

А.И. Буравлев, доктор технических наук,
профессор

К вопросу определения приведенной зоны поражения объектов

В статье рассмотрены теоретические аспекты применения приведенной зоны поражения (ПЗП) для приближенных расчетов вероятности поражения точечных целей. Рассмотрены различные способы определения ПЗП и исследована точность получаемых оценок. Показано, что при оптимальном выборе параметров ПЗП обеспечивается достаточная для практики точность расчета вероятности поражения цели. Доказана сходимости приближенной оценки вероятности поражения цели к точному значению при достижении абсолютной точности стрельбы.

Эффективность поражения целей зависит от поражающего действия (могущества) средств поражения (СП) и точности стрельбы¹.

Могущество СП определяется координатным законом поражения $G(x, z)$ (для плоской задачи), который характеризует вероятность поражения элементарной цели при условии, что точка попадания СП относительно цели имеет координаты (x, z) . Координатный закон поражения (КЗП) является полной характеристикой поражающего действия боевой части СП и зависит от ее конструктивно-технологических параметров (массы, типа снаряжения, характера поражающего действия и др.).

При стрельбе в силу возмущающего воздействия внешней среды, отклонений баллистических характеристик снаряда от расчетных, ошибок наводки оружия возникает случайное отклонение СП от точки прицеливания, т. е. рассеивание снарядов. Если прицеливание осуществляется непосредственно по цели, то рассеивание СП характеризуется плотностью вероятности отклонения точки попадания СП относительно точки прицеливания $f(x, z)$.

При известном координатном законе поражения $G(x, z)$ и законе рассеивания СП $f(x, z)$ вероятность поражения элементарной цели W определяется интегралом:

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, z) f(x, z) dx dz .$$

Однако на практике получение точного выражения КЗП сопряжено с большим числом испытаний и затратами на их проведение. Для упрощения расчетов в 70-х годах прошлого века учеными ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского (д.т.н. проф. Саркисян Р.С., д.т.н. проф. Мильграм Ю.Г., к.т.н. СНС Власов В.И.) была предложена аппроксимация КЗП ступенчатой функцией [1-3]:

$$G^*(x, z) = \begin{cases} 1, & (x, z) \in \Omega_n \\ 0, & (x, z) \notin \Omega_n \end{cases} ,$$

где Ω_n – зона, в которой элементарная цель поражается с вероятностью единица (почти достоверно). Эта зона получила название приведенной зоны поражения (ПЗП) цели и стала широко использоваться в прикладных исследованиях [4-6]. В прямоугольной системе координат, связанной с центром цели, ПЗП представляет собой прямоугольник со сторонами l_x, l_z и площадью $S_n = l_x l_z$. В полярной системе координат это круг с радиусом R_n и площадью $S_n = \pi R_n^2$.

Площадь приведенной зоны поражения определяется следующей формулой [1-3]:

1 Под термином «стрельба» здесь понимаются различные способы применения СП: стрельба артиллерийскими снарядами, пуски ракет, бомбометание.

$$S_{\Pi} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, z) dx dz = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} G(r, \phi) r dr d\phi, \quad (1)$$

где $G(x, z)$, $G(r, \phi)$ – двумерный координатный закон поражения объекта в прямоугольной и полярной системе координат.

На практике приведенные зоны поражения определяются экспериментально путем непосредственной оценки размеров зоны поражения объекта в виде прямоугольника или круга.

С теоретической точки зрения важно знать, какая погрешность вносится в оценку вероятности поражения при замене истинного КЗП приведенной зоной поражения. Именно эта задача рассматривается в данной статье.

Далее мы будем рассматривать координатный закон поражения в полярной форме, ограничиваясь его наиболее простым видом – круговым распределением $G(r, \phi) = \{G(r), 0 \leq \phi \leq 2\pi\}$ (рисунок 1).

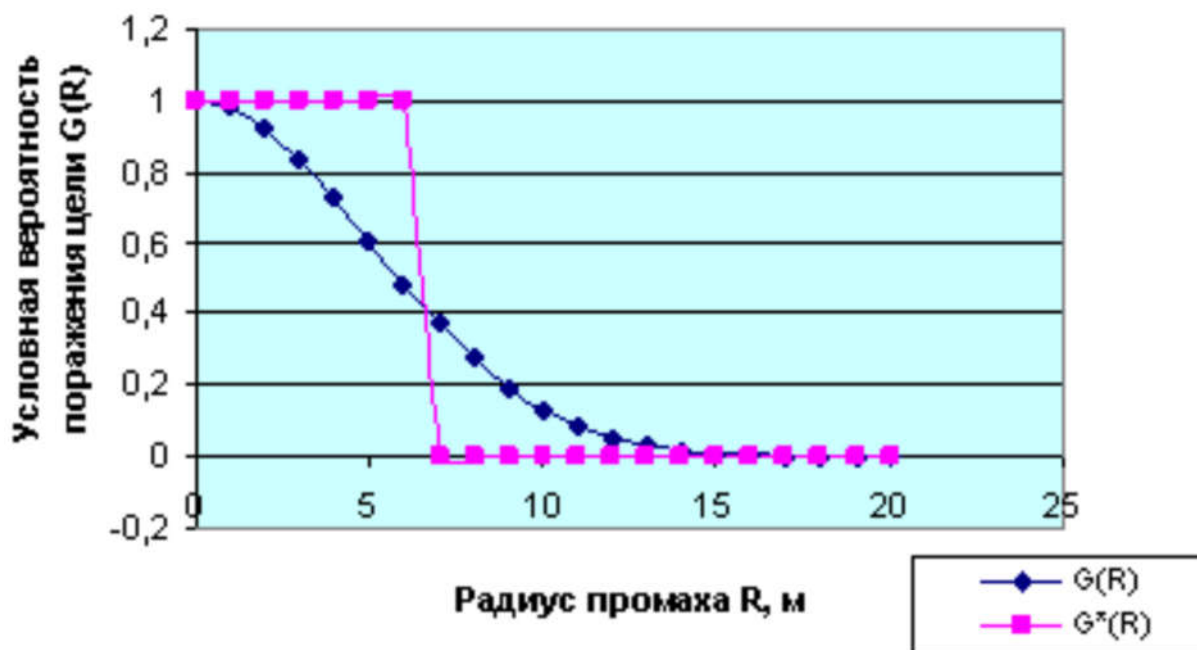


Рисунок 1 – Графики КЗП кругового типа и его ступенчатой аппроксимации

При известном координатном законе поражения $G(r)$ и законе распределения промаха $f(r)$ вероятность поражения элементарной цели определяется интегралом:

$$W = \int_0^{\infty} G(r) f(r) dr. \quad (2)$$

Пусть для определенности координатный закон поражения $G(r)$ и закон рассеивания $f(r)$ определяются следующими аналитическими выражениями:

$$G(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{2d^2}\right); \quad f(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

где d – параметр могущества СП;

σ – круговое среднее квадратическое отклонение СП при стрельбе.

В этом случае выражение для вероятности поражения элементарной цели (2) примет следующий вид:

$$W = \int_0^{\infty} G(r) f(r) dr = \frac{d^2}{d^2 + \sigma^2}. \quad (4)$$

Найдем площадь и радиус круговой ПЗП для рассматриваемого координатного закона поражения согласно выражению (1):

$$S_{\pi} = 2\pi \int_0^{\infty} G(r) r dr = 2\pi d^2 = \pi R_{\pi}^2; \quad R_{\pi} = \frac{\sqrt{S_{\pi}}}{\pi} = d\sqrt{2}. \quad (5)$$

Вероятность поражения цели при аппроксимации КЗП ступенчатой функцией $G^*(r, R_{\pi}) = 1(R_{\pi} - r)$, как это предполагается в методе ПЗП, определяется выражением:

$$W^* = \int_0^{\infty} G^*(r) f(r) dr = \int_0^{R_{\pi}} f(r) dr = 1 - \exp\left(-\frac{R_{\pi}^2}{2\sigma^2}\right). \quad (6)$$

Сравним значения вероятностей поражения элементарной цели, рассчитанной по точной (4) и приближенной формуле (6). В качестве обобщенного параметра эффективности СП рассмотрим отношение $k = \frac{R_{\pi}}{\sigma}$ при фиксированном параметре могущества СП d .

На рисунке 2 приведен график для относительной погрешности оценки вероятности поражения цели методом ПЗП $\delta W(k) = 1 - \frac{W^*(k)}{W(k)}$ для параметра $d = 5$ м.

Как видно из рисунка, относительная погрешность оценки вероятности поражения цели методом ПЗП зависит от параметра эффективности СП k и изменяется в пределах от нуля до -30% . При этом отрицательное значение δW говорит о завышении оценки по методу ПЗП. Максимальное значение относительной погрешности наблюдается при $k = 2,0$. С увеличением параметра эффективности СП k относительная погрешность оценки вероятности поражения непрерывно уменьшается. На факт завышения оценки вероятности поражения, полученной по методу ПЗП, неоднократно указывалось ранее специалистами [7,8].

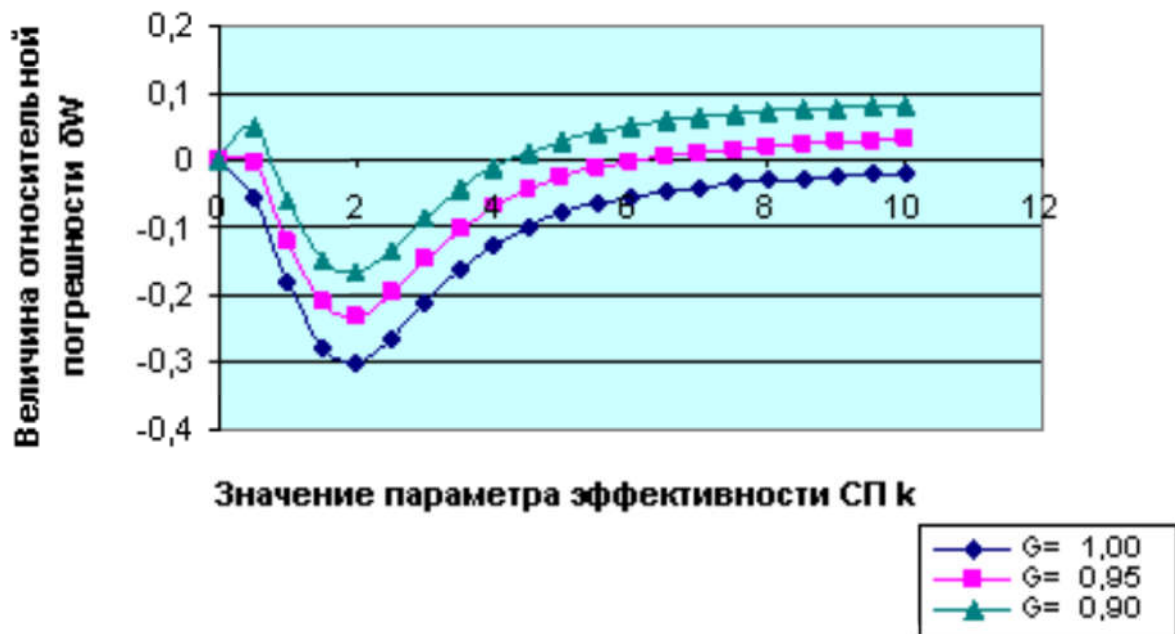


Рисунок 2 – Зависимость относительной погрешности оценки вероятности поражения от параметра $k = \frac{R_{\pi}}{\sigma}$ для двух способов определения ПЗП

Найдем теперь математическое ожидание радиуса поражения цели для рассматриваемого КЗП и примем его в качестве радиуса ПЗП:

$$R_{\pi} = \int_0^{\infty} G(r) dr = d \sqrt{\frac{\pi}{2}}. \quad (7)$$

Данный радиус ПЗП меньше радиуса, определенного классическим методом.

Это следует из того, что в первом случае площадь ПЗП определялась через математическое ожидание квадрата радиуса поражения:

$$S_{\pi} = 2\pi \int_0^{\infty} G(r) r dr = \pi M[R^2],$$

а во втором случае через квадрат математического ожидания радиуса поражения:

$$S_{\pi} = \pi M[R]^2.$$

Поскольку $M[R^2] > M[R]^2$, этим и объясняется различие между размерами и площадью ПЗП.

Как и в первом случае, найдем погрешности оценки вероятности поражения цели при использовании ПЗП с радиусом, рассчитанным по формуле (7). График относительной погрешности $\delta W(k)$ при втором методе определения ПЗП также показан на рисунке 1. Сравнивая оба графика, видим, что при втором способе определения ПЗП погрешность оценки вероятности поражения цели оказывается меньше, чем для первого способа. Это означает, что второй способ определения радиуса и площади ПЗП является более рациональным.

При $k > 4$ оба способа дают погрешность оценки, не превышающую 10%. При дальнейшем увеличении параметра k погрешность оценки для обоих способов монотонно стремится к нулю.

Таким образом, метод ПЗП обеспечивает достаточно точные для практики оценки вероятности поражения цели при соотношении параметров могущества и точности применения СП $k > 4$. Применение метода ПЗП для оценки эффективности высокоточных СП также оправдано, поскольку именно для них это условие является необходимым [9]. При этом условии достигается вероятность поражения элементарной цели $W > 0,9$.

Рассмотрим третий способ аппроксимации КЗП ступенчатой функцией с уровнем вероятности поражения меньшей единицы: $G^*(r, R_{\pi}) = \bar{G} \cdot 1(R_{\pi} - r)$; $\bar{G} < 1$.

В этом случае относительная погрешность оценки вероятности поражения цели δW будет зависеть от двух параметров \bar{G} и R_{π} .

На рисунке 3 показаны графики зависимости относительной погрешности оценки δW от параметра эффективности k и мощности ПЗП \bar{G} .

Из приведенных графиков видно, что для $\bar{G} = 0,95$ относительная погрешность при $k \geq 4$ составляет $\delta W = 2,5\%$, что вполне достаточно для прогнозных оценок.

На практике параметр могущества d и связанный с ним радиус поражения R_{π} боевых частей СП определяются по результатам испытаний.

В процессе испытаний можно достаточно точно определить радиус зоны практически достоверного поражения цели R_{min} и радиус достоверного не поражения цели R_{max} . Это позволяет аппроксимировать координатный закон поражения $G(r)$ не ступенчатой, а трапецевидной функцией (рисунок 4) с параметрами:

$$G^*(r) = \begin{cases} 1, & r < R_{min}, \\ 1 - \frac{r - R_{min}}{R_{max} - R_{min}}, & R_{min} \leq r < R_{max}, \\ 0, & r \geq R_{max}. \end{cases} \quad (8)$$

Приравнивая интегралы:

$$\int_0^{\infty} G(r) dr = \int_0^{\infty} G^*(r) dr,$$

получаем оценку неизвестного параметра мощества СП d :

$$d = \frac{R_{min} + R_{max}}{\sqrt{2} \pi} . \tag{9}$$

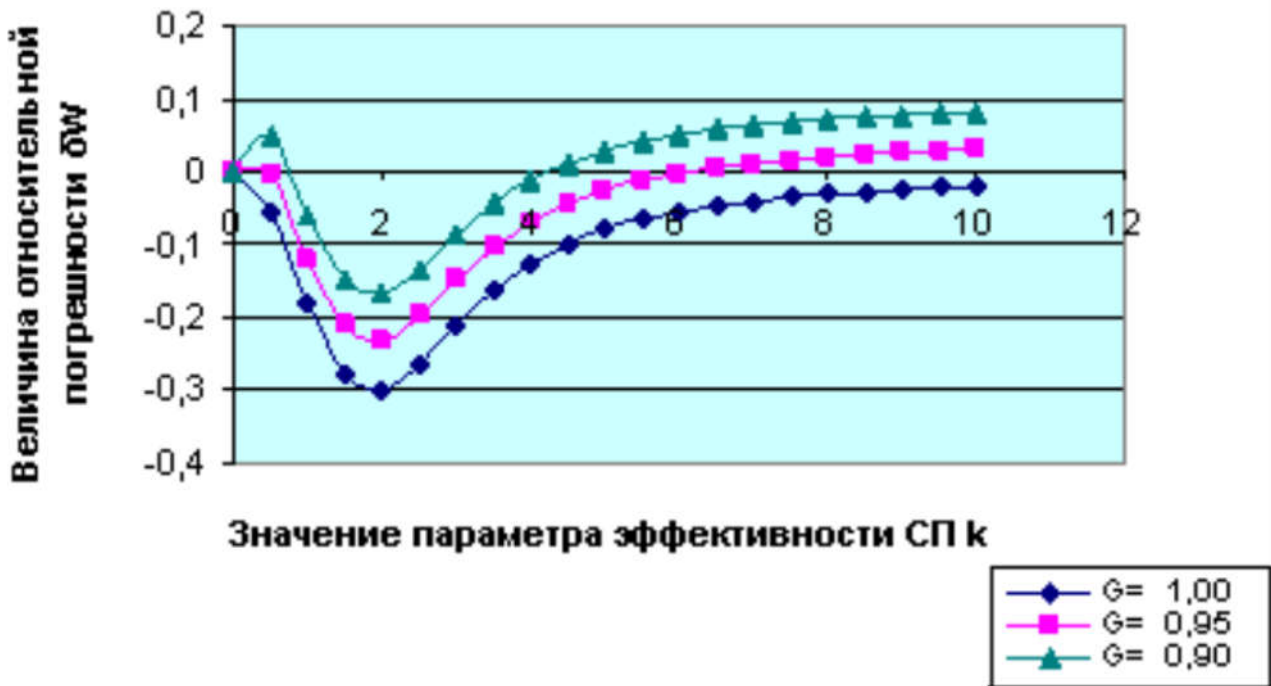


Рисунок 3 – Зависимость относительной погрешности оценки вероятности поражения от параметра мощности ПЗП

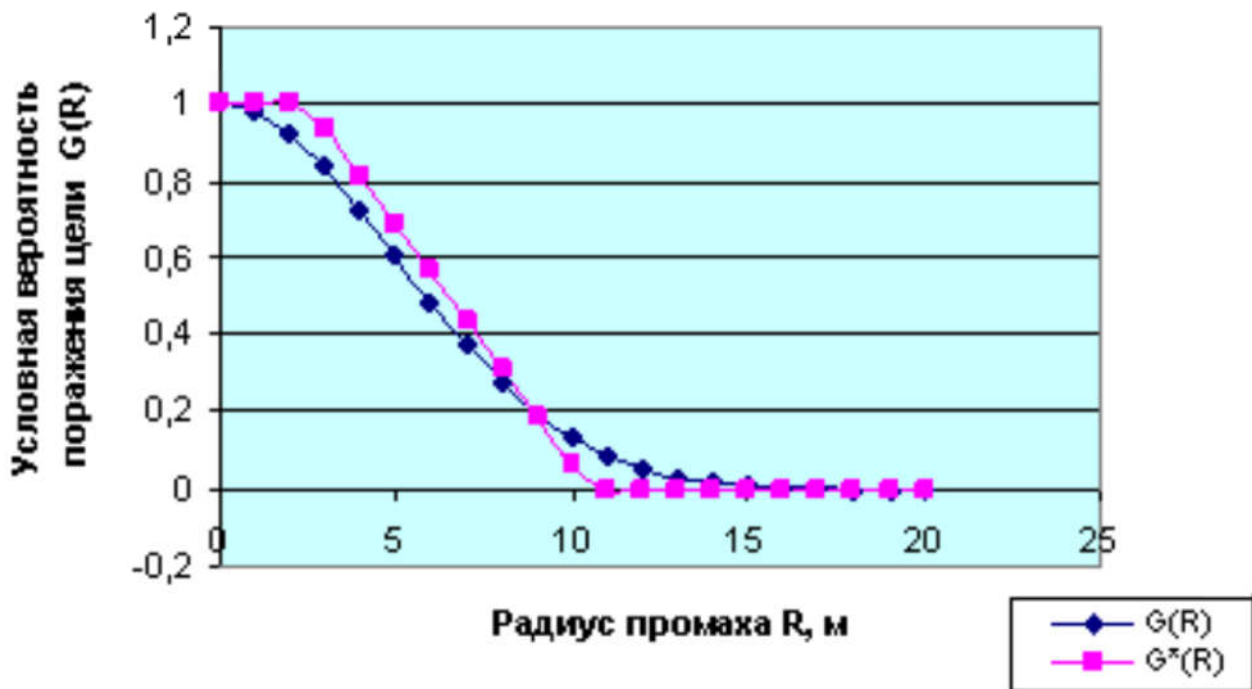


Рисунок 4 – Графики КЗП и его трапецевидной аппроксимации

Если в качестве примера принять $R_{min}=2,5 м$, $R_{max}=12 м$, то из (9) получаем $d=5,2 м$, что совпадает с принятым выше значением параметра эффективности СП.

Для трапециевидной аппроксимации КЗП вероятность поражения цели может быть рассчитана непосредственно по формуле (4), что обеспечивает существенное снижение методической погрешности расчетов.

Результаты проведенного анализа могут быть распространены на КЗП более сложного вида. В прикладных задачах часто используется КЗП эллипсоидального типа:

$$G(r, \phi) = \exp\left(-\frac{r^2}{2b^2}(1 - \varepsilon^2 \cos^2 \phi)\right); \quad \varepsilon = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}. \quad (10)$$

При $\phi = 0, \frac{\pi}{2}$ из (10) получаем одномерные законы поражения для двух взаимно перпендикулярных направлений.

Из проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Приведенная зона поражения является результатом аппроксимации координатного закона поражения ступенчатой функцией.

2. При аппроксимации КЗП ступенчатой функцией для обеспечения наивысшей точности расчетов необходимо рациональным образом выбирать параметры аппроксимации \bar{G} , R_{Π} , согласовывая их с параметрами могущества СП d и точности стрельбы σ .

3. С увеличением точности стрельбы повышается точность оценки вероятности поражения цели с использованием ПЗП. В пределе ($\sigma \rightarrow 0$) метод ПЗП дает точную вероятность поражения цели.

4. Применение вместо ступенчатой трапециевидной аппроксимации КЗП позволяет существенно снизить методическую погрешность без усложнения методики расчетов.

С учетом вышесказанного метод ПЗП и его модификация является вполне обоснованным прикладным методом оценки эффективности поражения объектов.

Список использованных источников

1. Дорофеев А.Н., Кузнецов В.А., Саркисян Р.С. Авиационные боеприпасы: Учебник. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1978.

2. Мильграм Ю.Г., Ерохин В.А. Основы единой зонной методики оценки эффективности авиационных средств поражения по наземным (морским) объектам. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1985.

3. Власов В.И. Факты и аргументы теории боевой эффективности. – М.: ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2011.

4. Миропольский Ф.П., Саркисян Р.С., Вишняков О.Л., Попов А.М. Авиационные боеприпасы и их исследование: Учебник / Под ред. Ф.П. Миропольского. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1996.

5. Балаганский И.А., Мержиевский Л.А. Действие средств поражения и боеприпасов: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004.

6. Оценка эффективности огневого поражения ударами ракет и огнем артиллерии / Под общ. ред. А.А. Бобрикова. – СПб.: «Галея принт», 2006. – 424 с.

7. Блинов Г.И. Концептуальные вопросы развития теории боевой эффективности РАВ на современном этапе / В сб. «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006. – Т. 1.

8. Буравлев А.И., Ерохин В.А., Скрынников А.А. К вопросу о понятии эффективной зоны поражения / Сборник статей XX Всероссийской конференции научно-технической школы-семинара «Прием, передача, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах». Сочи, октябрь 2009 г. – М.: РПА «АПР», 2009.

9. Буравлев А.И. К вопросу о критерии определения высокоточного оружия // Вооружение и экономика. – 2011. – № 4 (16).