

УДК 531.55+004.94

DOI: 10.22213/2410-9304-2019-3-80-88

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ВНЕШНЕБАЛЛИСТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

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

В. Г. Суфиянов, доктор технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Статья посвящена разработке математического и программного обеспечения решения задач внешней баллистики. Математическая модель траекторной задачи основана на системе уравнений движения снаряда, учитывающей вращение и колебания относительно центра масс. Параметрические зависимости для аэродинамических коэффициентов определяются с помощью численного моделирования внешнего обтекания снаряда. На основе математической модели внешней баллистики разработаны алгоритмы решения обратной задачи, имитационного моделирования рассеивания снарядов, стрельбы очередью с подвижного носителя.

Программный комплекс решения задач внешней баллистики включает блок расчетных модулей, реализующих представленные математические модели и вычислительные алгоритмы, базу данных параметров вооружения и результатов моделирования, систему визуализации результатов вычислительного эксперимента.

Представлены некоторые результаты решения задач внешней баллистики при проектировании и отработке ракетно-артиллерийского вооружения. Проведено сравнение результатов расчета траектории, полученных с использованием расчетной модели сопротивления и эмпирических законов сопротивления. Представлены результаты моделирования рассеивания снарядов и стрельбы из ракетно-артиллерийского вооружения с подвижного носителя. Результаты моделирования отображаются в системе трехмерной визуализации на виртуальной карте местности.

Ключевые слова: внешняя баллистика, траектория, обратная задача, рассеивание снарядов, математическое моделирование, программный комплекс, трехмерная визуализация.

Введение

Разработка новых типов боеприпасов ракетно-артиллерийского вооружения требует проведения большого объема дорогостоящих экспериментальных исследований и опытных работ. Для нового типа снаряда требовались свои таблицы, составлять которые приходилось годами, предварительно проведя полигонные стрельбы для определения параметров принятого закона сопротивления воздуха, главным образом коэффициента формы снаряда [1]. В силу ограниченности диапазона изменения условий опыта натурный эксперимент не позволяет исследовать полный спектр факторов, влияющих на кучность и точность стрельбы. В контексте вышесказанного на первый план выходит математическое моделирование и численный эксперимент.

Современный уровень развития компьютерных технологий позволяет создавать системы визуализации для моделирования сложных технических систем. Эти технологии широко используются для создания систем виртуальной реальности, в том числе при моделировании полигонных испытаний и обучении действиям в подготовке боевых операций [2–4].

В данной работе представлены результаты разработки математического и программного обеспечения для решения задач внешней балли-

стики при проектировании и отработке ракетно-артиллерийского вооружения.

Математическое обеспечение решения задач внешней баллистики

Решение прямой задачи внешней баллистики

Математическая модель внешней баллистики снаряда основана на системе дифференциальных уравнений движения, учитывающей вращение и колебания относительно центра масс, и использовании аэродинамических коэффициентов сил и моментов, рассчитанных на основе численного моделирования обтекания снаряда [5].

Траектория движения снаряда строится в стартовой системе координат $Ox_c y_c z_c$, связанной с точкой расположения орудия и ориентированной по направлению стрельбы (рис. 1). Координаты центра масс снаряда определяются уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{dx_c}{dt} &= V_k \cos \theta \cos \psi, & \frac{dy_c}{dt} &= V_k \sin \theta, \\ \frac{dz_c}{dt} &= -V_k \cos \theta \sin \psi, \end{aligned} \quad (1)$$

где x_c – дальность; y_c – высота полета; z_c – боковое отклонение в стартовой системе координат; V_k – скорость центра масс снаряда, θ – угол наклона траектории; ψ – угол пути.

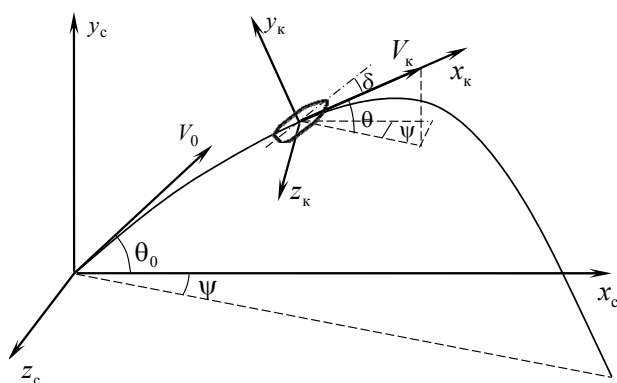


Рис. 1. Стартовая ($Ox_c y_c z_c$) и траекторная ($Ox_k y_k z_k$) системы координат

Параметры движения снаряда определяются в траекторной системе координат $Ox_k y_k z_k$, связанной с центром масс снаряда и ориентированной по вектору скорости (рис. 1):

$$\begin{aligned} \frac{dV_k}{dt} &= -g \sin \theta - \frac{C_{x_k} q S_M - b_{x_k} P}{m}, \\ \frac{d\theta}{dt} &= -\frac{g \cos \theta}{V_k} - \frac{C_{y_k} q S_M - b_{y_k} P}{m V_k} + \frac{d\theta_g}{dt}, \\ \frac{d\psi}{dt} &= -\frac{C_{z_k} q S_M - b_{z_k} P}{m V_k \cos \theta} + \frac{d\psi_g}{dt}, \\ \frac{d\omega_x}{dt} &= -\frac{m_x q S_M l}{I_x}, \end{aligned} \quad (2)$$

где g – ускорение силы тяжести; $C_{x_k}, C_{y_k}, C_{z_k}$ – коэффициенты составляющих аэродинамической силы по осям траекторной системы координат; q – скоростной напор воздуха; $S_M = \pi d^2 / 4$ – площадь миделева сечения снаряда; d – калибр снаряда; m – масса снаряда; P – тяга реактивного двигателя; $b_{x_k}, b_{y_k}, b_{z_k}$ – коэффициенты составляющих силы тяги; ω_x – аксиальная скорость вращения снаряда; m_x – коэффициент аэродинамического аксиального момента; l – длина снаряда; I_x – аксиальный момент инерции; θ_g, ψ_g – дополнительные углы, связанные с учетом геофизических параметров Земли.

Для определения составляющих экваториальной угловой скорости снаряда решается система уравнений:

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{m_1 q S_M l - I_x \omega_x \omega_2}{I_z}, \quad \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{m_2 q S_M l + I_x \omega_x \omega_1}{I_z}, \quad (3)$$

где m_1, m_2 – коэффициенты составляющих аэродинамического момента; I_z – экваториальный момент инерции снаряда.

Горизонтальная и вертикальная составляющие угла нутации снаряда δ_1, δ_2 определяются из системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\delta_1}{dt} &= \frac{\omega_1 - \psi \cos(\theta + \delta_2) - \dot{\theta} \delta_1 \delta_2}{\cos \delta_2}, \\ \frac{d\delta_2}{dt} &= \omega_2 - \psi \sin \theta \delta_1 - \dot{\theta} \cos \delta_1. \end{aligned} \quad (4)$$

Коэффициенты составляющих аэродинамической силы $C_{x_k}, C_{y_k}, C_{z_k}$ в уравнениях (2) определяются через аппроксимационные зависимости $C_x^a(M, \alpha)$, $C_y^a(M, \alpha)$, $C_z^a(\bar{\omega}_x, \alpha)$ коэффициентов силы сопротивления от числа Маха M , угла атаки α , безразмерной скорости вращения $\bar{\omega}_x$. Коэффициенты аэродинамического момента m_x и m_1, m_2 в уравнениях (2), (3) определяются через аппроксимационные зависимости $m_x^a(M, \bar{\omega}_x)$, $m_y^a(M, \alpha, \bar{\omega}_x)$, $m_z^a(M, \alpha)$ коэффициентов момента аэродинамической силы.

Параметрические зависимости коэффициентов аэродинамических сил и моментов снаряда определялись на основе численного моделирования внешнего обтекания [6]. Математическая постановка задачи включает систему уравнения Навье – Стокса, осредненных по Фавру, и k – ϵ модель турбулентности с учетом эффекта сжимаемости по модели Саркара [7]. Численная методика решения задачи обтекания снаряда реализована в пакете ANSYS Fluent.

Исследование аэродинамических характеристик снарядов проводилось в широком диапазоне изменения параметров: числа Маха $M = 0,5 - 5,0$; углы атаки $\alpha = 0 - 20^\circ$; скорости вращения снаряда $\omega_x = 500 - 8000$ рад/с. По результатам численного эксперимента с помощью метода наименьших квадратов строились аппроксимационные зависимости для коэффициентов аэродинамической силы и момента [5].

Система дифференциальных уравнений (1)–(4) интегрируется численно методом Рунге – Кутты – Вернера 6-го порядка с контролем погрешности интегрирования [9].

Решение обратной задачи внешней баллистики

Обратная задача внешней баллистики заключается в определении угла стрельбы θ_c и дирекционного угла α_c при известном начальном

расположении цели, ее скорости и направлении перемещения:

$$\mathbf{Q} = (\theta_c, \alpha_c, \mathbf{P}_k, \tau_\Sigma) = \Phi^{-1}(\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_c^0, \mathbf{V}_c, \mathbf{A}), \quad (5)$$

где $\mathbf{P}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$ – начальная точка стрельбы (координаты орудия); $\mathbf{P}_k = (X_k, Y_k, Z_k)$ – конечная точка стрельбы (координаты цели); $\mathbf{P}_c^0 = (X_c^0, Y_c^0, Z_c^0)$ – начальные координаты цели; $\mathbf{V}_c = (V_{1c}, V_{2c}, V_{3c})$ – вектор скорости перемещения цели. Вектор \mathbf{A} содержит характеристики снаряда и орудия, геофизические и атмосферные данные. Время τ_Σ определяется суммой времени решения обратной задачи τ_p , времени наведения орудия τ_n и времени полета снаряда τ_k : $\tau_\Sigma = \tau_p + \tau_n + \tau_k$.

При решении обратной задачи (5) рассматриваются два подхода. В первом подходе используется итерационный метод последовательных приближений на основе метода хорд. При этом на каждом шаге итерационного алгоритма необходимо решать прямую задачу внешней баллистики. Данный алгоритм позволяет найти решение задачи для заданных условий стрельбы с любым требуемым уровнем точности. Однако время расчетов здесь может играть существенную роль с точки зрения погрешности прогнозирования положения движущейся цели.

Второй «быстрый» способ решения обратной задачи на основе предварительно построенной базы знаний и многослойной нейронной сети [9]. В качестве входного вектора нейронной сети выступает $\mathbf{z}^0 = (X_c^0, Y_c^0, Z_c^0, V_{1c}, V_{2c}, V_{3c}, \alpha_w, w)$, где α_w, w – направление и скорость ветра, аппроксимируемыми величинами являются $\mathbf{z}^k = (\theta_c, \alpha_c)$. Структура нейронной сети определяется вектором количества нейронов в слоях: $N_k = (6, 20, 15, 10, 3)$, $k = \overline{0, 4}$. Ошибка аппроксимации нейронной сети при решении обратной задачи не превышает 1 %.

Расчет характеристик рассеивания снарядов

Методика определения характеристик рассеивания снарядов основана на методе статистических испытаний Монте-Карло. На основе имитационного моделирования при случайном задании факторов, влияющих на полет снаряда, определяются характеристики закона рассеивания: средняя точка, срединные и максимальные отклонения, график частот [10].

Все факторы, влияющие на полет снаряда, разделяют на три группы [11]:

– баллистические условия: масса снаряда (m), начальная скорость (V_0), угол стрельбы (θ_c), дирекционный угол (α_c) и др.;

– геофизические условия: географическая широта (B), ускорение силы тяжести (g), радиус Земли (R_s);

– метеорологические условия: давление (p), температура (T), направление (α_w) и скорость (w) ветра.

Распределение факторов стрельбы задается по нормальному закону [12]:

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

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 нормального закона распределения используется преобразование Бокса – Мюллера [13].

Для артиллерийских снарядов из-за влияния большого количества случайных факторов можно принять нормальный закон рассеивания. В область срединного отклонения $x \in [-B_d; B_d]$, $z \in [-B_\sigma; B_\sigma]$ попадает 50 % снарядов. Радиусы эллипса рассеивания определяются по максимальному отклонению снарядов, принимаются равными $4 B_d$, $4 B_\sigma$. Вероятности попадания снарядов в данную область равна 99,3 %.

На основе разработанной имитационной модели в соответствии с [14] реализована методика определения параметров зоны безопасности при проведении полигонных испытаний.

Моделирование стрельбы с подвижного носителя

При стрельбе очередью с подвижного носителя (вертолета) необходимо учитывать целый ряд механических и гидродинамических факторов, влияющих на точность стрельбы: изменение скоростей и углов ориентации вертолета, транспортные вибрации, создаваемые винтами и турбинами, возмущения, вызванные отстрелом боеприпасов, поток воздуха, создаваемый несущим винтом, и др.

Для учета механических факторов была разработана математическая модель механической системы «вертолет – вооружение», представленной в виде совокупности материальных тел с точечными массами: жесткая оболочка (корпус

вертолета); источники вибраций (винты и турбины); материальные точки, которые могут покинуть систему (снаряды и ракеты) [15]. По результатам моделирования динамики подвижного носителя рассчитываются начальные условия стрельбы в моменты выстрелов.

Траектория движения снарядов и ракет рассчитывается на основе методики решения задачи внешней баллистики при стрельбе с подвижного носителя [16]. Для учета влияния несущего винта вертолета на движение снарядов и ракет разработана методика расчета параметров воздушного потока, создаваемого вращением винта. Моделирование воздушной струи проводилось на основе численного решения уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу, и $k-\epsilon$ -модель турбулентности. В плоскости несущего винта задавалось распределение индуктивной скорости на основе эмпирических данных в зависимости от режима полета [17].

Программное обеспечение моделирования и визуализации внешнебаллистических процессов

Для решения представленного круга задач внешнебаллистического проектирования был разработан программный комплекс моделирования и визуализации процессов внешней баллистики [18, 19]. Программный комплекс состоит из следующих блоков (рис. 2):

–база данных для хранения характеристик вооружения, баллистических и метеорологических условий стрельбы и результатов моделирования;

–расчетный модуль, включающий математические модели и алгоритмы решения задач внешней баллистики;

–система визуализации результатов моделирования;

–средства взаимодействия с системами инженерного моделирования: AutoCAD, Компас 3D, ANSYS, ЛОГОС и др.

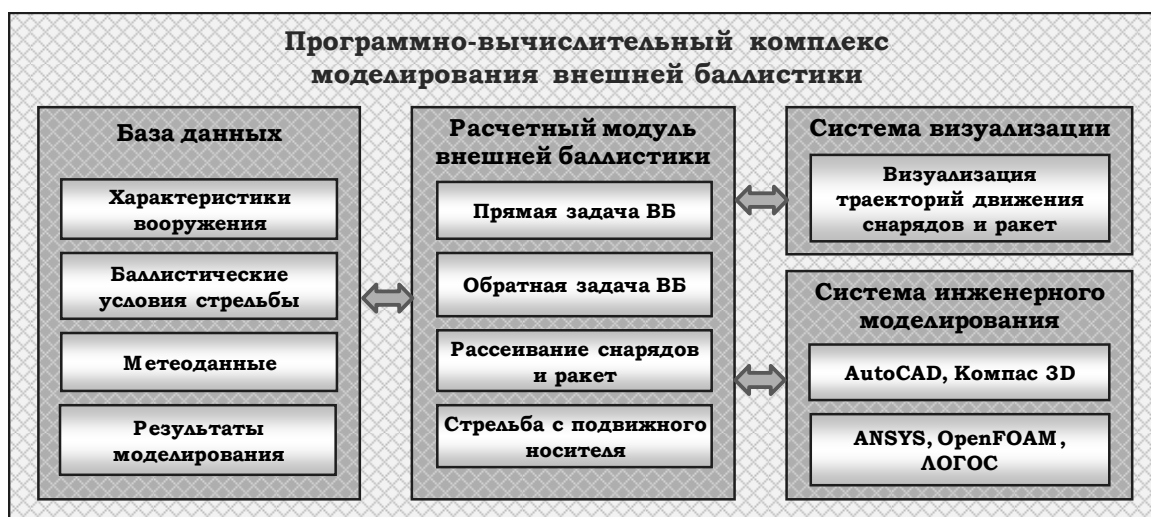


Рис. 2. Структура программного комплекса моделирования внешней баллистики

Основные возможности программного комплекса:

– расчет траектории движения снарядов и ракет на основе полной системы уравнений движения с учетом различных способов задания аэродинамических коэффициентов, для различных баллистических, геофизических и метеорологических условий стрельбы;

– решение обратной задачи внешней баллистики с помощью итерационного алгоритма и многослойной нейронной сети;

– определение характеристик рассеивания снарядов и ракет на основе методики статистического имитационного моделирования;

– оптимизация параметров ракетно-артиллерийских систем на этапе проектирования с целью повышения дальности стрельбы;

– моделирование стрельбы из ракетно-артиллерийского вооружения с подвижного носителя (вертолета);

– визуализация результатов моделирования в системе трехмерной компьютерной графики на виртуальной карте местности.

Программный комплекс создан в среде MS Visual Studio на языке C# с использованием графической библиотеки SDK NeoAxis [20]. Основой программного комплекса является информационное ядро, которое содержит базу данных. В базе данных содержится: информация о подвижном

носителе, ракетно-артиллерийском вооружении, снарядах и ракетах, а также цифровая карта местности и виртуальные геометрические модели объектов моделирования. Информация хранится в формате XML, что обеспечивает гибкость в формировании структуры данных.

Результаты решения задач внешней баллистики при проектировании и отработке ракетно-артиллерийского вооружения

Проводилось исследование влияния способа задания коэффициентов аэродинамических сил и моментов на точность расчета траектории. Сравнение результатов расчета траектории на примере осколочно-фугасного снаряда калибра 152 мм (ОФ 152 мм), полученных по разрабо-

танной методике с использованием расчетной модели сопротивления, с результатами, полученными с использованием законов сопротивления 1943 и 1958 года [1], показало, что для некоторых диапазонов изменения начальных условий стрельбы наблюдаются значительные отклонения (до 800 м) точек падения снарядов (рис. 3). Различие результатов расчета траектории объясняется не только количественным, но и качественным отличием расчетных кривых сопротивления для современных форм снарядов и эталонных зависимостей по законам 1943 и 1958 года.

На рис. 4 представлено отображение результатов расчета траектории на виртуальной карте местности.

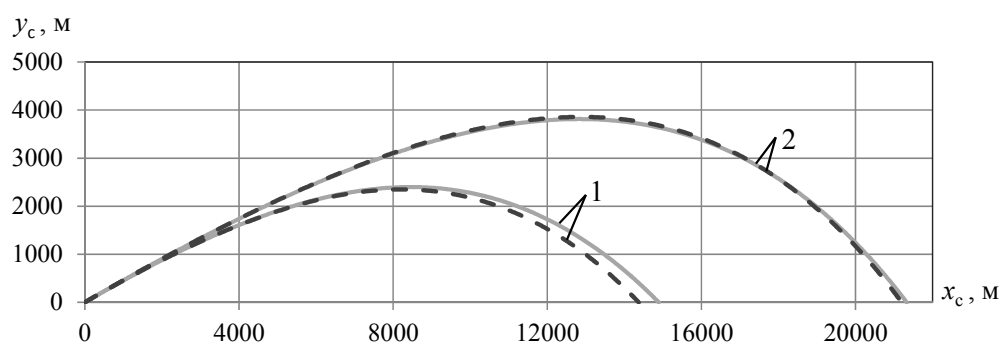


Рис. 3. Проекция траекторий снаряда ОФ 152 мм на плоскость Ox_cy_c : 1 – начальная скорость $V_0 = 680$ м/с; 2 – начальная скорость $V_0 = 945$ м/с; — закон сопротивления 1943 года; - - расчетная модель сопротивления

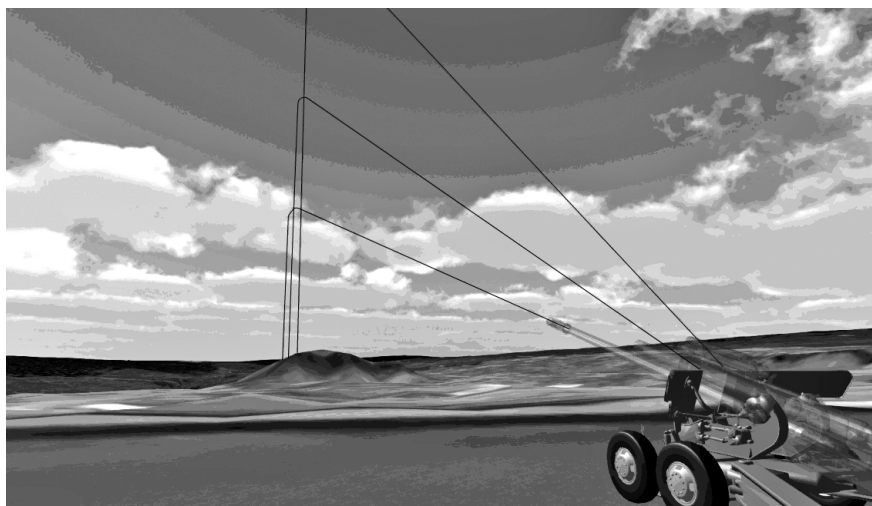


Рис. 4. Отображение результатов расчета траектории на виртуальной карте местности

Моделирование рассеивания снарядов проводилось для снаряда ОФ 152 мм при стрельбе на максимальную дальность. На рис. 5 представлены отклонения по продольной и боковой координатам точек падения снарядов, получен-

ные путем имитационного моделирования, здесь же построен эллипс рассеивания. На рис. 6 представлено отображение результатов моделирования на виртуальной карте местности.

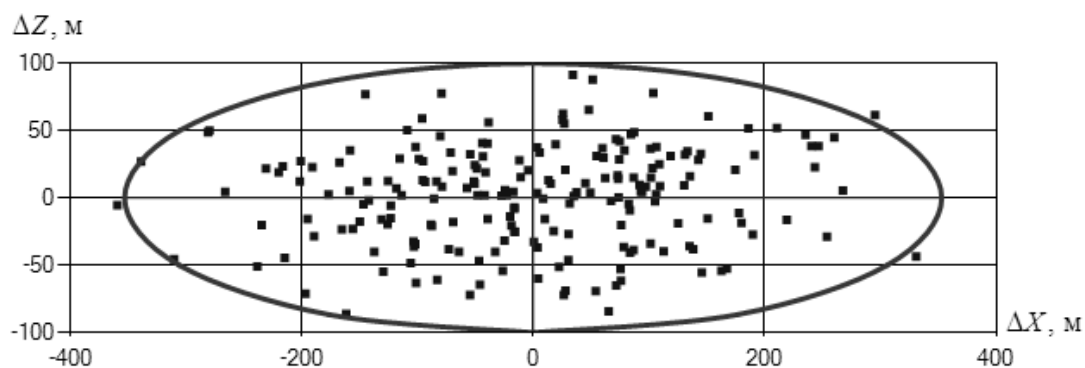


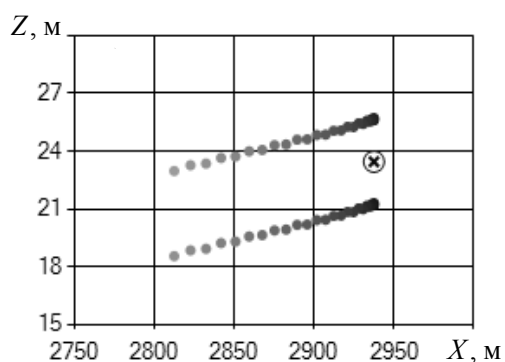
Рис. 5. Результаты моделирования рассеивания и эллипс рассеивания



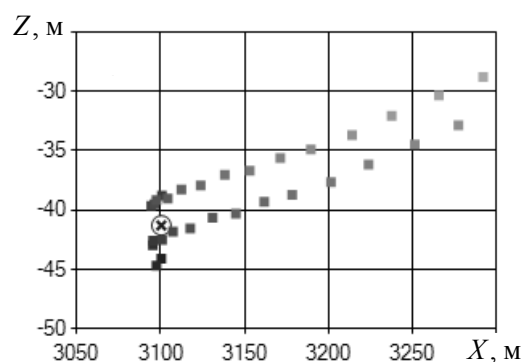
Рис. 6. Отображение результатов моделирования рассеивания снарядов

При стрельбе с подвижного носителя взаимодействие системы «вертолет – вооружение» оказывает существенное влияние на точность и кучность стрельбы. При стрельбе очередью из пушек отклонение снарядов от точки прицеливания происходит в сторону уменьшения дальности и с увеличением длины очереди прогрессивно возрастает (рис. 7, а). При пусках ракет

для определенных скоростей вертолета отклонение очереди происходит в сторону увеличения дальности (рис. 7, б). На основе полученных расчетных данных имеется возможность наблюдать динамику движения трехмерных моделей подвижного носителя, снарядов и ракет по траектории на цифровой карте местности (рис. 8).



а



б

Рис. 7. Точки падения снарядов (а) и ракет (б) при стрельбе с подвижного носителя

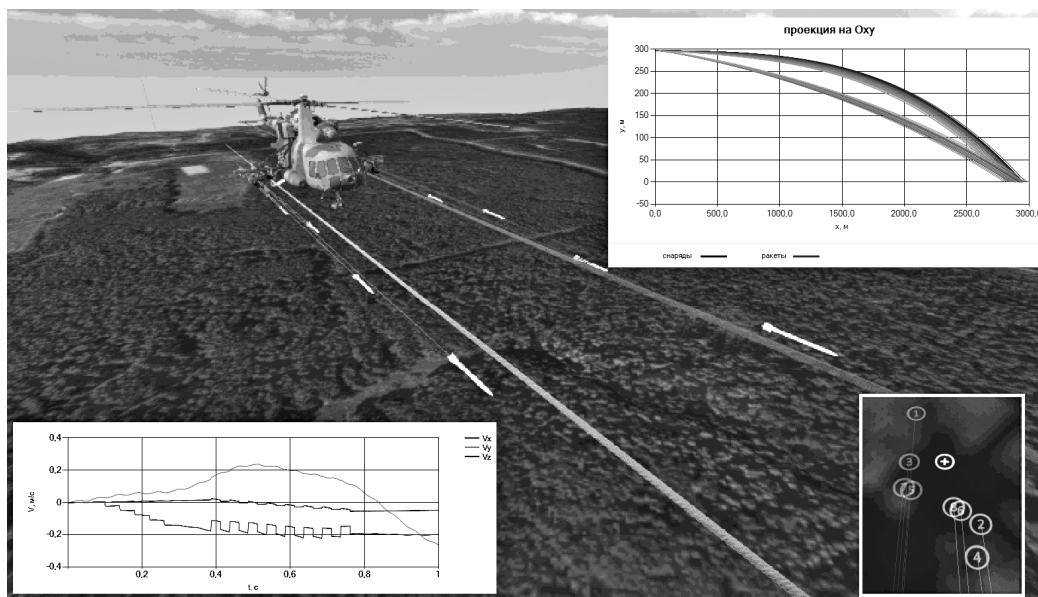


Рис. 8. Отображение результатов моделирования стрельбы с подвижного носителя

Заключение

В статье представлено описание и изложены принципы работы программного комплекса моделирования и трехмерной визуализации стрельбы из ракетно-артиллерийского вооружения со стационарной и подвижной установок на виртуальной карте местности. Программный комплекс является инструментом для проведения полномасштабных внешнебаллистических исследований на этапе проектирования и отработки боеприпасов ракетно-артиллерийских систем.

Библиографические ссылки

1. Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н. Внешняя баллистика. М.: Машиностроение, 2005. 608 с.
2. Virtual Battlespace 3 // Bohemia Interactive [Электронный ресурс]. – URL: <https://bisimulations.com/virtual-battlespace-3> (дата обращения: 16.05.2018).
3. Coiro D., De Marco A., Nicolosi F. A 6DOF Flight Simulation Environment for General Aviation Aircraft with Control Loading Reproduction // AIAA Paper 2007-6364, 2007, Hilton Head, South Carolina, USA.
4. Чеботарев А. С., Кудряшов В. Н., Гудзь Г. Ф. ОКБ МЭИ: АПК «Виртуальный полигон» // Национальная оборона [Электронный ресурс]. URL: <http://www.oborona.ru/includes/periodics/defense/2011/0712/13056893/detail.shtml> (дата обращения: 16.05.2018)
5. Королев С. А., Липанов А. М., Русяк И. Г. К вопросу о точности решения прямой задачи внешней баллистики // Вестник Томского гос. ун-та. Математика и механика. 2017. № 47. С. 63–74. DOI: 10.17223/19988621/47/7.
6. Королев С. А., Карсканов С. А. Математическое моделирование обтекания тела вращения сверхзвуковым потоком газа // Вестник Удмуртского ун-та. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2014. №3. С. 123–133.
7. Sarkar S., Hussaini M. Y. Computation of the sound generated by isotropic turbulence. NASA Contract Report 93-74. NASA Langley Research Center, Hampton, VA, 1993.
8. Hairer E., Norsett S. P., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations. Vol.1. Berlin: Springer-Verlag, 1991. 528 p.
9. Королев С. А., Липанов А. М., Русяк И. Г., Тененев В. А. Разработка подходов к решению обратной задачи внешней баллистики в различных условиях применения // Вестник Томского гос. ун-та. Математика и механика. 2019. №57. С. 76-83. DOI: 10.17223/19988621/57/6.
10. Королев С. А. Методика имитационного моделирования рассеивания снарядов // Интеллектуальные системы в производстве. 2019. Т. 17. № 1. С. 57–62. DOI 10.22213/2410-9304-2019-1-57-62.
11. Баллистика ствольных систем / В. В. Бурлов и др. / РАН; под ред. Л. Н. Лысенко и А. М. Липанова. М.: Машиностроение, 2006. 461 с.
12. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Кнорус, 2010. 664 с.
13. Харин Ю. С., Степанова М. Д. Практикум на ЭВМ по математической статистике. Минск: Изд-во «Университетское», 1987. 304 с.
14. 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.
15. Исследование влияния динамических характеристик подвижного носителя на кучность стрельбы / С. А. Королев, И. Г. Русяк, В. А. Тененев, А. В. Ва-

гин, М. Н. Белобородов // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. № 3. С. 103–109. DOI: 10.22213/2410-9304-2018-3-103-109.

12. 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.

13. Браверман А. С., Вайнтруб А. П. Динамика вертолета. Предельные режимы полета. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.

14. Разработка программного комплекса визуализации результатов моделирования полигонных испытаний артиллерийских систем / А. М. Липанов, А. В. Вагин, И. Г. Русяк, В. Г. Суфиянов // Вопросы оборонной техники. Серия 14. 2015. № 2. С. 16–24.

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

16. NeoAxis 3D Engine // NeoAxis. 2008 – 2018 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.neoaxis.com/ru> (дата обращения: 18.08.2018).

References

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

2. Virtual Battlespace 3 // Bohemia Interactive [electronic resource]. URL: <https://bisimulations.com/virtual-battlespace-3> (date of access: 16.05.2018).

3. Coiro D., De Marco A., Nicolosi F. A 6DOF Flight Simulation Environment for General Aviation Aircraft with Control Loading Reproduction. AIAA Paper 2007-6364, 2007, Hilton Head, South Carolina, USA.

4. Chebotarev A. S., Kudryashov V. N., Gudz G. F. OKB MEI: APK «Virtual'nyy polygon// Nacional'naya oborona [OKB MEI: APK "Virtual Landfill" // National Defense] (in Russ.). Available at: <http://www.oborona.ru/includes/periodics/defense/2011/0712/13056893/detail.shtml> (accessed: 16.05.2018).

5. Korolev S. A., Lipanov A. M., Rusyak I. G. [On the issue of accuracy of the solution of the direct problem of external ballistics]. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2017, no. 47, pp. 63-74 (in Russ.). DOI: 10.17223/19988621/47/7.

6. Korolev S.A., Karskanov S.A. [Mathematical simulation of supersonic airflow around the rotary body]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternyye nauki*, 2014, no. 3, pp. 123-133. (in Russ.)

7. Sarkar S., Hussaini M.Y. Computation of the sound generated by isotropic turbulence. NASA Contract Report 93-74. NASA Langley Research Center, Hampton, VA, 1993.

8. Hairer E., Norsett S.P., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations. Vol. 1. Berlin: Springer-Verlag, 1991. 528 p.

9. Korolev S.A., Lipanov A.M., Rusyak I. G., Tenenev V.A. [Development of the approaches for solving an inverse problem of external ballistics in various application conditions]. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2019, no. 57, pp. 76-83 (in Russ.). DOI: 10.17223/19988621/57/6.

10. Korolev S.A. [Simulation method of projectiles dispersion]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 17, no. 1, pp. 57-62. (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2019-1-57-62.

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

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

13. 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.).

14. *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.).

15. Korolev S.A., Rusyak I.G., Tenenev V.A., Vagin A.V., Beloborodov M.N. [Investigating the Influence of Dynamic Characteristics of a Moving Carrier on the Accuracy of Shooting]. *Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve*, 2018, vol. 16, no. 3, pp. 103-109 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2018-3-103-109.

16. 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.).

17. Braverman A.S., Vayntrub A.P. *Dinamika vertoleta. Predel'nyye rezhimy poleta* [Dynamics of the helicopter. Limit flight modes]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1988, 280 p. (in Russ.).

18. Lipanov A.M., Vagin A.V., Rusyak I.G., Sufiyarov V.G. [Development of bundled software visualization results of artillery systems ground tests modeling]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 14*, 2015, no. 2, pp. 16-24 (in Russ.).

19. 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.

20. NeoAxis 3D Engine // NeoAxis. 2008 – 2018 [electronic resource]. URL: <http://www.neoaxis.com/ru> (date of access: 18.08.2018).

* * *

Solution of Problems of External Ballistic Design on the Basis of Mathematical and Computer Modeling

S. A. Korolev, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V. G. Sufiyarov, DSc in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The paper is devoted to the development of mathematical and software solutions to problems of external ballistics. The mathematical model of the trajectory problem is based on the system of equations of projectile motion, which takes into account the rotation and oscillations relative to the center of mass. Parametric dependencies for aerodynamic coefficients are determined using numerical simulation of the external flow around the projectile. On the basis of the mathematical model of external ballistics, algorithms have been developed for solving the inverse problem, simulating modeling of projectile dispersion, and shooting a burst from a mobile carrier.

The software complex for solving the external ballistics problems includes a block of computational modules that implement the presented mathematical models and computational algorithms, a database of weapon parameters and simulation results, and a system for visualizing the results of a computational experiment.

Some results of solving problems of external ballistics in the design and development of rocket-artillery weapons are presented. A comparison of the results of trajectory calculation obtained using the calculated model of resistance and empirical laws of resistance has been carried out. The results of modeling the dispersion of shells and shooting of rocket-artillery weapons from a mobile carrier are presented. The simulation results are displayed in the three-dimensional visualization system on a virtual map of the area.

Keywords: external ballistics, trajectory, inverse problem, dispersion of projectiles, mathematical modeling, software complex, three-dimensional visualization.

Получено: 11.07.19