

Научная статья
УДК 623.2

Унифицированная методика оценки эффективности поражения наземных целей боеприпасами

Александр Иванович Буравлев

Аннотация. Статья является продолжением темы статьи «Развитие зонного подхода к оценке эффективности поражения наземных целей боеприпасами»¹, опубликованной в журнале «Вооружение и экономика» №2(72) в 2025 году. В данной статье предложена унифицированная методика оценки эффективности поражения наземных целей боеприпасами, как с круговыми, так и с прямоугольными зонами поражения на основе двух- и трехступенчатых кусочно-линейных моделей, описывающих реальные процессы поражения целей. Достоинством предлагаемой модели является возможность оперативного получения интервальной оценки для вероятности поражения одиночной цели. Сравнение получаемого результата с результатом расчета по точной модели показывает ее 90% сходимость. Разработанная методика может быть использована для создания единого научно-методического аппарата оценки боевой эффективности современных комплексов вооружения.

Ключевые слова: элементарные, одиночные и групповые цели; функция накрытия цели зоной поражения; двухступенчатая кусочно-линейная аппроксимация функции накрытия цели зоной поражения; вероятность поражения размерной цели

Для цитирования: Буравлев А.И. Унифицированная методика оценки эффективности поражения наземных целей боеприпасами // Вооружение и экономика. 2026. №1(75). С. 23-28.

Original article

Unified Methodology for the Effectiveness Assessment of Ground Targets Hitting by Ammunition

Aleksandr I. Buravlev

Abstract. The article is a continuation of the follow-up «Development of a Zone Approach to the Effectiveness Assessment of Ground Target Hitting by Ammunition» article published in the «Armament and Economics» journal, No.72(2), 2025. This article proposes a unified methodology of the effectiveness assessment of ground targets hitting by both circular and rectangular damage zones ammunitions. This methodology is based on two- and three-steps piecewise linear models that describe the real processes of targets hitting. The advantage of the proposed model is the ability to obtain quickly an interval estimate of single target hitting probability. A comparison of the obtained result with the calculation result based on the exact model shows its 90% convergence. The developed methodology can be used to create a unified scientific and methodological apparatus for the combat effectiveness assessment of modern weapons systems.

Keywords: elementary, single and group targets; target coverage function; two-stages piecewise linear approximation of the target coverage function; dimensional target hitting probability

For citation: Buravlev A.I. Unified Methodology for the Effectiveness Assessment of Ground Targets Hitting by Ammunition. Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics. 2026; 75(1): 23-28. (In Russ.).

Объектами действия современных боеприпасов (снарядов, ракет, бомб, гранат и пр.) являются объекты войсковой (вооружение и военная техника, позиции размещения войсковых подразделений, склады боеприпасов и ГСМ) и промышленной инфраструктуры военного и гражданского назначения (здания, сооружения, линии связи, трубопроводы, энергосети и др.) [1-3]. Каждый такой объект включает в себя некоторую совокупность элементарных целей (ЭЦ), конструктивно, функционально или организационно связанных между собой [1-5]. Элементарная цель представляет собой простейший объект, имеющий пренебрежимо малые размеры и только два состояния: работоспособное и неработоспособное. Поражение ЭЦ состоит в переводе ее в неработоспособное состояние.

По количеству элементарных целей и характеру их связей в составе объекта принято различать одиночные, групповые и площадные цели.

¹ Буравлев А.И. Развитие зонного подхода к оценке эффективности поражения наземных целей боеприпасами // Вооружение и экономика. 2025. №2(72). С. 25-36.

Одиночные цели имеют в своем составе хотя бы одну ЭЦ и определенные размеры. Предполагается, что для одиночных размерных целей распределение ЭЦ внутри их является «статистически» равномерным [1]. Поражение одиночной цели возникает в случае поражения хотя бы одной ЭЦ в его составе.

Все объекты поражения имеют различную геометрическую форму и чаще всего могут быть представлены своими проекциями в плоскости стрельбы прямоугольником или набором прямоугольников определенных размеров в прямоугольной системе координат Π_{xz} с центром в точке симметрии Π (рисунок 1).

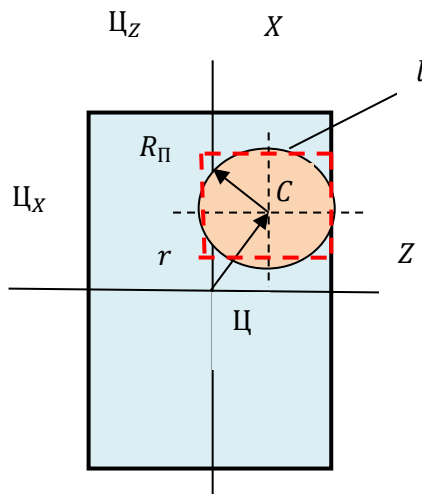


Рисунок 1 – Геометрические формы объектов и зон поражения

Зоны поражающего действия артиллерийских снарядов, ракет и авиационных бомб имеют вид круга или эллипса, которые в расчетных методиках заменяются квадратом или прямоугольником. Размеры прямоугольной зоны поражения определяются ее длиной и шириной l_x, l_z , а круговой зоны поражения радиуса R_{Π} (рисунок 1).

При прицеливании по объекту расчетная точка попадания снаряда (точка прицеливания), как правило, совмещается с центром цели, хотя может быть выбрана и любая другая точка цели. Вследствие рассеивания снарядов и бомб фактическая точка попадания снаряда в цель отклоняется от точки прицеливания на величину промаха $r = \sqrt{r_x^2 + r_z^2}$.

Условием попадания снаряда в зону цели являются неравенства:

$$r_x < \Pi_x/2; r_z < \Pi_z/2; r < R_{\Pi},$$

а условием поражения цели полное или частичное ее покрытие зоной поражения.

В работах [1-5] приводятся расчетные формулы для оценки площади накрытия прямоугольных и круговых целей соответственно прямоугольными и круговыми зонами поражения и расчета вероятности поражения этих целей. Расчетные методики накрытия прямоугольных зон поражения разработаны Ю.Мильграмом и В.Ерохиным и подробно изложены в работе [1].

Здесь мы рассмотрим методику оценки вероятности поражения прямоугольной цели при накрытии ее круговой зоной поражения, которая является наиболее сложной по используемой расчетной схеме. В основе методики используются трехступенчатая кусочно-линейные аппроксимации координатного закона поражения $G(R, \varphi)$ и двухступенчатая аппроксимации условного закона поражения, характеризующего среднюю долю накрытия цели $V(R_{\Pi}, \Pi) = \min(M[S_{\Pi}]/S_{\Pi}; 1)$ зоной поражения боеприпаса [4; 5].

С помощью трехступенчатой аппроксимации координатного закона поражения $G(R)$ можно рассчитать среднее квадратическое значение радиуса поражения $\hat{R}_{\Pi}$ по экспериментальным и экспертным данным о степени поражения элементарных целей (ЭЦ) определенным боеприпасом (таблица 1).

Таблица 1 – Экспертно-экспериментальные данные о характеристиках поражения ЭЦ

Радиус поражения цели с заданной степенью ущерба в %, м	R_1	$R_{0,5}$	R_0
	4	10	16
Условная вероятность поражения ЭЦ $G(R)$	1,0 ... 0,95	0,55 ... 0,45	0,05 ... 0

Из таблицы следует, что в зоне поражения на расстоянии от точки подрыва снаряда $R_1 \leq 4$ м не менее 95% ЭЦ поражается по заданному типу (например, уничтожены); на расстоянии $R_{0,5} \leq 10$ м поражается не более 50% ЭЦ, а на расстоянии $R_0 > 16$ м не поражается ни одна элементарная цель.

По данным таблицы 1 можно рассчитать среднеквадратическое значение радиуса зоны поражения:

$$\hat{R}_\Pi = \sqrt{\frac{\bar{S}_\Pi}{\pi}} = \sqrt{\frac{R_{0,5}^2}{3} + \frac{R_1^2 + R_{0,5}(R_1 + R_0) + R_0^2}{6}} \quad (1)$$

и среднее значение условной вероятности поражения ЭЦ в этой зоне:

$$\bar{G} = \frac{R_1 + 2R_{0,5} + R_0}{4\hat{R}_\Pi}. \quad (2)$$

Методика расчета указанных параметров приведена в работе автора².

Проведенные автором исследования показали [4; 5], что зависимость функции накрытия цели зоной поражения (прямоугольной или круговой) может быть с достаточной для практики точностью аппроксимирована двухступенчатой кусочно-линейной (трапецевидной) функцией накрытия по каждой координатной оси:

$$V_X(x) = \begin{cases} V_{Xmax}, & 0 \leq x < (\Pi_X - l_X)/2 \\ a_0 - a_1 x, & (\Pi_X - l_X)/2 \leq x < (\Pi_X + l_X)/2 \\ 0, & x \geq (\Pi_X + l_X)/2 \end{cases} \quad (3)$$

где: $V_{Xmax} = \min(l_X/\Pi_X; 1)$ – максимальное перекрытие линейного размера цели линейным размером зоны поражения;

$a_0 = V_{Xmax}/2 \cdot (1 + \Pi_X/l_X) = (1 + V_{Xmax})/2$; $a_1 = V_{Xmax}/l_X$ – коэффициенты аппроксимации функции накрытия.

График трапецевидной функции накрытия показан на рисунке 2.

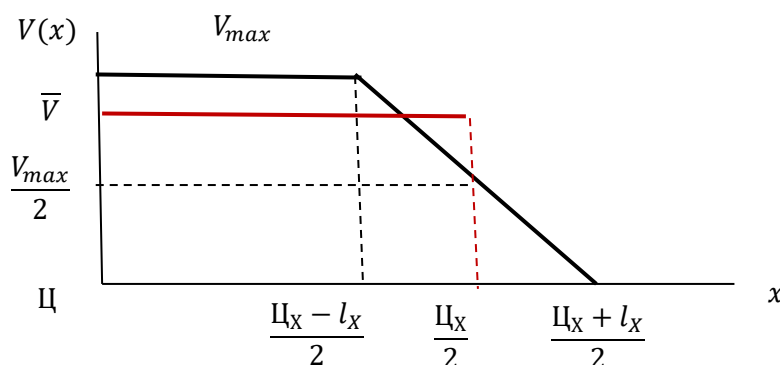


Рисунок 2 – Трапецевидная аппроксимация функции накрытия цели зоной поражения по координатной оси Π_X

² Буравлев А.И. Развитие зонного подхода... Указ. соч.

Для круговой зоны с радиусом поражения R_{Π} ее размеры приводятся к эквивалентной по площади квадратной зоне со сторонами:

$$l_X = l_Z = \sqrt{\pi} R_{\Pi}.$$

Величина площади накрытия цели зоной поражения является случайной с учетом рассеивания снарядов. Для определения математического ожидания функции накрытия рассчитывается интеграл:

$$\bar{V}_X = 2 \int_0^{l_X/2} V_X(x) \varphi(x) dx = 2[I_1 + I_2 - I_3], \quad (4)$$

где: $\varphi(x) = 1/\sigma_X \sqrt{2\pi} \exp(-x^2/2\sigma_X^2)$ – функция рассеивания точек попадания снаряда по координатной оси относительно точки прицеливания (центра цели).

Частные интегралы, входящие в (4), рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_0^{(l_X - l_X)/2} V_{Xmax} \varphi(x) dx = V_{Xmax} \Phi_0 \frac{l_X - l_X}{2\sigma_X}; \\ I_2 &= \int_{(l_X - l_X)/2}^{l_X/2} a_0 \varphi(x) dx = \frac{(1 + V_{Xmax})}{2} \left[\Phi_0 \frac{l_X}{2\sigma_X} - \Phi_0 \frac{l_X - l_X}{2\sigma_X} \right]; \\ I_3 &= a_1 \int_{(l_X - l_X)/2}^{l_X/2} x \varphi(x) dx = V_{Xmax} \frac{\sigma_X}{l_X} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[\exp\left(-\frac{(l_X - l_X)^2}{8\sigma_X^2}\right) - \exp\left(-\frac{l_X^2}{8\sigma_X^2}\right) \right]; \end{aligned} \quad (5)$$

где: $\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ – интеграл вероятностей.

Аналогичное выражение получается для средней доли перекрытия цели по координатной оси $\bar{V}_Z$.

Для определения численных значений интеграла вероятностей $\Phi_0(x)$ целесообразно использовать приближенную аналитическую формулу³:

$$\Phi_0(x) \approx \frac{\sqrt{1 - \exp\left(-\frac{2}{\pi} x^2\right)}}{2}; \quad \Phi_0(-x) = -\Phi_0(x). \quad (6)$$

Погрешность расчета $\Phi_0(x)$ с использованием данной функции не превосходит 1%.

Общее перекрытие площади цели зоной поражения рассчитывается как произведение линейных перекрытий:

$$\bar{V}_{\Pi} = \bar{V}_X \bar{V}_Z. \quad (7)$$

С зоной поражения связан показатель ее могущества $\bar{G}$, характеризующий условную вероятность поражения цели по определенному типу при накрытии ее зоной поражения боеприпаса [4; 5]. Поэтому условная вероятность поражения цели при ее накрытии зоной поражения будет равна:

$$\bar{W}_{\Pi} = \bar{G} \bar{V}_{\Pi}. \quad (8)$$

Полученные выражения для средней доли перекрытия цели зоной поражения (4-8) являются достаточно сложными для оперативных расчетов. Однако их можно упростить. Упрощение состоит в осреднении функций накрытия $V_X(x)$, $V_Z(z)$ внутри интеграла (4), с учетом гипотезы о «статистически» равномерном распределении (Ξ_{Π}) в области цели. Это допущение было принято при обосновании «зонного» подхода его авторами [1]. В этом случае интеграл (5) принимает более простой вид:

$$\bar{V}_X = \bar{V}_X(\Xi_X) P_X(\Xi_X), \quad (9)$$

где: $\bar{V}_X(\Xi_X) = \frac{2}{\Xi_X} \int_0^{\Xi_X/2} V_X(x) dx = V_{Xmax} \left[1 - \frac{V_{Xmax}}{4} \right]$ – среднее значение доли перекрытия цели по координатной оси Ξ_X ;

$P_X(\Xi_X) = 2\Phi_0(\Xi_X/2\sigma_X)$ – вероятность попадания боеприпаса в линейный размер цели.

³ Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. М.: Наука. 1979. 832 с.

Аналогичное выражение имеет вид и для координатной оси Π_Z .

При максимальном накрытии цели зоной поражения $V_{Xmax} = 1$ среднее значение доли перекрытия цели составляет $\bar{V}_X(\Pi_X) = 0,75$.

Это связано с тем, что часть зоны поражения, выходящей за границы цели (рисунок 2), не учитывается при оценке величины ущерба.

Если осреднение функции накрытия произвести с учетом зоны поражения, частично находящейся за границами цели, то получаем другой результат:

$$\bar{V}_X(\Pi_X) = \frac{2}{\Pi_X} \int_0^{(\Pi_X + l_X)/2} V_X(x) dx = V_{Xmax} \quad (10)$$

Оба результата можно рассматривать как нижнюю и верхнюю оценки доли накрытия цели зоной поражения боеприпаса с учетом случайного характера процесса поражения:

$$V_{Xmax} \left(1 - \frac{V_{Xmax}}{4}\right) \leq \bar{V}_X(\Pi_X) \leq V_{Xmax}.$$

Для кусочно-линейной модели функции накрытия также можно использовать среднее арифметическое предельных значений доли накрытия, что уменьшает погрешность расчета и риск получения ошибочной оценки наносимого ущерба:

$$\bar{V}_X(\Pi_X) = \frac{V_{Xmax} \left(1 - \frac{V_{Xmax}}{4}\right) + V_{Xmax}}{2} = \frac{7}{8} V_{Xmax}. \quad (11)$$

Пример. Для исходных данных $\Pi_X \times \Pi_Z = 20 \times 10$ кв.м, $\hat{R}_\Pi = 8,5$ м, $\bar{G} = 0,94$ по формулам (9)-(11) рассчитываем максимальные линейные перекрытия и минимальное накрытие цели круговой зоной поражения:

$$\bar{V}_X(\Pi_X) = \min(\sqrt{\pi} R_\Pi / \Pi_X; 1) = 0,75; \bar{V}_Z(\Pi_Z) = \min(\sqrt{\pi} R_\Pi / \Pi_Z; 1) = 1,0; \bar{V}_H(\Pi) = \bar{V}_X(\Pi_X) \bar{V}_Z(\Pi_Z) = 0,75; \bar{V}_B(\Pi) = \bar{V}_X(\Pi_X) \bar{V}_Z(\Pi_Z) = V_{Xmax}(1 - V_{Xmax}/4) \cdot V_{Zmax}(1 - V_{Zmax}/4) = 0,46; \bar{V}_\Pi = (\bar{V}_{\Pi H} + \bar{V}_{\Pi B})/2 = 0,60.$$

Далее при заданных СКО стрельбы $\sigma_X = 3,5$ м, $\sigma_Z = 2,5$ м рассчитываем вероятности попадания боеприпаса в зону цели:

$$P(\Pi) = P_X(\Pi_X) P_Z(\Pi_Z) = 2\Phi_0(\Pi_X/2\sigma_X) 2\Phi_0(\Pi_Z/2\sigma_Z) = 0,997 \cdot 0,960 = 0,957.$$

Итоговая вероятность поражения цели составляет:

$$\bar{W}_\Pi = \bar{G} \bar{V}_\Pi P_\Pi = 0,94 \cdot 0,60 \cdot 0,96 = 0,55.$$

Для этих же данных рассчитаем среднюю долю накрытия цели и вероятность поражения по точным формулам (4), (5):

$$\bar{V}_X = 0,60; \bar{V}_Z = 0,86; \bar{V}_X \bar{V}_Z = 0,60 \cdot 0,86 = 0,52; \bar{W}_\Pi = \bar{G} \bar{V}_\Pi P_\Pi = 0,94 \cdot 0,52 = 0,49.$$

Сравнивая полученные результаты, можно видеть, что они отличаются не более чем на 10% при расчете вероятности поражения цели одиночным боеприпасом. Для практических расчетов такая точность вполне допустима.

Нетрудно подсчитать, что для поражения цели с вероятностью не ниже $W_{зад} = 0,8$ потребуется в среднем $n = \ln(1 - W_{зад}) / \ln(1 - W) = 2,4$ ед. по точной и $n = 2,0$ ед. боеприпасов по приближенной методике.

Таким образом, рассмотренная выше методика позволяет производить расчеты по оценке эффективности поражения целей боеприпасами с прямоугольной и круговой зонами поражения. Это достигается заменой круговой зоны поражения эквивалентной по площади квадратной зоной поражения. Применение кусочно-линейной (трапециевидной) аппроксимации условного закона поражения позволяет получить как точную, так и приближенную расчетные формулы для средней доли накрытия цели зоной поражения. Осреднение функции накрытия цели по области размерной цели в рамках предположения о «статистически» равномерном распределении элементарных целей внутри нее позволяет получить нижнюю и верхнюю оценки для средней доли накрытия цели зоной поражения. При этом методика расчета значительно упрощается и становится пригодной для оперативных расчетов.

Список источников

1. Мильграм Ю.Г., Ерохин В.А. Основы единой зонной методики оценки эффективности авиационных средств поражения по наземным (морским) объектам. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1985. 241 с.
2. Оценка эффективности огневого поражения ударами ракет и огнем артиллерии: военно-теоретический труд / Под общ. ред. А.А. Бобрикова. СПб.: АВН, 2006. 424 с.
3. Методы оценки эффективности вооружения и военной техники / Под ред. В.М. Буренка. СПб.: ВАТТ, 2011. 142 с.
4. Буравлев А.И., Брезгин В.С. Методы оценки эффективности применения высокоточного оружия. М.: Академия Жуковского, 2018. 232 с.
5. Методы оценки эффективности вооружения и военной техники: монография / Под ред. В.М. Буренка. 2-е изд., доп. М.: Граница, 2022. 264 с.

Информация об авторе

А.И. Буравлев – доктор технических наук, профессор.