

УДК 623.5

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСКОЛОЧНОГО ПОЛЯ ПРИ СРАБАТЫВАНИИ СНАРЯДА НА ТРАЕКТОРИИ SIMULATION MODELING OF FRAGMENTATION FIELD AT OPERATION OF A SHELL ON A TRAJECTORY

А.В. Вагин¹, акад. РАРАН А.М. Липанов², И.Г. Русяк², В.Г. Суфиянов²

¹ФКП «НИИ «Геодезия»,

²ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова»

A.V. Vagin, A.M. Lipanov, I.G. Rusyak, V.G. Sufiyanov

В статье представлен алгоритм расчета плотности осколочного потока и предложен метод построения зон поражения при срабатывании снаряда на траектории. Разработанный алгоритм основан на синтезе математического моделирования движения осколков и метода статистических испытаний. На основе разработанного алгоритма был создан программный комплекс, позволяющий строить зоны поражения в трехмерном пространстве с учетом рельефа местности.

Ключевые слова: имитационное моделирование, срабатывание снаряда, осколочное поле, зоны поражения, алгоритм статистических испытаний

The paper presents the algorithm for calculating density of a fragmental stream and method of construction zones of defeat at operation of a shell on a trajectory. The developed algorithm is based on a synthesis of mathematical modeling motion of the fragments and the method of statistical tests. Based on the developed algorithm was created the program complex allowing to construction zones of defeat in three-dimensional space taking into account a land relief.

Keywords: simulation modeling, operation of a shell, fragmentation field, zones of defeat, the algorithm of statistical tests

Введение

Проблема моделирования осколочного поля имеет важное значение для решения задачи повышения эффективности действия снаряда у цели. Экспериментальные стендовые испытания, проводимые в статике, позволяют определять характер разлета осколков и их основные характеристики: распределение осколков по массе, средний мидель, зависимость меридионального угла от положения осколка относительно снаряда и т.п. В динамических условиях постановка эксперимента крайне затруднена, поскольку точка подрыва зависит от многих случайных факторов, что затрудняет расстановку регистрирующей аппаратуры для определения траекторий осколков. В этой

связи важное значение приобретает имитационное моделирование осколочного поля при срабатывании снаряда на траектории.

Алгоритм решения задачи разлета осколков при срабатывании снаряда и построения зон поражения состоит из нескольких этапов (таблица).

1. Алгоритм определения точки подрыва снаряда

Траектория снаряда рассчитывается относительно центра масс снаряда на основе решения уравнения движения. Начальными условиями выстрела являются точка вылета снаряда $(x_0, y_0, z_0)^T$ в земной системе координат $O_0X_0Y_0Z_0$ [1], дирекционный угол $\alpha_{ц}$, угол стрельбы θ_0 . Траек-

Этапы имитационного моделирования осколочного поля

№ этапа	Название этапа	Вычисляемые параметры
I	Задание точки вылета снаряда из артиллерийского орудия и времени подрыва.	Положение снаряда, направление и скорость движения снаряда в точке срабатывания.
II	Расчет массы осколков на основе статистической модели разрушения снаряда.	Распределение осколков по массе.
III	Расчет максимальной скорости, начального положения и направления движения осколков.	Векторы начальных скоростей осколков.
IV	Расчет разлета осколков на основе решения уравнения движения.	Траектории движения осколков.
V	Расчет зоны поражения на основе рассчитанных траекторий движения осколков.	Плотность осколочного потока и границы зоны поражения.

тория снаряда рассчитывается в плоскости стрельбы в стартовой системе координат $O_c X_c Y_c Z_c$. Будем полагать, что начальное положение в стартовой системе координат совпадает с началом координат $O_c = (0,0,0)^T$.

В конце функционирования (момент срабатывания) снаряда $t_{к.ф.}$ определяем его положение в стартовой системе координат $(x_{к.ф.}, y_{к.ф.}, z_{к.ф.})^T$, скорость снаряда $\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)^T$, угол наклона траектории θ и угол пути ψ . Координаты положения снаряда $(x_1, y_1, z_1)^T$ в земной системе координат определяются из уравнений [1]:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \alpha_{ц} & 0 & -\sin \alpha_{ц} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_{ц} & 0 & \cos \alpha_{ц} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{к.ф.} \\ y_{к.ф.} \\ z_{к.ф.} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

2. Алгоритм расчета массы осколков

В соответствии с [2, 3] дифференциальный закон распределения массы осколков примем в виде гипервейбулловского бимодального распределения, которое позволяет описывать осколочные спектры в широком диапазоне сочетаний металл– взрывчатое вещество (ВВ)–геометрия:

$$f(m) = \frac{1}{\langle m \rangle} \left\{ \xi \alpha \left(\frac{m}{m_a} \right)^\alpha \exp \left[- \left(\frac{m}{m_a} \right)^\alpha \right] + (1 - \xi) \beta \left(\frac{m}{m_b} \right)^\beta \exp \left[- \left(\frac{m}{m_b} \right)^\beta \right] \right\}, \quad (2)$$

где

$$\langle m \rangle = \xi m_a \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) + (1 - \xi) m_b \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) -$$

математическое ожидание массы осколка;

$\Gamma(z)$ — гамма-функция;

m_a, m_b, α, β — характеристические массы и показатели качества основного и сопутствующего спектра, соответственно;

ξ — коэффициент, устанавливающий соотношение двух частей спектра.

На рис. 1 представлен дифференциальный закон распределения массы с экспериментально подобранными параметрами [2] для 152-мм снаряда 53-ОФ-540: $m_a = 11,4$ г; $m_b = 0,15$ г; $\xi = 0,25$; $\alpha = 0,7$; $\beta = 0,4$; $\langle m \rangle = 3,98$ г.

Моделирование масс осколков осуществляется методом суперпозиции [4]. Алгоритм моделирования спектра масс осколков состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Задаем массу M метаемои оболочки. Обнуляем накопленную массу осколков $S = 0$. Номер осколка $n = 1$.

Шаг 2. Моделируем массу n -го осколка методом суперпозиции вейбуловских распределений основного и сопутствующих спектров. Для этого генерируем η_0 и η_1 — равномерно распределенные случайные величины на отрезке $[0, 1]$. Если $\eta_0 < \xi$, тогда моделируем вейбуловскую случайную величину с параметрами m_a и α :

$$m_n = m_a [-\ln(\eta_1)]^{1/\alpha},$$

иначе — с параметрами m_b и β :

$$m_n = m_b [-\ln(\eta_1)]^{1/\beta}.$$

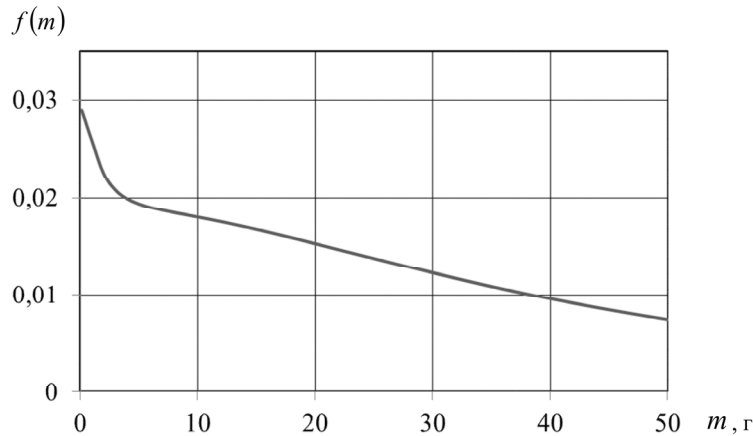


Рис. 1. Дифференциальная функция распределения массы

Шаг 3. Если $S + m_n < M$, тогда увеличиваем накопленную массу $S = S + m_n$, номер осколка $n = n + 1$ и идем на шаг 2, иначе пересчитываем массу последнего осколка $m_n = M - S$ и заканчиваем итерации.

3. Алгоритм определения максимальной скорости, начального положения и направления движения осколков

Максимальная скорость осколков рассчитывается на основе закона сохранения энергии [2, 5]:

$$u_{\max} = \left[\frac{mQ - m \left(\frac{A}{a_0} \exp\left(-\frac{7a_0}{\rho_0}\right) + \frac{C}{\mu - 1} \left(\frac{7}{\rho_0}\right)^{1-\mu} \right) - \frac{M}{\rho_M} A_f}{W\rho_B \frac{k+1}{2} \left(\left(\frac{R}{R_0}\right)^N - 1 \right) + \frac{m}{\psi(n)} + \frac{M}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где m, Q — масса и теплота взрывчатого разложения продуктов детонации, соответственно; M, ρ_M — масса и плотность материала метаемой оболочки, соответственно; A_f — энергия разрушения единицы объема материала оболочки; R_0 — начальный внешний радиус оболочки; R, W — внешний радиус и объем оболочки в момент ее полного разгона соответственно; ρ_B — плотность невозмущенного воздуха; A, C, a_0, μ — эмпирические параметры уравнения изохропы продуктов детонации. Для цилиндрического разлета принимается $N = 2$ и $\psi(n) = 2n + 2$.

Для расчета начального положения осколков введем ряд допущений [6, 7]:

- снаряд имеет осесимметричный вид;
- вся масса оболочки равномерно распределена в цилиндрической оболочке радиуса $R_0 = D/2$, где D — калибр снаряда (рис. 2, а);
- массы осколков не зависят от расположения;
- начальные скорости осколков — одинаковы;
- угол в меридиональной плоскости зависит только от положения осколка по оси симметрии

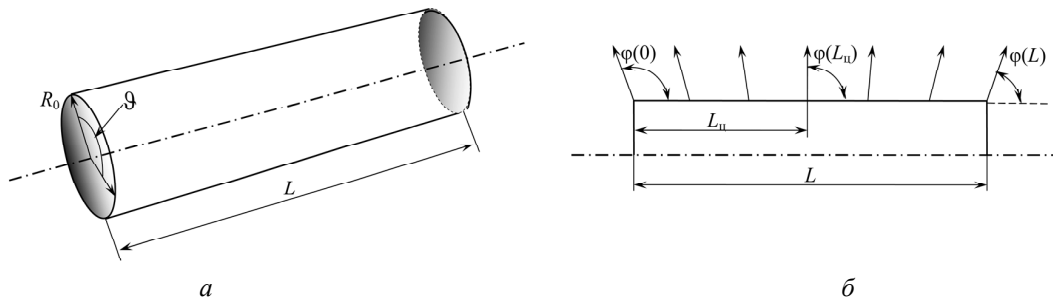


Рис. 2. Цилиндрическая оболочка (а) и зависимость угла в меридиональной плоскости от положения осколка вдоль снаряда (б)

снаряда $\varphi = \varphi(x)$, $x \in [0, L]$, где 0 — соответствует дну снаряда; L — длина снаряда; $L_{\text{ц}}$ — центр масс снаряда (рис. 2, б).

С учетом рассматриваемых допущений начальные скорости осколков одинаковые:

$$u_i = u_{\text{max}}, \quad i = 1, \dots, n;$$

углы в экваториальной плоскости равномерно распределены на отрезке $[0, 2\pi]$:

$$\vartheta_i = 2\pi \eta_{i1}, \quad i = 1, \dots, n,$$

где η_{i1} — равномерно распределенные на отрезке $[0, 1]$ случайные величины. Положение осколка вдоль оси снаряда равномерно распределено на отрезке $[0, L]$:

$$L_i = L \eta_{i2}, \quad i = 1, \dots, n,$$

где η_{i2} — равномерно распределенные на отрезке $[0, 1]$ случайные величины. Углы в меридиональной плоскости вычисляются в точках L_i :

$$\varphi_i = \varphi(L_i), \quad i = 1, \dots, n.$$

$$\begin{pmatrix} x_i(0) \\ y_i(0) \\ z_i(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\cos \psi \sin \theta & \sin \psi \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta & \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{ci}(0) \\ y_{ci}(0) \\ z_{ci}(0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{\text{к.ф.}} \\ y_{\text{к.ф.}} \\ z_{\text{к.ф.}} \end{pmatrix}, \quad i = 1, \dots, n,$$

а компоненты скорости осколков с учетом скорости движения снаряда $\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)^T$ — по формуле:

$$\begin{pmatrix} u_{xi}(0) \\ u_{yi}(0) \\ u_{zi}(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\cos \psi \sin \theta & \sin \psi \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta & \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{xci}(0) \\ u_{y_{ci}}(0) \\ u_{z_{ci}}(0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}, \quad i = 1, \dots, n.$$

Окончание расчета определяется при выполнении одного из условий [9]:

$$m_i u_i^2(t)/2 \leq W_{\text{кр}} \quad \text{или} \quad y_i(t) \leq H(x_i(t), z_i(t)),$$

где $u_i(t)$ — скорость i -го осколка в момент времени t ; $W_{\text{кр}} = 100$ Дж — минимальная убойная энергия осколка; $y_i(t)$ — высота i -го осколка в момент времени t ; $H(x_i(t), z_i(t))$ — расстояние от центра Земли до ее поверхности на траектории движения осколка в момент времени t .

Таким образом, для неподвижного снаряда начальные координаты осколков определяются по формуле:

$$\begin{pmatrix} x_{ci}(0) \\ y_{ci}(0) \\ z_{ci}(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_i - L_{\text{ц}} \\ R_0 \cos \vartheta_i \\ R_0 \sin \vartheta_i \end{pmatrix},$$

а компоненты скорости осколков:

$$\begin{pmatrix} u_{xci}(0) \\ u_{y_{ci}}(0) \\ u_{z_{ci}}(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_i \cos \varphi_i \\ u_i \cos \vartheta_i \sin \varphi_i \\ u_i \sin \vartheta_i \sin \varphi_i \end{pmatrix}.$$

4. Алгоритм расчета траектории осколков

Движение осколков по траектории представлено в виде системы дифференциальных уравнений, которая решается численно методом Рунге-Кутты [8].

В стартовой системе координат с учетом угла наклона траектории θ и угла пути ψ начальные координаты осколков пересчитываются по формуле:

В результате решения системы дифференциальных уравнений получаем траектории осколков в стартовой системе координат:

$$T_{ci} = \begin{pmatrix} x_i(0) & x_i(t_1) & \dots & x_i(t_{N_i}) \\ y_i(0) & y_i(t_1) & \dots & y_i(t_{N_i}) \\ z_i(0) & z_i(t_1) & \dots & z_i(t_{N_i}) \end{pmatrix}, \quad i = 1, \dots, n,$$

где t_j — время, $j = 0, \dots, N_i$; начальный момент времени $t_0 = 0$; N_i — число итераций.

5. Алгоритм расчета зоны поражения

После расчета координат осколков в стартовой системе можно определить их координаты в земной системе по формуле:

$$T_i = \begin{pmatrix} x_0 & x_0 & x_0 \\ y_0 & y_0 & \dots & y_0 \\ z_0 & z_0 & & z_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \alpha_{ц} & 0 & -\sin \alpha_{ц} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_{ц} & 0 & \cos \alpha_{ц} \end{pmatrix} T_{ci},$$

$$i = 1, \dots, n.$$

В результате получаем область разлета осколков в земной системе координат (рис. 3).

Алгоритм построения зоны поражения и плотности осколочного потока состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Проводится R -кратное имитационное моделирование разлета осколков. В результате получим K траекторий осколков T_i , $i = 1, \dots, K$.

Шаг 2. По расчетным траекториям T_i , $i = 1, \dots, K$, определяются точки их пересечения с поверхностью Земли. Если траектория не пересекается с поверхностью Земли, тогда она исключается из рассмотрения. Обозначим множество точек падения осколков

$$P = \{p_i = (x_i, y_i, z_i), i = 1, \dots, K', K' \leq K\}.$$

Шаг 3. Строится прямоугольная область, которая содержит все множество P точек падения осколков (см. рис. 3). Данную прямоугольную область разделим на одинаковые ячейки, покрывающие всю область. Площадь ячеек обозначим

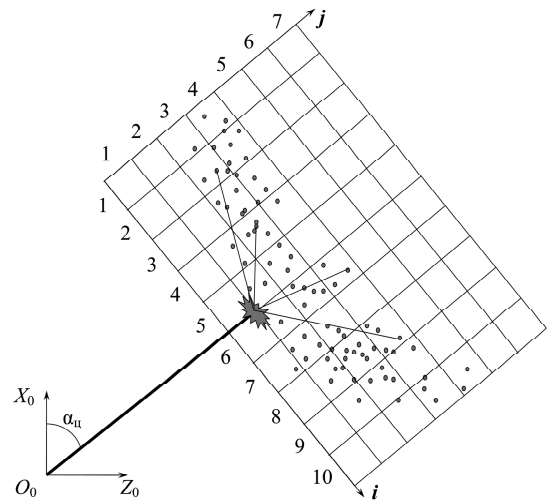


Рис. 3. Область разлета осколков после срабатывания снаряда

через S_{ij} , где индексы указывают их место положения, а число осколков, попавших в соответствующую ячейку, — n_{ij} , $i = 1, \dots, I$, $j = 1, \dots, J$.

Шаг 4. Вычисляется плотность падения осколков (плотность осколочного потока):

$$\Pi_{ij} = n_{ij} / (R \cdot S_{ij}), i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J.$$

Отображение результатов моделирования осуществляется в программном комплексе моделирования полигонных испытаний артиллерийских систем [10], созданном в среде разработки приложений MS Visual Studio на языке C# на основе SDK NeoAxis 3D Engine.

Расчетные траектории поражающих элементов представлены на рис. 4. Основные характеристики выстрела: масса снаряда — 22,715 кг, масса ВВ — 3,402 кг, высота подрыва — 12,8 м, скорость — 780 м/с. Как видно из рис. 4, некото-

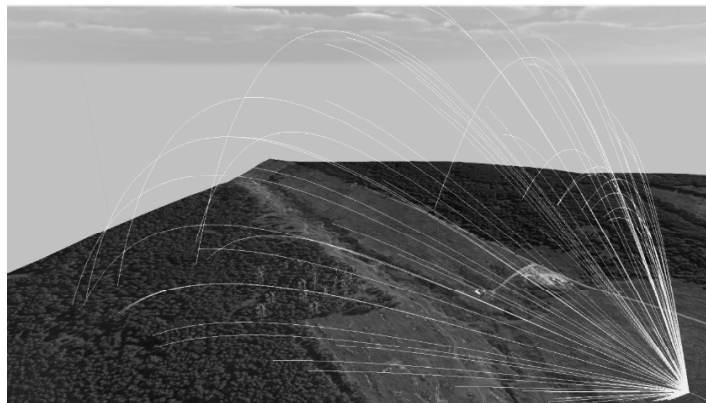


Рис. 4. Траектории осколков снаряда (вид слева)

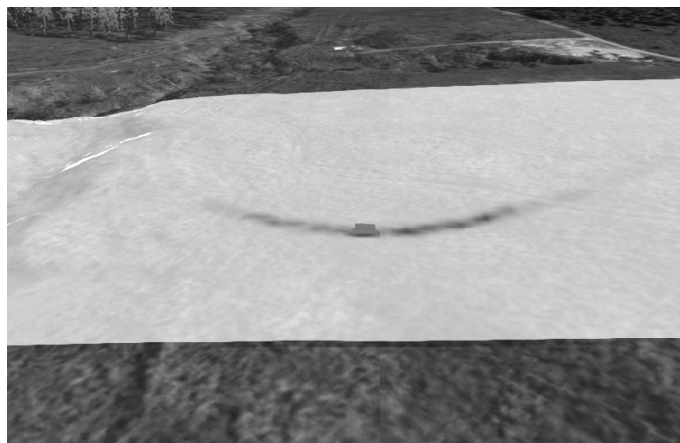


Рис. 5. Зона поражения и плотность осколочного потока при срабатывании снаряда на траектории

рые из траекторий заканчиваются в воздухе, т.к. их убойная энергия в этот момент оказалась меньше заданного критического значения.

В программном комплексе реализована возможность учета рельефа местности при построении зон поражения. Область поражения и плотность осколочного поля представлены на рис. 5. Как видно из рисунка, основная масса осколков распределена вблизи подрыва снаряда и сосредоточена в области, имеющей дугообразный вид, что объясняется высокой скоростью и цилиндрической формой разрыва снаряда.

Выводы

Разработанная программа позволяет вычислять траектории разлета осколков и зоны осколочного поражения с учетом рельефа местности. Полученные в расчете данные могут служить основой для размещения мишеней на полигоне, определения времени подрыва снаряда и расстановки измерительной аппаратуры, что будет способствовать повышению качества экспериментального определения характеристик осколочного действия снаряда и снижению затрат на подготовку и проведение испытаний.

Литература

1. Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н. Внешняя баллистика. — М.: Машиностроение, 2005. — 608 с.

2. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, испр. В 2 т. Т. 1. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 832 с.

3. Балаганский И.А., Мерзневский Л.А. Действие средств поражения и боеприпасов. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. — 408 с.

4. Харин Ю.С., Степанова М.Д. Практикум на ЭВМ по математической статистике. — Минск: Университетское, 1987. — 304 с.

5. Липанов А.М., Русяк И.Г., Тененев В.А., Суфиянов В.Г. Математическое моделирование разлета осколков при срабатывании снаряда на траектории // Известия РАН. № 3. 2015. — С. 79–84.

6. Никулин Е.Н., Сергеев Е.Н. Оценка эффективности осколочного действия осколочно-фугасных снарядов. 2015. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т. 2007. 2015. — 32 с.

7. Никулин Е.Н. Оценка эффективности действия бронебойных подкалиберных и осколочных снарядов на базе вычислительного эксперимента. 2015. — СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2010. 2015. — 148 с.

8. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. — М.: Наука, 1989. — 432 с.

9. Знаменский Е.А. Действие средств поражения и боеприпасов: справочное пособие. — СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2010. — 95 с.

10. Липанов А.М., Вагин А.В., Русяк И.Г., Суфиянов В.Г. К вопросу о моделировании полигонных испытаний артиллерийских систем // Известия РАН. № 4. 2014. — С. 46–52.