

УДК 531.567 + 519.245

DOI 10.22213/2410-9304-2019-1-57-62

МЕТОДИКА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАССЕЙВАНИЯ СНАРЯДОВ

С. А. Королев, кандидат физико-математических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В статье представлены математические модели и методы решения задач внешней баллистики, объединенные в методику имитационного моделирования рассеивания снарядов. При расчете траектории движения снаряда используются параметрические зависимости для аэродинамических коэффициентов, полученные на основе решения задачи внешнего обтекания. Определены и систематизированы основные факторы, влияющие на полет снаряда, выделены факторы, вызывающие рассеивание снарядов. Имитационное моделирование рассеивания снарядов проводилось методом статистических испытаний Монте-Карло. Для проверки гипотезы о нормальном распределении результатов моделирования используется критерий Пирсона. На основе разработанной имитационной модели реализована методика определения параметров зоны безопасности при стрельбе: глубина излетного пространства и ширина боковых защитных зон.

Моделирование рассеивания снарядов и расчет параметров зоны безопасности проводились для осколочно-фугасного снаряда гаубицы калибра 152 мм при стрельбе на максимальную дальность. По результатам имитационного моделирования построены эллипс рассеивания и график частот. Проведен расчет отклонения дальности и боковой координаты, вызванные максимально возможными отклонениями метеорологических и баллистических условий стрельбы. Представлены результаты расчета параметров зоны безопасности при стрельбе из гаубицы калибра 152 мм на максимальную дальность.

Представленная методика реализована в виде программного комплекса имитационного моделирования рассеивания снарядов. Результаты моделирования могут быть использованы для исследования влияния различных факторов на рассеивание снарядов, построения таблиц стрельбы, а также определения зон безопасности при проведении полигонных испытаний.

Ключевые слова: внешняя баллистика, рассеивание снарядов, метод Монте-Карло, имитационное моделирование, численный эксперимент.

Введение

При проектировании и отработке боеприпасов ствольной артиллерии преимущественно применяются эмпирические методы исследований. Это требует значительных материальных затрат при проведении большого количества натурных экспериментов. В силу ограниченности диапазона изменения условий опыта натуральный эксперимент не позволяет исследовать полный спектр факторов, влияющих на кучность и точность стрельбы. В контексте вышесказанного на первый план выходит численный эксперимент и имитационное моделирование как перспективный метод исследования законов рассеивания снарядов.

Методика имитационного моделирования стрельбы из артиллерийских систем включает:

- расчет траектории движения снаряда [1, 2];
- решение задачи внешнего обтекания и расчет аэродинамических коэффициентов снаряда заданной формы [3];
- моделирование факторов, влияющих на рассеивание снарядов;
- методику проведения статистических испытаний и определения характеристик рассеивания.

Моделирование факторов и расчет характеристик рассеивания снарядов

Методика определения характеристик рассеивания снарядов основана на методе статистических испытаний Монте-Карло. На основе многократного повторения численного эксперимента при случайном задании факторов, влияющих на полет снаряда, формируется статистическая выборка результатов стрельбы: дальности и бокового отклонения снарядов. По полученной выборке определяются характеристики закона распределения результатов: средние значения, срединные и максимальные отклонения, графики частот.

Все факторы, влияющие на полет снаряда, разделяют на три группы [4]:

- баллистические условия;
- геофизические условия;
- метеорологические условия.

К баллистическим условиям относятся: масса снаряда (m), начальная скорость (V_0), угол стрельбы (θ_0), дирекционный угол ($\alpha_{ц}$) и др. Для каждого фактора задается характерный диапазон разброса значений.

К геофизическим условиям стрельбы относятся: географическая широта (B), ускорение силы тяжести (g), радиус Земли (R_3) и др. Изменение геофизических условий вносит систе-

матическое отклонение параметров стрельбы от стандартных и на рассеивание снарядов влияния не оказывает.

К метеорологическим условиям относят параметры атмосферы: давление (p), температура (T), скорость (w) и направление ветра (α_w). Наибольший вклад в рассеивание снарядов вносит ветер. Изменение ветра в горизонтальной плоскости незначительно, поэтому для небольших дальностей стрельбы не учитывается. Нестационарные процессы изменения ветра (порывы ветра) сложно регистрируемы на практике и, как правило, не учитываются.

Распределение факторов стрельбы задается по нормальному закону [5]:

$$a_i = m_{ai} + \sigma_{ai}n,$$

где m_{ai} – математическое ожидание i -го фактора; σ_{ai} – среднеквадратическое отклонение i -го фактора; n – случайная величина со стандартным нормальным законом распределения ($m_n = 0$, $\sigma_n = 1$).

Для моделирования случайной величины со стандартным нормальным законом распределения используется преобразование Бокса – Мюллера [6]:

$$n = \sqrt{-2 \ln r_1} \cos(2\pi r_2),$$

где r_1, r_2 – равномерно распределенные случайные величины на интервале $(0; 1)$.

Характеристики закона распределения точек падения снарядов (математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение) определяются на основе результатов имитационного моделирования по формулам

$$m_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad \sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2},$$

$$m_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i, \quad \sigma_z = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (z_i - m_z)^2},$$

где N – количество испытаний (выстрелов); x_i, z_i – дальность и боковое отклонение в плоскости стрельбы в i -м испытании.

Для артиллерийских снарядов из-за влияния большого количества случайных факторов можно принять нормальный закон распределения параметров. Из условия, что в область срединного отклонения $x \in [-B_d; B_d]$, $z \in [-B_6; B_6]$ попадает 50 % снарядов, следует $B_d = 0,675\sigma_x$,

$B_6 = 0,675\sigma_z$. Радиусы эллипса рассеивания, которые определяются по максимальному отклонению снарядов, принимаются равными $4B_d$, $4B_6$. При этом вероятность попадания снарядов в данную область равна 99,3 %.

Для проверки гипотезы о нормальном распределении результатов моделирования используется критерий Пирсона [7]:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(n_j - n_j^0)^2}{n_j^0},$$

где k – количество групп; n_j – расчетные частоты; n_j^0 – теоретические частоты. Теоретические частоты n_j^0 нормального распределения определяются по формуле

$$n_j^0 = \frac{N B_d}{\sigma_x} \phi(u_j),$$

где $\phi(u_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u_j^2/2}$, $u_j = \frac{x_j^0 - m_x}{\sigma_x}$; x_j^0 – значение случайной величины в центре j -й группы испытаний.

Критическое значение критерия $\chi_{кр}^2$ определяется для заданного уровня значимости α и числа степеней свободы, равного $k-3$. Так, для $\alpha = 0,05$ и $k = 8$ имеем $\chi_{кр}^2 = 11,07$. Если расчетное значение критерия Пирсона $\chi^2 < \chi_{кр}^2$, то гипотеза о нормальном законе распределения случайной величины принимается.

Методика расчета зоны безопасности при стрельбе

На основе разработанной имитационной модели реализована методика определения параметров зоны безопасности при стрельбе. В соответствии с [8] проводится расчет глубины излетного пространства и ширины боковых защитных зон, обеспечивающих безопасность ведения стрельбы на полигоне из артиллерийских систем на максимальные дальности.

Излетное пространство – это максимальное расстояние вдоль основного направления стрельбы на полигоне, в пределах которого могут поражаться живая сила, вооружение и военная техника. Боковая защитная зона – это максимальные расстояния по обе стороны от основного направления стрельбы на полигоне, в пределах которых могут поражаться живая сила, вооружение и военная техника.

Глубина излетного пространства рассчитывается по формуле [9]

$$X_{\Sigma} = X_{\max} + \Delta X_{\max} + 5 B_d + r_6 + X_{\text{из}} + X_{\text{оп}},$$

где X_{\max} – максимальная дальность стрельбы на наибольшем заряде; ΔX_{\max} – отклонение дальности полета снаряда, вызванное максимально возможными отклонениями метеорологических и баллистических условий от табличных; $5 B_d$ – максимальное отклонение по дальности вследствие рассеивания (вероятность 99,9 %); r_6 – радиус разлета осколков; $X_{\text{из}}$ – максимальное расстояние, которое может пролететь неразорвавшийся боеприпас после падения; $X_{\text{оп}}$ – расстояние между рубежами открытия и прекращения огня.

Ширина боковой защитной зоны определяется по формуле

$$Z = \Delta Z_{\max} + 5 B_6 + r_6,$$

где ΔZ_{\max} – боковое отклонение точек падения снарядов, вызванное максимальными отклонениями метеорологических и баллистических

условий стрельбы от табличных; $5 B_6$ – максимальное отклонение в боковом направлении вследствие рассеивания снарядов.

Параметры X_{\max} , ΔX_{\max} , ΔZ_{\max} , $5 B_d$, $5 B_6$ рассчитываются на основе разработанной методики имитационного моделирования стрельбы. Радиус разлета осколков определяется с помощью методики имитационного моделирования разлета осколков [10, 11]. Для параметра $X_{\text{из}}$ задается табличное значение [12], для стационарной установки $X_{\text{оп}} = 0$.

Результаты моделирования рассеивания снарядов и расчета зоны безопасности при стрельбе

Моделирование рассеивания снарядов проводилось для осколочно-фугасного снаряда гаубицы калибра 152 мм при стрельбе на максимальную дальность (масса снаряда $m = 46$ кг, начальная скорость $V_0 = 945$ м/с). Максимальная дальность составила $X_{\max} = 28,1$ км при угле стрельбы $\theta_{\max} = 50,5^\circ$ [13]. Отклонения баллистических и метеорологических условий представлены в табл. 1 [14].

Таблица 1. Случайные отклонения баллистических и метеорологических условий

Параметр	Δt	ΔV_0	$\Delta \theta_0$	$\Delta \alpha_{\text{ц}}$	ΔT_3	δ_0	w
Случайное отклонение	$\pm 0,67\%$	$\pm 0,4\%$	$\pm 0,05^\circ$	$\pm 0,05^\circ$	$\pm 0,5^\circ\text{C}$	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,3$ м/с

На рис. 1 представлены отклонения по продольной и боковой координатам точек падения снарядов, полученные путем имитационного моделирования, здесь же построен эллипс рассеивания. Радиусы эллипса рассеивания при стрельбе на максимальную дальность равны $4 B_d = 360,3$ м, $4 B_6 = 100,1$ м (вероятность попадания в область 99,3 %).

На рис. 2 представлено распределение расчетных частот по группам для серии испытаний $N = 200$. Расчетное значение критерия Пирсона $\chi^2 = 2,67 < \chi_{\text{кр}}^2 = 11,07$. Таким образом, результаты моделирования подтверждают гипотезу о нормальном распределении характеристик рассеивания снарядов.

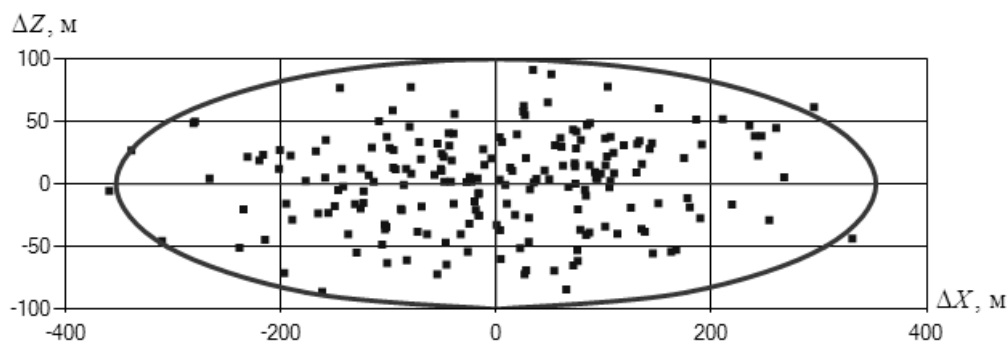


Рис. 1. Результаты моделирования рассеивания и эллипс рассеивания

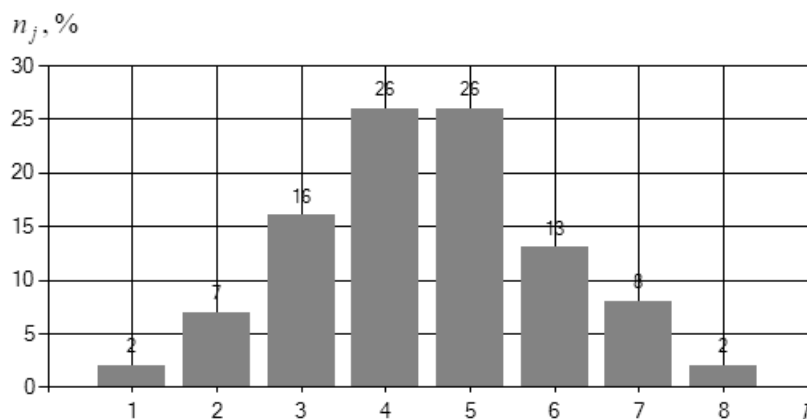


Рис. 2. График расчетных относительных частот для серии испытаний $N = 200$

При вычислении значений ΔX_{\max} , ΔZ_{\max} за максимально возможные отклонения баллистических и метеорологических условий от табличных принимаются значения, приведенные в

табл. 2 [15]. В табл. 2 также представлены расчетные значения отклонения дальности и боковой координаты за счет приведенных факторов.

Таблица 2. Отклонения дальности и боковой координаты, вызванные максимально возможными отклонениями метеорологических и баллистических условий

Параметр	$\Delta V_{0 \max}$	$\Delta \alpha_{ц \max}$	$\Delta T_{з \max}$	ΔP_{\max}	ΔT_{\max}	w_{\max}	Суммарное отклонение
Максимальное отклонение	+5%	$\pm 6^\circ$	+35 °C	-50 мм рт. ст.	+35 °C	20 м/с	—
Отклонение ΔX_{\max}	2255,3	—	308,5	1520,2	835,2	1372,4	6465,0
Отклонение ΔZ_{\max}	—	3427,1	—	—	—	1038,2	4473,1

Отклонение дальности за счет баллистических условий составляет 2563,8 м (9 % от максимальной дальности стрельбы), отклонение за счет метеорологических факторов – 3727,8 м (13 % от максимальной дальности). На боковое отклонение влияют изменение дирекционного угла стрельбы и боковой ветер.

Результаты расчета зоны безопасности при стрельбе из гаубицы калибра 152 мм на макси-

мальную дальность приведены в табл. 3. Расчетные значения глубины излетного пространства и ширины боковой защитной зоны соответственно равны 37,6 и 5,2 км, что в общем согласуется с табличными значениями 39,9 и 4,9 км, приведенными в [16]. На рис. 3 представлено графическое изображение зоны безопасности, полученное в программе имитационного моделирования стрельбы [17].

Таблица 3. Результаты расчета зоны безопасности при стрельбе на максимальную дальность

Параметр	X_{\max}	ΔX_{\max}	$5 B_d$	r_6	$X_{из}$	$X_{оп}$	X_{Σ}
Значение, м	28 086,5	6465,0	450,4	580	2000	0	37 581,9
Параметр	ΔZ_{\max}	$5 B_6$	r_6	Z_{Σ}			
Значение, м	4473,1	125,1	580	5178,2			

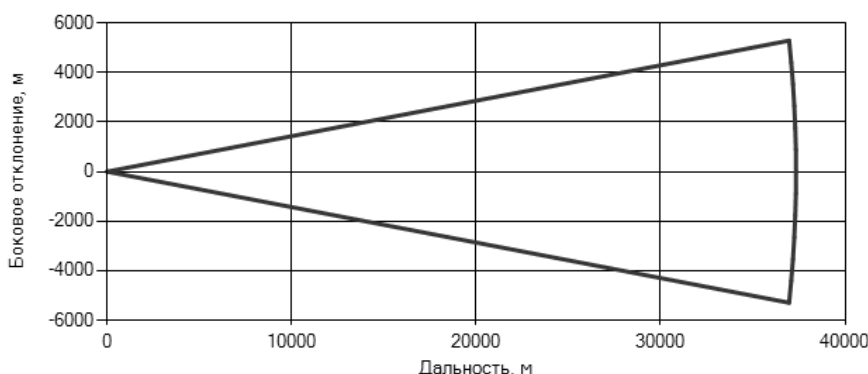


Рис. 3. Графическое изображение зоны безопасности при стрельбе

Заключение

Разработана методика имитационного моделирования рассеивания снарядов, основанная на расчете траектории движения снаряда, аэродинамические коэффициенты которого определяются из решения задачи внешнего обтекания. Определены и систематизированы основные факторы, влияющие на полет снаряда, выделены факторы, вызывающие рассеивание снарядов. Для определения характеристик закона рассеивания реализован метод статистических испытаний Монте-Карло. По результатам имитационного моделирования построены эллипс рассеивания и график частот. Представленная методика реализована в виде программного комплекса имитационного моделирования рассеивания снарядов. Результаты моделирования могут быть использованы для исследования влияния различных факторов на рассеивание снарядов, построения таблиц стрельбы для вновь разрабатываемых боеприпасов, а также определения зон безопасности при проведении полигонных испытаний.

Библиографические ссылки

1. Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н. Внешняя баллистика. М. : Машиностроение, 2005. 608 с.
2. Королев С. А., Русяк И. Г., Суфиянов В. Г. Методика расчета траектории движения снарядов и ракет при стрельбе с подвижного носителя // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 4 (31). С. 13–18.
3. Расчет траектории движения снаряда в атмосфере с учетом гидродинамики его обтекания / И. Г. Русяк, А. И. Карпов, С. А. Королев, С. А. Карсканов // Вопросы оборонной техники. Сер. 14. 2015. № 2. С. 130–140.
4. Баллистика ствольных систем / В. В. Бурлов и др. ; РАН; под ред. Л. Н. Лысенко и А. М. Липанова. М. : Машиностроение, 2006. 461 с.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М. : КНОРУС, 2010. 664 с.
6. Харин Ю. С., Степанова М. Д. Практикум на ЭВМ по математической статистике. Минск : Изд-во «Университетское», 1987. 304 с.
7. Там же.

8. Руководство по организации выполнения требований безопасности на объектах полевой учебно-материальной базы Вооруженных Сил Российской Федерации. Приложение №2 к приказу Министра обороны РФ от 2 марта 2010 г. № 150.

9. Там же.

10. Моделирование разлета осколков и определение зон поражения при подрыве осколочно-фугасного снаряда / Суфиянов В. Г., Русяк И. Г., Королев С. А., Белобородов М. Н., Фурсов Ю. С. // Вопросы оборонной техники. Сер. 14. 2015. № 2. С. 175-177.

11. Имитационное моделирование осколочного поля при срабатывании снаряда на траектории / А. В. Вагин, А. М. Липанов, И. Г. Русяк, В. Г. Суфиянов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 4 (89). С. 15-20.

12. Руководство по организации выполнения требований безопасности на объектах полевой учебно-материальной базы Вооруженных Сил Российской Федерации. Приложение №2 к приказу Министра обороны РФ от 2 марта 2010 г. № 150.

13. Королев С. А., Липанов А. М., Русяк И. Г. Исследование путей повышения дальности стрельбы ствольной артиллерии // Вестник Ижевского гос. техн. ун-та им. М.Т. Калашникова. 2018. №3. Т. 21. С. 185-191. DOI 10.22213/2413-1172-2018-3-185-191.

14. Баллистика ствольных систем / В. В. Бурлов и др. ; РАН; под ред. Л. Н. Лысенко и А. М. Липанова. М. : Машиностроение, 2006. 461 с.

15. Руководство по организации выполнения требований безопасности на объектах полевой учебно-материальной базы Вооруженных Сил Российской Федерации. Приложение №2 к приказу Министра обороны РФ от 2 марта 2010 г. № 150.

16. Там же.

17. Rusyak I., Sufyanov V., Korolev S., Ermolaev M. Software Complex for Simulation of Internal and External Ballistics of Artillery Shot // В сб. ICMT 2015 – International Conference on Military Technologies 2015 5. 2015. С. 7153682. DOI: 10.1109/MILTECHS.2015.7153682.

References

1. Dmitriyevskiy A.A., Lysenko L.N. *Vneshnyaya ballistika* [External ballistics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 608 p. (in Russ.).

2. Korolev S.A., Rusyak I.G., Sufiyarov V.G. [Method for calculating the trajectory of projectiles and rockets shooting from moving carrier]. *Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve*, 2016, no. 4 (31), pp. 13-18 (in Russ.).

3. Rusyak I.G., Karpov A.I., Korolev S.A., Karskanov S.A. [Calculation trajectory of projectile in the atmosphere taking into account hydrodynamics of the external flow]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 14*, 2015, no. 2, pp. 130-140 (in Russ.).

4. Burlov V.V. i dr. *Ballistika stvol'nykh sistem* [Ballistics of barrel systems] Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 461 p. (in Russ.).

5. Wentzel E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, KNORUS Publ., 2010. 664 p. (in Russ.).

6. Kharin Yu.S., Stepanova M.D. *Praktikum na EVM po matematicheskoy statistike* [Workshop on computers in mathematical statistics]. Minsk, Publ. "Universitetskoye", 1987, 304 p. (in Russ.).

7. Ibid.

8. *Rukovodstvo po organizatsii vypolneniya trebovaniy bezopasnosti na ob'yektakh polevoy uchebno-material'noy bazy Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii* [Guidance on the organization of the implementation of security requirements at the field training facilities of the Armed Forces of the Russian Federation]. Appendix No. 2 to the Order of the Minister of Defense of the Russian Federation of March 2, 2010 No. 150 (in Russ.).

9. Ibid.

10. Sufiyarov V.G., Rusyak I.G., Korolev S.A., Beloborodov M.N., Fursov Yu.S. [Solve the problem of fragments emission and determination of affected areas at undermining a high-explosive shell]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 14*, 2015, no. 2, pp. 175-177 (in Russ.).

11. Vagin A.V., Lipanov A.M., Rusyak I.G., Sufiyarov V.G. [Simulation modeling of fragmentation field

at operation of a shell on a trajectory]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleryskikh nauk*, 2015, no. 4 (89). pp. 15-20. (in Russ.).

12. *Rukovodstvo po organizatsii vypolneniya trebovaniy bezopasnosti na ob'yektakh polevoy uchebno-material'noy bazy Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii* [Guidance on the organization of the implementation of security requirements at the field training facilities of the Armed Forces of the Russian Federation]. Appendix No. 2 to the Order of the Minister of Defense of the Russian Federation of March 2, 2010 No. 150 (in Russ.).

13. Korolev S.A., Lipanov A.M., Rusyak I.G. [Investigation of the Ways of Increasing the Shooting Range of the Barrel Artillery]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universitetata imeni M. T. Kalashnikova*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 185-191. (in Russ.). DOI 10.22213/2413-1172-2018-3-185-191.

14. Burlov V.V. i dr. *Ballistika stvol'nykh sistem* [Ballistics of barrel systems] Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 461 p. (in Russ.).

15. *Rukovodstvo po organizatsii vypolneniya trebovaniy bezopasnosti na ob'yektakh polevoy uchebno-material'noy bazy Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii* [Guidance on the organization of the implementation of security requirements at the field training facilities of the Armed Forces of the Russian Federation]. Appendix No. 2 to the Order of the Minister of Defense of the Russian Federation of March 2, 2010 No. 150 (in Russ.).

16. Ibid.

17. Rusyak I., Sufiyarov V., Korolev S., Ermolaev M. Software Complex for Simulation of Internal and External Ballistics of Artillery Shot. In proceedings: ICMT 2015 - International Conference on Military Technologies 2015 5, 2015, P. 7153682. DOI: 10.1109/MILTECHS.2015.7153682.

Simulation Method of Projectiles Dispersion

S. A. Korolev, PhD (Physics and Mathematics), Kalashnikov ISTU

The paper presents mathematical models and methods for solving problems of external ballistics, combined into a methodology for simulating the dispersion of projectiles. When calculating the trajectory of the projectile, parametric dependencies are used for the aerodynamic coefficients obtained on the basis of the solution of the external flow problem. The main factors affecting the flight of the projectile are identified and systematized; the factors causing the dispersion of projectiles are highlighted. Simulation modeling of the dispersion of projectiles was carried out by the Monte Carlo statistical test method. To test the hypothesis about the normal distribution of simulation results, the Pearson criterion is used. On the basis of the developed simulation model, a method for determining the security zone parameters during firing has been implemented: the depth of the exhaust space and the width of the side protection zones.

Simulation of the dispersion of projectiles and calculation of the parameters of the safety zone were carried out for high-explosive fragmentation projectile 152 mm howitzers when firing at the maximum range. According to the results of simulation, an ellipse of dispersion and a graph of frequencies were constructed. The calculation is done for the deviation of the range and lateral coordinates caused by the maximum possible deviations of meteorological and ballistic shooting conditions. The results of the calculation of the parameters of the safety zone when firing a howitzer of 152 mm to the maximum range are presented.

The presented technique is implemented in the form of a software package for simulating the dispersion of projectiles. The simulation results can be used to study the influence of various factors on the dispersion of projectiles, the construction of firing tables, as well as the determination of safety zones during firing field testing.

Keywords: external ballistics, dispersion of projectiles, Monte-Carlo method, simulation modeling, numerical experiment.