

Буравлев А.И., доктор технических наук,
профессор
Брезгин В.С., кандидат технических наук

Методика оценки ущерба при имитационном моделировании огневого поражения объектов

В статье рассмотрен методический подход к оценке ущерба при имитационном моделировании огневого поражения. Предложены алгоритмы имитационного моделирования, позволяющие корректно проводить оценку ущерба при различных способах огневого поражения одиночных и групповых объектов, в том числе с учетом накопления ущерба.

В настоящее время ведутся активные исследования в части создания информационно-моделирующих систем (ИМС) как инструментальных средств поддержки решений для широкого круга задач военного планирования [1, 2].

Одна из таких систем – информационно-аналитическая система поддержки принятия решений в части программно-целевого планирования развития ВВТ «Арбат-НВ-Центр» в настоящее время принята на снабжение Минобороны РФ и проходит опытную эксплуатацию. Основу ИМС составляет имитационная модель, позволяющая моделировать процессы огневого поражения объектов в ходе боевых операций с оценкой частных и интегральных показателей эффективности боевого применения.

Одной из важнейших задач является огневое поражение объектов противника при применении различных видов оружия с оценкой величины и степени нанесенного ущерба объектам противоборствующих сторон. Сложность этой задачи связано с тем, что величина и степень ущерба зависит как от характера и свойств объекта поражения (тип и размеры объекта, его состав, функционально-логическая схема уязвимости, степень защищенности), так и от типа и характеристик применяемого средства поражения (характер и мощность поражающего действия, дальность и точность стрельбы). В соответствии с принятыми нормативами по огневому поражению на-

земных, воздушных и морских объектов для войсковых объектов существует четыре типа поражения *A, B, C, D*; для объектов инфраструктуры – два типа поражения *A, B* [3, 4].

Каждый тип характеризует определенную степень поражения объекта, отражающую величину физического ущерба и минимальное время восстановления его боеспособности. Например, для одиночного объекта поражение по типу *A* означает его *уничтожение* и невозможность *восстановления* его боеспособности (работоспособности) за время менее чем *семь* суток. Поражение по типу *B* означает *вывод из строя* объекта на время не менее *одних* суток, а поражение по типу *C* – повреждение объекта на время не менее *двух-трех* часов. Для групповых (площадных) объектов поражение по типу *A* означает уничтожение не менее 50% его составных элементов; поражение по типу *B* – вывод из строя не менее 50% его элементов; поражение по типу *C* – повреждение не менее 50% элементов объекта.

Поражение объекта по определенному типу достигается накрытием объекта соответствующей зоной поражения СП. Для оценки величины и степени ущерба необходимо моделировать факт накрытия объекта зоной поражения СП.

В данной статье рассматривается методика оценки ущерба при моделировании огневого поражения одиночных и групповых объектов.

1. Расчет условного закона поражения объекта дистанционными СП по известным зонам поражения

Для средств поражения дистанционного (фугасного, осколочного, зажигательного и комбинированного) действия в руководствах по боевому применению авиации, ракетных войск и артиллерии приводятся приведенные зоны поражения (ПЗП) по каждому типу поражения (А,В,С).

Приведенная зона поражения представляет собой прямоугольник со сторонами $l_x \times l_z$, параллельными главным осям рассеивания СП, накрытие объекта которой приводит к достоверному поражению по определенному типу. Обстрел объектов может производиться с разных направлений, в связи с чем использование прямоугольных зон поражения значительно усложняет процесс определения факта накрытия размерного объекта ПЗП. Поэтому целесообразно преобразовать прямоугольные зоны поражения по типу

А,В,С в условный закон поражения в полярной форме, который характеризует условную вероятность поражения объекта по определенному типу $G(R, \varphi)$ в зависимости от ра-

диуса R подрыва СП относительно центра цели и угла φ , характеризующее направление стрельбы.

С этой целью заменяют прямоугольную зону поражения на круговую с радиусом, соответствующим определенному типу поражения [3]:

$$R_{A,B,C} = \sqrt{\frac{S_{A,B,C}}{\pi}}, \tag{1}$$

где $S_{A,B,C} = l_x^{A,B,C} \times l_z^{A,B,C}$ – площадь приведенной зоны поражения объекта СП по определенному типу.

Условную вероятность объекта по определенному типу в этом случае можно определить отношением площадей

$$G_A = \frac{S_A}{S_C}; G_B = \frac{S_B - S_A}{S_C}; G_C = \frac{S_C - S_B}{S_C}.$$

На рисунке 1 показана диаграмма условного закона поражения объекта СП.

Здесь условные вероятности G_C, G_B характеризуют поражение объекта только по типу В и С. При этом сумма вероятностей

$$G_A + G_B + G_C = 1,$$

что означает достоверное событие поражения объекта хотя бы по одному типу при накрытии его зоной поражения.

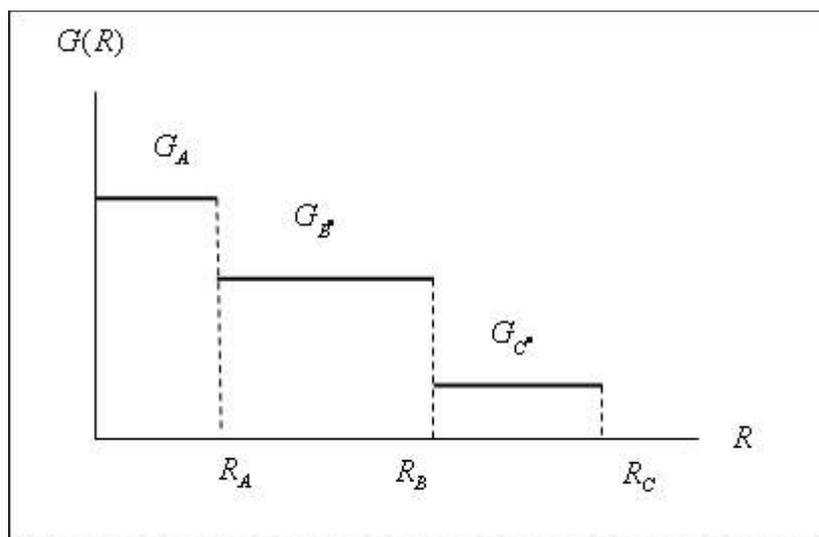


Рисунок 1 – Диаграмма условного закона поражения объекта СП в плоскости стрельбы

Проекция развертки условного закона поражения $G(R, \varphi)$ по углу направления стрельбы $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ на горизонтальную плоскость

представляет собой концентрические круги радиусом, соответствующим типу поражения.

Для оценки точности аппроксимации прямоугольных зон круговыми зонами поражения проведены расчеты по оценке вероятности поражения малоразмерных (точечных) объектов.

Вероятность поражения точечного объекта при накрытии его прямоугольной зоной поражения определяется по формуле [4]

$$W = G P_x P_z = 4G \Phi_0 \left(\frac{l_x}{2\sigma_x} \right) \Phi_0 \left(\frac{l_z}{2\sigma_z} \right),$$

где $0 < G \leq 1$ – условная вероятность поражения объекта при накрытии его ПЗП;

$$P_x \Phi = 2G \Phi_0 \left(\frac{l_x}{2\sigma_x} \right);$$

$$P_z \Phi = 2G \Phi_0 \left(\frac{l_z}{2\sigma_z} \right) - \text{вероятности накрытия}$$

объекта прямоугольной ПЗП при заданных характеристиках рассеивания СП σ_z, σ_x , рассчитанные с использованием функции

$$\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Вероятность поражения объекта при накрытии его круговой зоной поражения с радиусом R определяется выражением

$$W = G \left[1 - \exp \left(-\frac{R^2}{2\sigma^2} \right) \right],$$

где $\sigma = \sqrt{\sigma_x \sigma_z}$ – величина кругового среднеквадратического отклонения (СКО) СП.

Приравнявая эти выражения, получаем уравнение для определения радиуса круговой зоны поражения, эквивалентной по вероятности поражения объекта прямоугольной зоной поражения

$$R^* = \sqrt{-2\sigma^2 \ln(1-W)}. \quad (2)$$

Исследования показали, что при соотношениях между размерами прямоугольной зоны поражения и характеристиками рассеивания СП $\frac{l_x}{\sigma_x}, \frac{l_z}{\sigma_z}$ расхождения между радиусом ЗП, определенным по формулам (1) и (2), может быть существенным и достигать 30% и более. С уменьшением СКО расхождение оценок увеличивается. Это обстоятельство обусловлено значимым влиянием характеристик рассеивания СП на эффективность поражения объекта.

На рисунках 2, 3 приведены графики зависимости радиуса круговой зоны поражения R, рассчитанного по формуле (1), и радиуса R*, рассчитанного по формуле (2), в зависимости от коэффициента $k = \frac{l_x}{l_z}$ при фиксированных значениях остальных параметров.

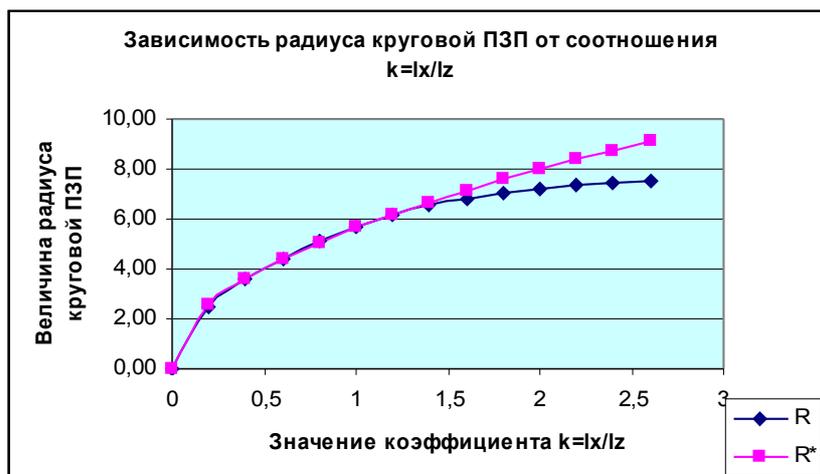


Рисунок 2 – Зависимость радиуса круговой ПЗП от коэффициента $k = \frac{l_x}{l_z}$ при фиксированных

$$G=1; l_z=10\text{ м}; \sigma_x=\sigma_z=5\text{ м}$$

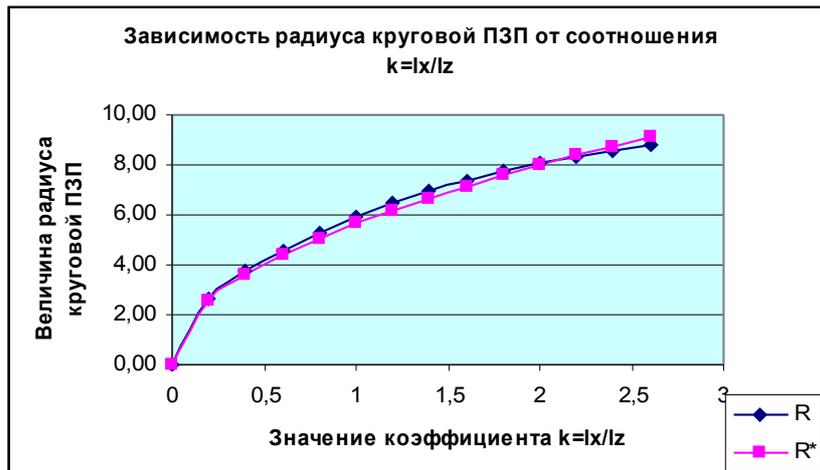


Рисунок 3 – Зависимость радиуса круговой ПЗП от коэффициента $k = \frac{l_x}{l_z}$ при фиксированных $G=1; l_z=10 м; \sigma_x = \sigma_z = 10 м$

Из рисунков видно, что при определенных соотношениях $\frac{l_x}{\sigma_x}, \frac{l_z}{\sigma_z}$ можно получить как близкое совпадение, так и значительное расхождение между радиусами круговой зоны

поражения, рассчитанных по формулам (1), (2).

В связи с этим предлагается рассчитывать эквивалентный радиус круговой зоны поражения по формуле

$$R^* = \sqrt{-2\sigma_x\sigma_z \ln \left[1 - 4G\Phi_0\left(\frac{l_x}{2\sigma_x}\right)\Phi_0\left(\frac{l_z}{2\sigma_z}\right) \right]}, \tag{3}$$

учитывающей характеристики рассеивания СП.

2. Оценка ущерба групповой цели при одиночном, серийном и залповом применении СП

Рассмотрим групповую цель, состоящую из N элементарных целей, представляющих собой функциональные подсистемы (узлы, агрегаты) исходного объекта (рисунок 4). Положение каждого элемента относительно геометрического центра групповой цели задается вектором $\vec{r}_i = (x_i, y_i), i = \overline{1, N}$.

Положение СП и его круговой зоны поражения относительно центра цели характеризуется радиус-вектором $\vec{R}_c = (x_c, y_c)$. Тогда положение СП относительно i -го элемента характеризуется радиус-вектором $\vec{R}_{\varepsilon_i} = \vec{R}_c + \vec{r}_i$.

По положению элементов относительно центра СП можно судить о факте их накрытия определенной зоной поражения.

Обозначим $I_{\varepsilon_i}^{A,B,C} \in \{0,1\}$ индикатор поражения i -го элемента по типу A, B, C . Эти индикаторы определяются следующими соотношениями:

$$I_{\varepsilon_i}^A = \begin{cases} 0, R_{\varepsilon_i} > R_A; \\ 1, R_{\varepsilon_i} \leq R_A \end{cases}; \quad I_{\varepsilon_i}^B = \begin{cases} 0, R_{\varepsilon_i} > R_B; \\ 1, R_{\varepsilon_i} \leq R_B \end{cases}; \quad I_{\varepsilon_i}^C = \begin{cases} 0, R_{\varepsilon_i} > R_C; \\ 1, R_{\varepsilon_i} \leq R_C \end{cases} \tag{4}$$

где $R_{\varepsilon_i} = \sqrt{(x_{\varepsilon_i} - x_c)^2 + (z_{\varepsilon_i} - z_c)^2}$; $R_{A,B,C}$ – радиусы круговых зон поражения по типу A, B, C .

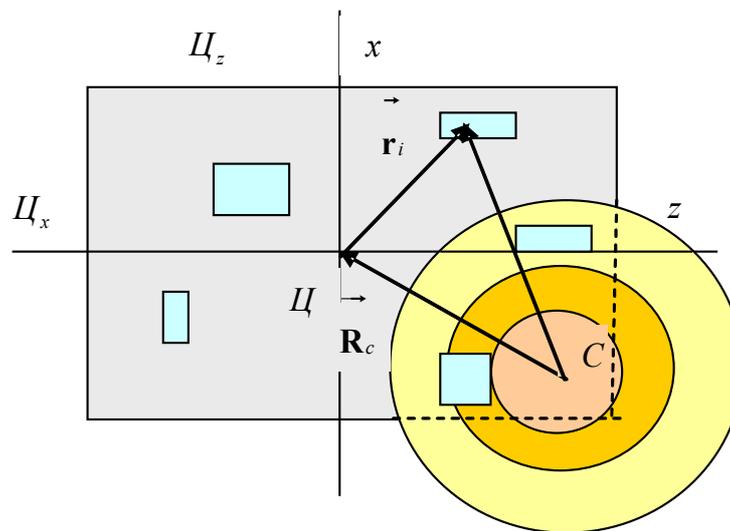


Рисунок 4 – Схема применения СП по групповой цели

По индикаторам $I_{\mathcal{E}_i}^{A,B,C}$ можно определить индикаторы поражения элементов только по типам А,В,С:

$$I_{\mathcal{E}_i}^A = I_{\mathcal{E}_i}^A; I_{\mathcal{E}_i}^B = I_{\mathcal{E}_i}^B - I_{\mathcal{E}_i}^A; I_{\mathcal{E}_i}^C = I_{\mathcal{E}_i}^C - I_{\mathcal{E}_i}^B. \quad (5)$$

По типу поражения элементов групповой цели однозначно определяется минимальное или потребное время на восстановление пораженного элемента (подсистемы, агрегата, узла), а также потребные средства для его ремонта.

Суммируя индексы по всем элементам групповой цели можно оценить средний ущерб, нанесенный групповой цели по типам поражения

$$U_A = \frac{\sum_{i=1}^N I_{\mathcal{E}_i}^A}{N}; U_B = \frac{\sum_{i=1}^N I_{\mathcal{E}_i}^B}{N}; U_C = \frac{\sum_{i=1}^N I_{\mathcal{E}_i}^C}{N}. \quad (6)$$

В соответствии с принятыми нормативами по применению авиационных и ракетно-артиллерийских СП групповая цель считается пораженной

- по типу А (разгром), если $U_A \geq 0,5$;
- по типу В (подавление), если $U_B \geq 0,5$;
- по типу С (дезорганизация), если $U_C \geq 0,5$.

Для случая серийного применения СП необходимо для каждого СП фиксировать координаты его разрыва относительно центра групповой цели и оценивать факт накрытия и индикаторы поражения элементов цели.

В этом случае возникает проблема учета накопления ущерба для пораженных ранее по типу В и С элементов. Методический подход к ее решению рассматривается ниже.

При залповом (одновременном) применении СП по групповой цели необходимо рассчитывать обобщенную зону поражения (ОЗП) цели, которая получается в результате объединения ПЗП отдельных СП [4]. Обобщенная зона поражения представляется также прямоугольником со сторонами $L_x \times L_z$.

Размеры ОЗП определяются как сумма математического ожидания отклонения координат центра ПЗП от точки прицеливания за счет индивидуального рассеивания СП и собственных размеров ПЗП [4]:

$$L_{xn} = l_x = 0,7 \sigma_{x_u} \ln n; L_{zn} = l_z = 0,7 \sigma_{z_u} \ln n, \quad (7)$$

где n – число СП в залпе.

Среднее число перекрытий ПЗП одиночных СП в обобщенной зоне поражения определяется отношением суммарной площади ПЗП n СП к площади ОЗП

$$v(n) = \frac{nS_{\text{ПЗП}}}{S_{\text{ОЗП}}} = \frac{nl_x l_z}{L_x L_z} = \frac{n}{\left(1 + 0,7 \frac{\sigma_{x_u}}{l_x} \ln n\right) \left(1 + 0,7 \frac{\sigma_{z_u}}{l_z} \ln n\right)}. \quad (8)$$

Зависимость $v(n)$ показана на графике на рисунке 5. Она практически является линейной от числа СП в залпе.



Рисунок 5 – Зависимость среднего числа перекрытий ПЗП от числа СП в зале

Поэтому для практических расчетов можно использовать линейную аппроксимацию зависимости $v(n)$

$$v(n) = 0,78 + 0,22n. \quad (9)$$

После формирования прямоугольной ОЗП для трех типов поражения, она преобразуется по рассмотренной выше методике в круговую зону поражения и используется далее для оценки величины ущерба, нанесенного групповой цели при залповом применении СП.

3. Учет накопления ущерба при применении СП

Для учета накопления используются различные модели [4]. Рассмотрим наиболее простую модель, в которой накопление ущерба осуществляется по линейному закону:

$$G(n+1) = k \cdot G(n); \quad (n=2, 3, \dots, m), \quad (10)$$

где n – число СП, примененных по цели;

$k > 1$ – коэффициент, характеризующий увеличение условной вероятности поражения цели при увеличении числа применяемых СП на единицу;

m – число СП, при котором обеспечивается достоверное поражение объекта.

Число СП m , при котором обеспечивается достоверное поражение объекта по данному типу, определяется по данным экспериментальных исследований.

Коэффициент накопления ущерба k определяется из равенства $G(m+1) = k^m G_1 = 1$, откуда

$$k = \frac{1}{\sqrt[m]{G_1}}. \quad (11)$$

Условный закон поражения в этом случае описывается степенной зависимостью следующего вида:

$$G(n) = \begin{cases} k^{n-1}, & 1 < n \leq m \\ 1, & n > m \end{cases}.$$

На рисунке 6 показаны графики изменения условного закона поражения без накопления и с накоплением ущерба для ударных СП при следующих параметрах: $G_1 = 0,3$; $m = 5$; $k = 1,27$.

Данный подход может быть применен и к условным законам поражения дистанционных СП, где G_1 является условной вероятностью поражения объекта при накрытии его круговой зоной поражения определенного типа (А, В, С).

Процесс накопления ущерба можно представить в виде марковской цепи, описывающей изменение вероятностей состояний объекта при последовательном воздействии по нему СП.

В качестве возможных состояний рассмотрим следующие несовместные состояния:

объект не поражен O ;

объект поражен по типу C^* ;
 объект поражен по типу B^* ;

объект поражен по типу A^* .

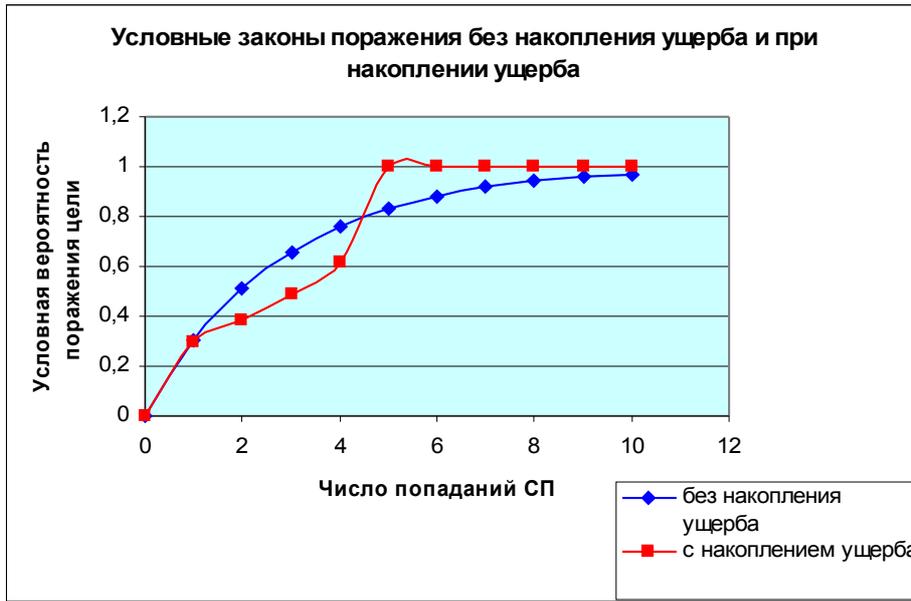


Рисунок 6 – Графики условных законов поражения без накопления и с накоплением ущерба для ударных СП

Переход объекта из одних состояний в другие осуществляется при воздействии по объекту очередного СП. Переходы осуществляются из состояний с более низкой степенью поражения в состояния с более высокой степенью поражения. Состояние A (объект уничтожен) является поглощающим состоянием. Вероятности переходов зависят только от

вида состояния, в котором находился объект до попадания очередного СП, и типа поражения объекта по определенному типу при попадании в него СП.

На рисунке 7 показан граф состояний и возможных переходов при действии по объекту несколькими СП.

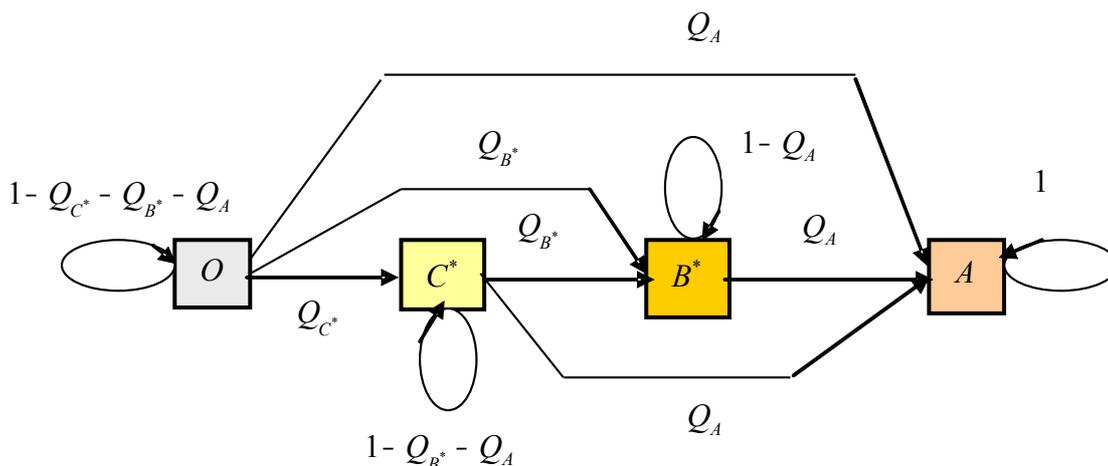


Рисунок 7 – Марковская модель поражения объекта при последовательном воздействии СП

Для процесса поражения без накопления ущерба условные вероятности переходов Q_A , Q_B , Q_C не зависят от числа попаданий СП и

определяются следующими соотношениями $Q_A = U_A$; $Q_B = U_B - U_A$; $Q_C = U_C - U_B$.

В этом случае получаем однородную марковскую цепь, матричное уравнение для вероятностей состояний которой имеет вид

$$G(n) = QG(n-1); \quad (n=1, 2, \dots), \quad (12)$$

где $G(n) = [G_o(n), G_{C^*}(n), G_{B^*}(n), G_A(n)]^T$ – вектор-столбец условных вероятностей поражения объекта по различным типам при попадании n СП;

$G_o(n) = 1 - G_{C^*}(n) - G_{B^*}(n) - G_A(n)$ – условная вероятность не поражения объекта при n попаданиях СП;

$$Q = \begin{bmatrix} 1 - Q_{C^*} - Q_{B^*} - Q_A & 0 & 0 & 0 \\ Q_{C^*} & 1 - Q_{B^*} - Q_A & 0 & 0 \\ Q_{B^*} & Q_{B^*} & 1 - Q_A & 0 \\ Q_A & Q_A & Q_A & 1 \end{bmatrix}$$

переходная матрица марковской цепи.

С помощью рекуррентного уравнения (11) можно получить условные законы поражения объекта от числа попаданий СП n при заданной схеме ее уязвимости, которая определяет значения вероятностей поражения Q_A, Q_{B^*}, Q_{C^*} .

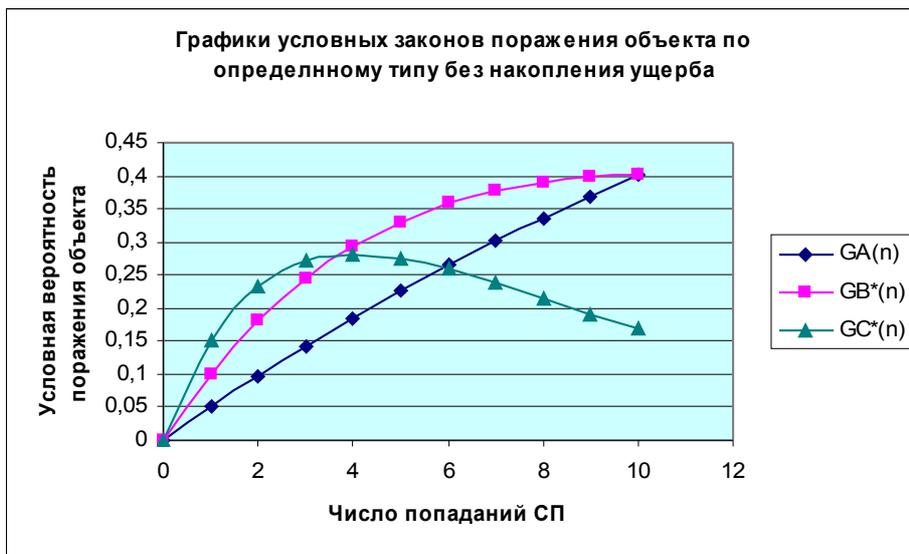


Рисунок 8 – Графики условных законов поражения без накопления ущерба

На рисунке 8 показаны графики условных законов поражения по различным типам в зависимости от числа попаданий СП n при сле-

дующих данных: $Q_A = 0,05, Q_{B^*} = 0,1, Q_{C^*} = 0,15$.

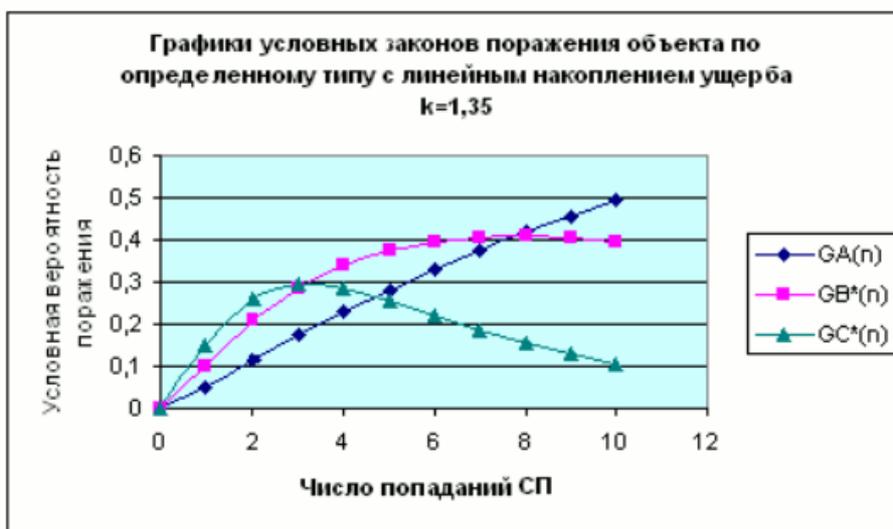


Рисунок 9 – Графики условных законов поражения при линейном накоплении ущерба

При накоплении ущерба переходная матрица $Q(n)$ становится зависимой от числа попаданий СП, а марковская цепь неоднородной:

$$G(n) = Q(n)G(n-1); (n=1,2,\dots).$$

Для учета накопления ущерба в матрицу Q можно ввести коэффициент накопления ущерба k для элементов Q_A, Q_B, Q_C , что позволяет рассчитывать условные законы поражения в рамках линейного закона накопления ущерба (10).

На рисунке 9 показаны графики условных законов поражения при линейном накоплении ущерба с коэффициентом $k=1,35$ и $m=4$.

Несмотря на внешнее сходство, численные значения условных законов поражения различаются в случае накопления ущерба. На рисунке 10 приведены графики обобщенных законов поражения $G(n)$ без учета и с учетом накопления ущерба $G^*(n)$, представляющих собой сумму условных законов по разным типам поражения.

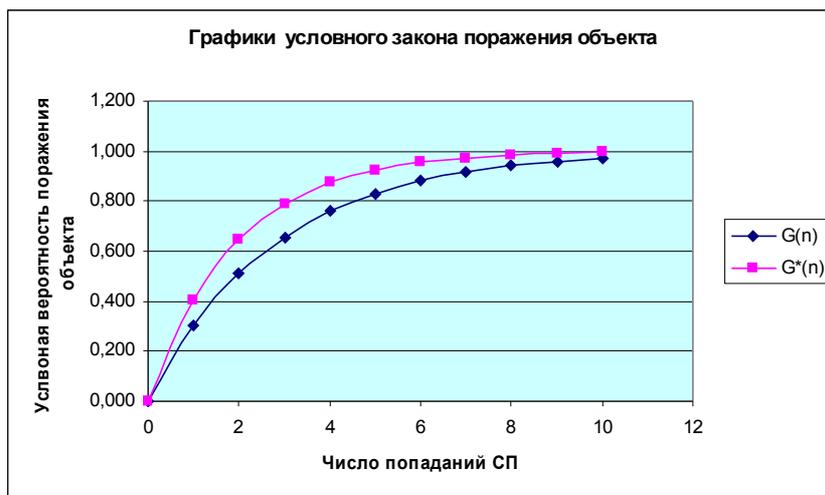


Рисунок 10 – Графики обобщенного закона поражения без накопления и при линейном накоплении ущерба

Из этих графиков усматривается явное различие между законами поражения без накопления и с накоплением ущерба.

Рассмотренный выше методический подход позволяет осуществлять корректную оценку величины и степени ущерба при имитационном моделировании огневого поражения групповых объектов.

Список использованных источников

1. Выпасняк В.И., Калиновский Д.Б., Тиханычев О.В. Моделирование вооруженного противоборства: перспективы развития // Военная мысль. – 2009. – № 7.
2. Технология имитационного моделирования боевых действий / Под ред. С.В. Ягольников. – Тверь: 2 ЦНИИ Минобороны России, 2009.
3. Оценка эффективности огневого поражения ударами ракет и огнем артиллерии. Военно-теоретический труд / Под ред. А.А. Бобрикова. – СПб.: Академия военных наук, 2006.
4. Буравлев А.И., Буренок В.М., Брезгин В.С. Методы оценки эффективности вооружения и военной техники. – СПб.: ВАТТ МО РФ, 2011.