omega_o = \frac{ka_o^2}{l_0}; \quad \Omega_n = \frac{ka_n^2}{L};$$

$$q_u = 1 - \frac{L}{F};$$

$$v = \Omega_L^{-2} \left( 1 + \left( \frac{a}{\rho_k} \right)^2 \right) + \frac{2\sigma_\alpha^2}{a^2} + q_u^2;$$

$$\Omega_L = \frac{ka^2}{L}; \quad \Omega_o = \frac{ka_o^2}{l_0}; \quad \Omega_n = \frac{ka_n^2}{L};$$

$$q_u = 1 - \frac{L}{F}; \quad \xi_1 = 1 + \frac{a_n^2}{a^2 v_{11}}; \quad v_1 = v + q_u^2;$$

$$v_2 = -q_u \Omega_L; \quad v_3 = \frac{v_2}{v_1}; \quad v_4 = \frac{L}{l_0};$$

$$v_5 = \frac{v_3^2}{v_1^{-1} + \frac{a^2}{a_o^2}} + \frac{a^2}{(a_o^2 \Omega_L^2)} + 1 - \frac{v_2^2}{v_1 \Omega_L^2};$$

$$v_6 = \frac{v_3}{v_1} \left( v_1^{-1} + \frac{a^2}{a_o^2} \right)^{-1} - \frac{v_2}{v_1 \Omega_L}; \quad v_7 = \frac{v_3 v_4}{\left( v_1^{-1} + \frac{a^2}{a_o^2} \right)};$$

$$v_8 = \left( \frac{L}{l_0} \right)^2 v_5^{-1} + \frac{a_c^2}{a_o^2} \left( 1 + \frac{a_o^2}{a_c^2} \right); \quad v_9 = -1;$$

$$v_{10} = \frac{v_7}{v_5} \left( \frac{L}{l_0} \right); \quad v_{11} = \frac{v_{10}^2 - v_7^2}{v_8}; \quad v_{12} = \frac{v_9 v_{10}}{v_8};$$

$$v_{13} = \frac{v_6}{v_5} \left( \frac{v_{10} L}{v_8 l_0} - v_7 \right) + \frac{v_4}{1 + \frac{v_1 a^2}{a_o^2}};$$

$$\Delta f \approx \tau_u^{-1} \left( 1 + \frac{\tau_u}{\tau_u + \tau_k} \right)^{-1},$$

$L$  — дальность локации ЛД КАЗ;  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  — длина волны зондирующего излучения ЛД;  $F$  — радиус кривизны волнового фронта зондирующего излучения ЛД;  $f$  — фокусное расстояние приемного объектива ОГС ПТУР;  $a_o, a_c$  — эффективные радиусы отражателя и входной апертуры ОГС, соответственно;  $C$  — скорость света;  $\tau_u, \tau_k$  — длительность и время когерентности сигнала ЛД;  $a, a_n$  — эффективные радиусы излучающей апертуры и приемного объектива ЛД;  $\sigma_\alpha^2$  — дисперсия ошибки наведения зондирующего излучения ЛД на ОГС ПТУР;  $\rho_k$  — эффективный радиус пространственной когерентности зондирующего излучения ЛД КАЗ;  $l_0$  — положение плоскости наблюдения приемного канала ЛД КАЗ.

При защите объектов ВВСТ от ПТУР с помощью КАЗ в качестве уязвимого элемента (агрегата) атакующего боеприпаса целесообразно рассматривать его БЧ, которая обычно является кумулятивной [8, 9] и уязвимой к осколочному воздействию. В этом случае вероятность поражения ПТУР ПР (эффективность защиты объекта ВВСТ с помощью ПР КАЗ), определяемая в блоке 5, определяется выражением [10]:

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, y, z) f(x, y, z) dx dy dz, \quad (1)$$

где функции  $G(\cdot)$  и  $f(\cdot)$  соответственно определяются координатным законом рассеяния точек подрыва БЧ ПР и координатным законом поражения БЧ ПТУР.

Для координатного закона рассеяния точек подрыва БЧ ПР, определяемого эллипсоидом равной плотности:

$$\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} = k^2,$$

где  $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$  — дисперсии ошибок измерения координат ПТУР ЛД КАЗ;

$$\sigma_x^2 = \sigma_r^2 [\sigma_\theta^2 (\cos \theta \cos \varphi)^2 + \sigma_\varphi^2 (\sin \theta \sin \varphi)^2];$$

$$\sigma_y^2 = \sigma_r^2 [\sigma_\theta^2 (\sin \theta \cos \varphi)^2 + \sigma_\varphi^2 (\cos \theta \sin \varphi)^2];$$

$$\sigma_z^2 = \sigma_r^2 \sigma_\theta^2 \cos^2 \theta$$

и координатного закона поражения БЧ ПТУР, определяемого выражением:

$$f(x, y, z) = 1 - \exp\{-\Pi(x, y, z)P_n S_y\};$$

$$\Pi(x, y, z) = N [2\pi r^2(x, y, z)(\cos \gamma_1 - \cos \gamma_2)^2]^{-1}.$$

Выражение для оценки вероятности поражения БЧ ПТУР ПР после интегрирования (1) принимает следующий вид:

$$W = 1 - \exp \times \left\{ - \left( \frac{2P_n N S_y' (\cos \gamma_1 - \cos \gamma_2)^{-2}}{[1 + \sigma_r^2 / r_0^2 \cos^2 \theta + \sigma_\theta^2 \sigma_r^2 / r_0^2 \sin^2 \theta]} \right)^{1/2} \right\}, \quad (2)$$

$P_n$  — вероятность инициирования взрывчатого вещества БЧ ПТУР одним ПЭ ПР;

$S_y' = S_y / (2\pi r_0^2)$ . Значение  $P_n$  оценивается в блоке 3 по методике [4]:

$$P_n = \begin{cases} 1 & \text{при } V_c \geq 1,15V_{0,5}; \\ \frac{0,5 [V_c - (V_{0,5} - \Delta V)]}{\Delta V} & \text{при } V_{0,5} - \Delta V < V_c < V_{0,5} + \Delta V; \\ 0 & \text{при } V_c \leq V_{0,5} - \Delta V, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\Delta V \approx 0,15V_{0,5}$ ;  $V_{0,5}$  — скорость ПЭ, при которой происходит инициирование заряда с вероятностью  $P_n = 0,5$ , задаваемой выражением [4]:

$$V_{0,5} = V_r (e^{-0,19\xi} + 0,19^{0,75\xi}) \frac{1}{K'_\alpha}. \quad (4)$$

Здесь  $V_r = \frac{2550}{\Phi^{1/3} \cdot m_0^{2/9}}$ , м/с — скорость ПЭ,

обеспечивающая инициирование открытого (полого) заряда БЧ с вероятностью  $P_n = 1$ ;  $K'_\alpha$  — коэффициент, учитывающий угол подхода ПЭ к оболочке заряда  $\alpha$ , отсчитываемый от ее поверхности ( $K'_\alpha = \sin^{2/3} \alpha$  при  $10^\circ < \alpha < 90^\circ$ ;  $K'_\alpha = 0$  при  $\alpha \leq 10^\circ$ );  $\xi = \frac{h_{эд} \Phi}{m_0^{1/3}}$ ;  $h_{эд}$  — дюралевый эквивалент суммарной толщины оболочки заряда и экрана. Выражения (3) и (4) справедливы при  $m_0 \geq 2$  г, а ограничением для формулы (2) является условие  $I_{y6} > r_0$ , где  $I_{y6}$  — убойный интервал осколка, дистанция на которой осколок сохраняет способность к поражению, определяется по методике, приведенной в [3].

Скорость встречи (соударения) ПЭ и ПТУР в соответствии с [4] определяется законом экспоненциального затухания скорости осколка в полете:

$$V_c = V_0 e^{-Ar},$$

где  $V_0$  — начальная скорость ПЭ;

$r$  — расстояние от точки подрыва БЧ ПР до ПТУР;

$A$  [1/м] — баллистический коэффициент, характеризующий потерю скорости осколка на пути в 1 м.

$$A = \frac{\rho_b C_x \Phi}{2\gamma_0^{2/3} m_0^{1/3}},$$

$\rho_b$  — плотность воздуха вдоль траектории ПЭ;

$C_x$  — коэффициент лобового сопротивления;

$\gamma_0$  — плотность материала осколка.

Таким образом, разработана имитационная модель физической защиты объектов ВВСТ от ПТУР с помощью неуправляемых ракет КАЗ с учетом ошибок их прицеливания.

Для валидации проведем анализ выражения (2). В нем обращает на себя внимание тот факт, что эффективность защиты объектов ВВСТ от ПТУР с помощью КАЗ зависит от когерентных свойств зондирующего излучения ЛД КАЗ (рис. 2).

Упомянутый показатель тем хуже, чем ниже пространственная и временная когерентность

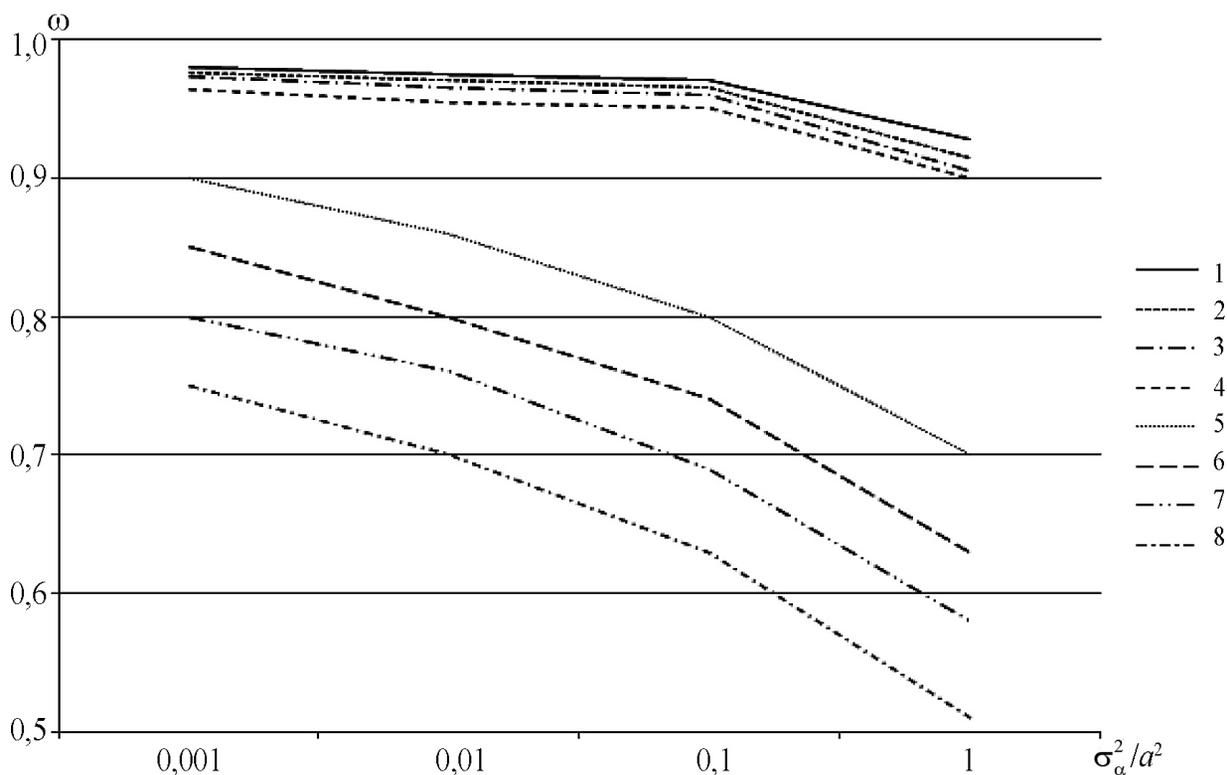


Рис. 2. Зависимость вероятности поражения ПТУР от параметров информационной подсистемы КАЗ: 1, 2, 3, 4,  $\tau_k = \infty$  (когерентный сигнал);  $a/\rho_k = 0; 0,1; 0,5; 10$ ; 5, 6, 7, 8;  $\tau_k = 0$  (некогерентный сигнал);  $a/\rho_k = 0; 0,1; 0,5; 10$

сигналов зондирующего излучения, а также чем хуже точность сопровождения ПТУР ЛД КАЗ. Так для когерентного лазерного сигнала ухудшение пространственной когерентности с  $\rho_k = \infty$  до  $\rho_k = 0,1$  приводит к уменьшению вероятности поражения ПТУР с 0,98 до 0,96. Одновременное ухудшение временной когерентности до 0 приводит к дополнительному снижению вероятности поражения до 0,75. Наряду с отмеченным, выявлена отчетливая связь вероятности поражения ПТУР с ошибками сопровождения цели ЛД КАЗ. Увеличение относительной дисперсии ошибки сопровождения ПТУР по угловым координатам от 0 до  $\sigma_\alpha^2/a^2 = 1$  для когерентного излучения вызывает снижение вероятности поражения ПТУР с 0,98 до 0,9, а для некогерентного излучения с 0,9 до 0,51. Объяснение этим закономерностям простое: ухудшение когерентных свойств зондирующего излучения ЛД КАЗ, а также точности сопровождения им ПТУР приводит к увеличению зоны неопределенности в которой находится оцениваемый параметр локационного сигнала, что приводит к увеличению дис-

персии оценки его значения и вызывает снижение точности прицеливания ПР в ПТУР. Следствием этого является снижение вероятности поражения ПТУР ПР. Данный результат соответствует физическому содержанию рассматриваемой задачи, что подтверждает его правильность. Остальные закономерности (зависимости динамических характеристик ПЭ и образованного ими поля от параметров ПР и ВВ ее БЧ) соответствуют известным, что дает основание утверждать о правильности функционирования разработанной модели в целом. В пользу адекватности разработанной модели говорит следующее.

1. Модель процесса активной защиты опирается на основные положения широко апробированной методики МГТУ им. Н.Э. Баумана «Ливень» [10] с известными ограничениями и границами применимости.

2. Учет ошибок прицеливания ПР в ПТУР выполнен с использованием результатов оценивания точности пеленгации ПТУР методами лазерной локации, полученными в [6] на основе

метода максимального правдоподобия [7], который также имеет известные ограничения и границы применимости, не выходящие за границы применимости методики «Ливень».

Таким образом, разработана имитационная модель физической защиты объектов ВВСТ от ПТУР с помощью неуправляемых ракет КАЗ с учетом ошибок их прицеливания. Модель представляет собой систему уравнений, связывающих эффективность активной защиты объектов с параметрами средств комплекса защиты, атакующего боеприпаса и геометрической схемы их взаимодействия. Она позволяет проводить теоретические исследования эффективности КАЗ в зависимости от упомянутых параметров и определять тактико-технические требования к комплексам.

#### Список источников

1. Сильников М.В., Лазоркин В.И. Активная защита мобильных объектов. СПб., 2020. 488 с.
2. Утемов С.В. Зарубежные неавтономные оптико-электронные системы телеуправления высокоточным оружием: монография. Воронеж: Научная книга, 2021. 214 с.
3. Балаганский И.А., Мержиевский Л.А. Действие средств поражения и боеприпасов: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. 408 с.
4. Дерябин П.Н., Ганин А.А., Горобец А.А., Колмаков К.М. и др. Действие артиллерийских боеприпасов: учеб. пособие. Пенза: ПАИИ, 2004. 247 с.
5. Глушков А.Н., Маргарян П.С. Потенциальная точность прицеливания в атакующие ракеты с оптическими головками самонаведения // Труды Михайловской военной артиллерийской академии. 2025. Ч. 1. С. 165–173.
6. Глушков А.Н., Кравцов Р.Н., Митрофанов А.Л. Модель локационного наблюдения ОЭС // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2006. № 7. С. 23–27.
7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1989. 659 с.
8. Курепин А.Е., Кузнецов И.А. Основы проектирования боевых частей управляемых ракет; под ред. И.О. Артамонова. Дзержинск: АО «ГосНИИмаш», 2018. 368 с.
9. Лихтеров В.М., Панов В.В., Кудрасов В.К. и др. Высокоточное оружие зарубежных стран. Том 1 «Противотанковые ракетные комплексы» (обзорно аналитический справочник), 2008. 563 с.
10. Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф. и др. Средства поражения и боеприпасы; под ред. Селиванова В.В. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 978 с.