

УДК 623.565

DOI 10.22213/2413-1172-2018-3-179-184

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ АВИАЦИОННЫХ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ

О. А. Замолоцких, адъюнкт, Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, Россия

В. Х. Матвеев, адъюнкт, Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, Россия

А. А. Испулов, кандидат технических наук, Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, Россия

А. Н. Демин, кандидат технических наук, Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, Россия

Эффективность применения авиационных средств поражения непосредственно зависит от точности решения задачи прицеливания, которая включает в себя определение параметров прицеливания и реализацию на их основе такого управления летательным аппаратом и оружием, при котором обеспечивается попадание в цель.

Цель настоящего исследования – рассмотреть влияние начальных условий бомбометания на решение задачи прицеливания и определить расширение модели движения авиационного средства поражения в баллистических алгоритмах, реализованных в прицельных системах летательных аппаратов. Расширение модели движения авиационного средства поражения выполнено после учета отклонения массы авиационной бомбы от номинального значения, связанного с годом изготовления авиационного средства поражения, а также учета случайных порывов ветра на траектории с помощью их моделирования путем розыгрыша случайного события с заданным законом распределения. Моделирование производилось в системе компьютерной алгебры MathCad 15 для двух случаев: первый случай представлял учет массогабаритных характеристик; второй – случайных порывов ветра на траектории. Анализ результатов проведенного моделирования для первого случая показывает, что погрешность определения точки падения авиационного средства поражения значительно увеличивается при отклонении массы авиационной бомбы от номинального значения в заданных пределах и с заданными интервалами. Во втором случае воздействие порывов ветра на траектории со случайными возрастающими стохастическими характеристиками оказывает значительное влияние на увеличение среднеквадратического отклонения рассеивания средств поражения.

Таким образом, учет корректных начальных условий в существующих баллистических алгоритмах позволит повысить точность и эффективность воздушных ударов.

Ключевые слова: баллистическая модель движения, авиационная бомба, масса авиационного средства поражения, порыв ветра.

Введение

Эффективное поражение авиацией наземных объектов зависит от точности решения задачи прицеливания неуправляемыми авиационными средствами поражения [1]. Решение этой задачи напрямую связано с движением снаряда на траектории – задача баллистики [2].

Существующие баллистические алгоритмы, реализованные в прицельных системах летательных аппаратов (ЛА), не в полной мере удовлетворяют требованиям по точности и эффективности. Причинами этого является неучет влияния начальных условий на движение авиационного средства поражения (АСП) и, как следствие, применение неполной модели движения АСП. Одним из путей преодоления

этого недостатка является учет в заложенной баллистической модели движения массы каждого АСП и ветра на траектории его движения. Это связано с влиянием массогабаритных характеристик средства поражения на его баллистику, так как они значительно отличаются в зависимости от года изготовления АСП. В свою очередь, случайные порывы ветра [3] (по модулю и по углу) приводят к отклонению АСП от заданной траектории и, как следствие, к промаху [4].

Определение задачи и ее ограничения

Цель статьи – оценить влияние начальных условий на точность бомбометания с учетом отклонения массы АСП от номинального значения и случайного воздействия ветра на АСП на траектории движения.

Решение задачи будем проводить при следующих допущениях. Бомбометание производится с горизонтального полета с высоты 700 м, скорость ЛА 194,4 м/с, в качестве типовой бомбы рассматривается осколочно-фугасная авиационная бомба ОФАБ-250-270.

Моделирование траектории движения авиационной бомбы

На рис. 1 представлена траектория движения центра масс авиационной бомбы в виде кривой в пространстве $OXYZ$.

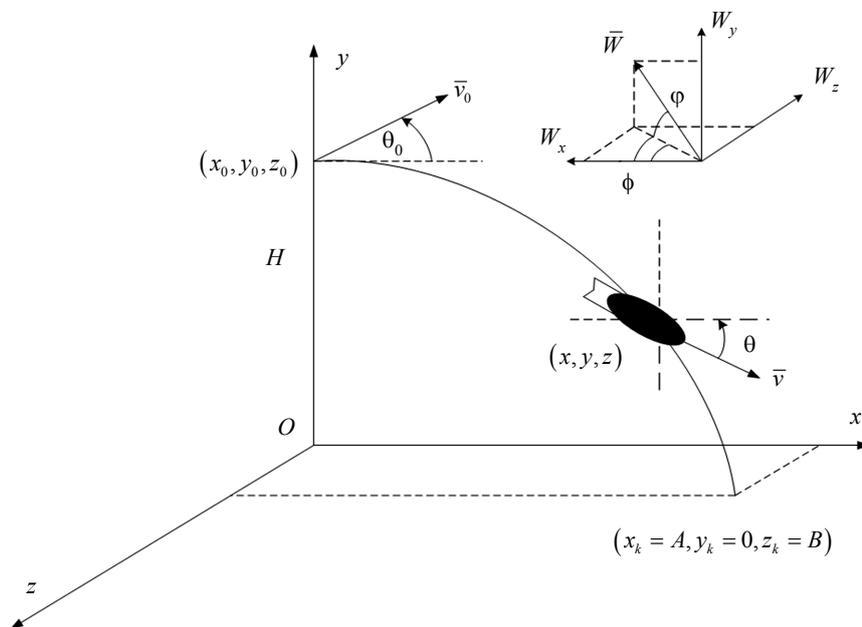


Рис. 1. Траектория движения авиационной бомбы

Наиболее простой и часто применяемой баллистической моделью движения АСП является модель вида [5]

$$\begin{cases} v'_x(t) = -c(M)\rho c_{x3}(M)v_x(t), \\ v'_y(t) = c(M)\rho c_{x3}(M)v_y(t) - g, \\ v'_z(t) = -c(M)\rho c_{x3}(M)v_z(t), \\ x'(t) = v_x(t), \\ y'(t) = v_y(t), \\ z'(t) = v_z(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $v_x(t), v_y(t), v_z(t)$ – проекции скорости АСП; $c(M)$ – баллистический коэффициент; $c_{x3}(M)$ – закон сопротивления; ρ – плотность атмосферы; g – ускорение свободного падения.

В свою очередь, проекции скорости АСП зависят от его углов ориентации – угла наклона θ и угла места ϑ . Тогда

$$\begin{cases} v_x(t) = V \cos(\theta) \cos(\vartheta), \\ v_y(t) = V \sin(\vartheta), \\ v_z(t) = V \sin(\theta) \cos(\vartheta), \end{cases} \quad (2)$$

где V – скорость ЛА, м/с.

Баллистический коэффициент определяется выражением [6]

$$c = \frac{id^2}{m} 10^3, \quad (3)$$

где $i = 0,53$ – коэффициент формы снаряда; $d = 0,325$ м – диаметр ОФАБ-250-270; m – масса АСП.

Из выражения (3) видно, что баллистический коэффициент c будет обратно пропорционален массе АСП m . Как уже было отмечено, масса средств поражения отклоняется от номинального значения, поэтому предположим, что фактическая масса ОФАБ-250-270 изменяется в пределах 220...280 кг. С учетом выражения (3) баллистический коэффициент изменится, результаты представленные в табл. 1.

При этом $c = 0,225$ соответствует номинальной массе АСП типа ОФАБ-250-270 и значению, заложенному в баллистический алгоритм.

Традиционная задача прицеливания, на которой базируются существующие прицельные системы, решается в виде конечных формул, представляющих собой результаты решения детерминированных дифференциальных уравнений движения АСП к цели при неслучайных условиях [7]. Однако необходимо рас-

считать факторы и стохастического характера [8]. В качестве такой характеристики

рассмотрим влияние порыва ветра на движение снаряда.

Таблица 1. Значения баллистического коэффициента

Фактическая масса АСП, m кг	220	230	240	250	260	270	280
Баллистический коэффициент, c	0,254	0,253	0,243	0,225	0,215	0,207	0,2

Для учета ветра на траектории движения АСП в правые части третьего, четвертого и пятого дифференциальных уравнений добавляются случайные составляющие по проекциям, тогда система (1) примет вид

$$\begin{cases} v'_x(t) = -c(M)\rho c_{x3}(M)v_x(t), \\ v'_y(t) = c(M)\rho c_{x3}(M)v_y(t) - g, \\ v'_z(t) = -c(M)\rho c_{x3}(M)v_z(t), \\ x'(t) = v_x(t) + W_x(t), \\ y'(t) = v_y(t) + W_y(t), \\ z'(t) = v_z(t) + W_z(t), \end{cases} \quad (4)$$

где $W_x(t), W_y(t), W_z(t)$ – проекции случайной функции с заданными статистическими характеристиками.

Предположим, что значение порывов ветра по проекциям в рассматриваемой системе координат $OXYZ$ (рис. 1) независимы. Тогда можем

моделировать случайные порывы ветра для каждой из осей розыгрышем случайного события с заданным законом распределения. В качестве случайного события будем рассматривать углы отклонения в горизонтальной и вертикальной плоскости – ϕ и φ соответственно, распределенные по равномерному закону на интервале $[a, b]$. При этом согласно работе [9] порывы ветра целесообразно учитывать со средним значением ветра \bar{w} .

Проекции порыва ветра на траектории определяются системой

$$\begin{cases} W_x = \bar{w} \cos(\varphi) \cos(\phi), \\ W_y = \bar{w} \sin(\varphi), \\ W_z = \bar{w} \cos(\varphi) \sin(\phi). \end{cases} \quad (5)$$

В табл. 2 представлены характеристики для моделирования случайных порывов ветра на траектории движения АСП.

Таблица 2. Характеристики порывов ветра

Проекция порывов ветра	Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3		
	\bar{w}	Интервал ϕ	Интервал φ	\bar{w}	Интервал ϕ	Интервал φ	\bar{w}	Интервал ϕ	Интервал φ
W_x	1	$0, 2\pi$	$-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}$	3	$0, 2\pi$	$-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}$	5	$0, 2\pi$	$-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}$
W_y		$0, 2\pi$	$-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}$		$0, 2\pi$	$-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}$		$0, 2\pi$	$-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}$
W_z		$0, 2\pi$	$-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}$		$0, 2\pi$	$-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}$		$0, 2\pi$	$-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}$

На основании вышеизложенного было проведено моделирование движения АСП на примере ОФАБ-250-270. Моделирование производилось в системе компьютерной алгебры MathCad 15 для двух случаев: первый случай представлял учет массогабаритных характеристик; второй – случайных порывов ветра на траектории.

Исходные данные: плотность воздуха $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$; характеристическая скорость 301 м/с; время интегрирования 10 с; шаг интегрирования (точность) 10^5 ; масса и баллистический коэффициент отклоняются в соответствии с табл. 1; характеристики ветра изменяются в соответствии с табл. 2.

Результаты моделирования для случая отклонения массы АСП представлены на рис. 2.

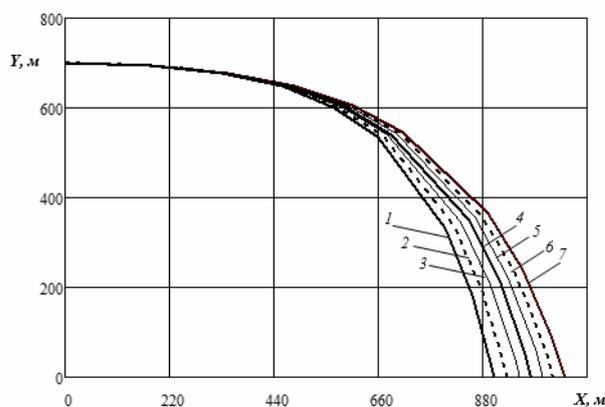


Рис. 2. Координаты точек падения АСП типа ОФАБ-250-270 при фактической массе: 1 – $m = 220$ кг; 2 – $m = 230$ кг; 3 – $m = 240$ кг; 4 – $m = 250$ кг; 5 – $m = 260$ кг; 6 – $m = 270$ кг; 7 – $m = 280$ кг

На рис. 2 видно воздействие изменяемой массы АСП как на его траекторию движения так и на точку падения. По выражению вида

$$\Delta X_j = |\hat{X} - X_j| \quad (5)$$

определим погрешность (промах) точки падения АСП, где \hat{X} – координата для номинальной массы ОФАБ-250-270; X_j – координата для различных масс m_j ; $j = \overline{1,6}$, причем $j = 1$ соответствует $m = 220$ кг, $j = 2$ соответствует $m = 230$ кг, $j = 3$ соответствует $m = 240$ кг, $j = 4$ соответствует $m = 260$ кг, $j = 5$ соответствует $m = 270$ кг,

$j = 6$ соответствует $m = 280$ кг. Результаты представлены на рис. 3.

Результаты моделирования для первого случая показывают увеличение промаха ΔX от 20 до 70 м, при уменьшении массы бомбы от номинальной массы. В свою очередь, промах также увеличивается при превышении массы АСП относительно номинальной порядка от 25 до 80 м.

Для второго случая учет порывов ветра на траектории движения АСП осуществлялся в соответствии с характеристиками, представленными в табл. 2. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

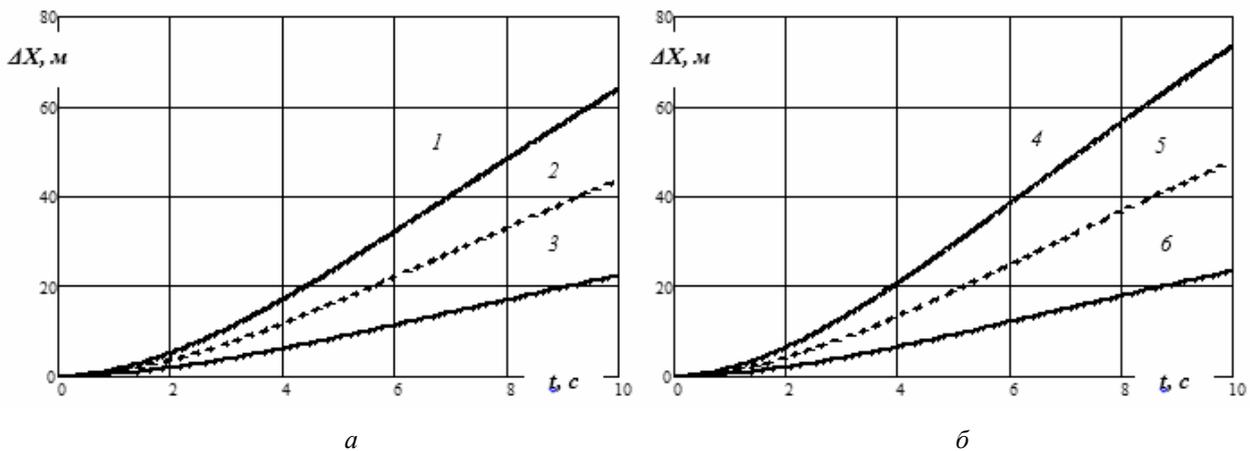


Рис. 3. Погрешность точки падения АСП: а – при меньшей массе (1 – $m = 220$ кг; 2 – $m = 230$ кг; 3 – $m = 240$ кг); б – при большей массе (4 – $m = 260$ кг; 5 – $m = 270$ кг; 6 – $m = 280$ кг)

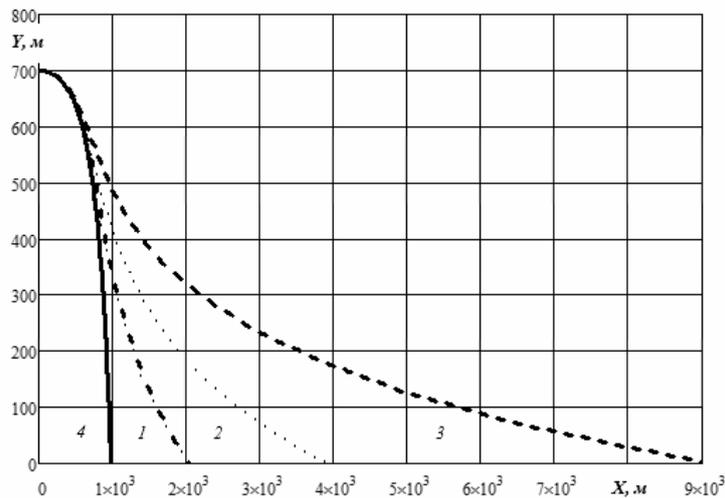


Рис. 4. Траектории ОФАБ-250-270 при влиянии порывов ветра: 1 – вариант 1; 2 – вариант 2; 3 – вариант 3; 4 – без учета ветра

На рисунке показаны усредненные траектории на основе 100 реализаций для каждого из вариантов табл. 2, а также для модели (1). Возрастающее влияние порывов ветра приводит к отклонению точки падения АСП на 1000 м для

первого варианта, 2000 м – для второго, 5000 м – для третьего варианта. Как отмечено, проведено 100 реализаций, на основе которых были получены среднеквадратические отклонения точек падения АСП:

- для первого варианта $\sigma_1 = 4662$ м;
- для второго варианта $\sigma_2 = 13470$ м;
- для третьего варианта $\sigma_3 = 25530$ м.

Анализ полученных результатов моделирования для двух представленных случаев позволяет сделать следующие выводы:

- о необходимости учета массы каждого АСП;
- о необходимости создания некоторой базы данных баллистических характеристик АСП в соответствии с изменяемой массой;
- о необходимости учета порывов ветра как на траектории движения АСП, так и при отделении АСП (интерференция) [10].

Можно отметить и другие работы по указанным проблемам [11, 12].

Выводы

Таким образом, в исследовании оценено влияние начальных условий на точность бомбометания за счет учета отклонения массы АСП от номинальной, вызванное различным годом изготовления, и случайного воздействия порывов ветра на траектории его движения. В результате при отклонении массы АСП промах увеличивается порядка до 70 м при меньшей массе и до 80 м при большей массе. Возрастающее случайное воздействие ветра приводит к отклонению точки падения АСП с очень большим СКО от 4662 до 25530 м. Учет этих параметров в существующих баллистических алгоритмах позволит повысить точность и эффективность воздушных ударов.

Библиографические ссылки

1. Ганулич А. К. *Авиационные прицельные системы, их исследование и испытания*. М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1984. 209 с.
2. Краснов А. М. *Авиационные прицельно-навигационные системы*. М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2006. 623 с.
3. Мхитарян А. М. *Аэродинамика*. М.: ЭКОЛИТ, 2012. 448 с.
4. Постников А. Г. *Внешняя баллистика авиационных неуправляемых снарядов*. М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2003. 396 с.
5. Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н. *Внешняя баллистика*. М.: Машиностроение, 2005. 608 с.
6. Там же.
7. Там же.
8. Беневольский С. В., Колесов Ю. Б. *Объектно-ориентированное моделирование в задачах внешней баллистики*. СПб.: Политехнический университет, 2009. 127 с.
9. Монсик В. Б. *Статистические основы авиационного вооружения*. М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2003. 484 с.
10. Должиков В. И., Николаев А. В. *Определение аэродинамических характеристик вращающегося летательного аппарата при неуправляемом полете с помощью систем инженерного анализа* // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22, № 3. С. 55–60.
11. Aly S. Attallah. *Modelling and Simulation for free fall bomb dynamics in windy environment*. Proc. 16-th International Conference on AEROSPACE SCIENCES & AVIATION TECHNOLOGY, pp. 11-19. At Cairo, Egypt, 2015.
12. Николаев А. В., Пауко А. Д. *Баллистическое обеспечение метания активных элементов защиты при действии малоразмерных высокоскоростных объектов* // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23, № 3. С. 67–73.

References

1. Ganulich A. K. *Aviatsionnye pritsel'nye sistemy, ikh issledovanie i ispytaniya* [Aviation sighting systems, their research and testing]. Moscow, VVA named for them. prof. N. E. Zhukovsky, 1984, 209 p. (in Russ.).
2. Krasnov A. M. *Aviatsionnye pritsel'no-navigatsionnye sistemy* [Aircraft sighting and navigation system]. Moscow, VVA named for them. prof. N. E. Zhukovsky, 2006, 623 p. (in Russ.).
3. Mkhitaryan A. M. *Aerodinamika* [Aerodynamics]. Moscow, Ekolit Publ., 2012, 448 p. (in Russ.).
4. Postnikov A. G. *Vneshnyaya ballistika aviatsionnykh neupravlyaemykh snaryadov* [External ballistics, aviation unguided missiles]. Moscow, VVA named for them. prof. N. E. Zhukovsky, 2003, 396 p. (in Russ.).
5. Dmitrievsky A. A., Lysenko L. N. *Vneshnyaya ballistika* [External ballistics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, 608 p. (in Russ.).
6. Dmitrievsky A. A., Lysenko L. N. *Vneshnyaya ballistika* [External ballistics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, 608 p. (in Russ.).
7. Dmitrievsky A. A., Lysenko L. N. *Vneshnyaya ballistika* [External ballistics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, 608 p. (in Russ.).
8. Benevolensky S. V., Kolesov Y. B. *Ob'ektno-orientirovannoe modelirovanie v zadachakh vneshnei ballistiki* [Object-oriented modeling in the problems of external ballistics]. St. Petersburg, Politechnical University, 2009, 127 p. (in Russ.).
9. Monsik V. B. *Statisticheskie osnovy aviatsionnogo vooruzheniya* [Statistical fundamentals of aircraft armament]. Moscow, VVA named for them. prof. N. E. Zhukovsky, 2003, 484 p. (in Russ.).
10. Dolzhikov V. I., Nikolaev A. V. [Determination of aerodynamic characteristics of a rotating aircraft with uncontrolled flight using engineering analysis systems]. *Vestnik Moskovskogo aviatcionnogo instityta*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 55-60 (in Russ.).
11. Aly S. Attallah. *Modelling and Simulation for free fall bomb dynamics in windy environment*. Proc. 16-th International Conference on AEROSPACE SCIENCES & AVIATION TECHNOLOGY, pp. 11-19. At Cairo, Egypt, 2015.
12. Nikolaev A. V., Pasko A. D. [Ballistic provision of throwing active protection elements under the action of small-sized high-speed objects]. *Vestnik Moskovskogo aviatcionnogo instityta*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 67-73 (in Russ.).

Modeling the Trajectory of Aircraft Unguided Weapons

O. A. Zamolotskikh, Adjunct, N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

V. Kh. Matveev, Adjunct, N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

A. A. Ispulov, PhD in Engineering, N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

A. N. Demin, PhD in Engineering, N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

Efficiency of application of aviation destruction means directly depends on the accuracy of solving the problem of aiming, which includes the definition of the parameters of targeting and implementation on their basis of such control of the aircraft and weapons in order to ensure hitting the target.

The paper deals with the influence of the initial conditions of bombing on the solution of the aiming problem. The expansion of the model of motion of an aircraft means of destruction in ballistic algorithms implemented in sighting systems of aircraft is proposed. The expansion of the model of motion of the aircraft means of destruction is performed by taking into account the deviation of the mass of the aircraft bomb from the nominal value associated with the year of manufacture of the aircraft means of destruction, as well as taking into account random wind gusts on the trajectory by modeling them by drawing a random event with a given distribution law. The simulation was carried out in the system of computer algebra MahtCad 15 for two cases: the first case was the account of mass-dimensional characteristics; the second – random gusts of wind on the trajectory. Analysis of the results of the simulation for the first case shows that the error in determining the point of incidence of the aircraft means of destruction increases significantly with the deviation of the mass of the air bomb from the nominal value within the specified limits and at specified intervals. In the second case, the effect of wind gusts on the trajectories with random increasing stochastic characteristics has a significant effect on the increase in the mean square deviation of the scattering of the weapon.

Thus, taking into account the correct initial conditions in the existing ballistic algorithms will improve the accuracy and efficiency of air strikes.

Keywords: ballistic model of movement, bomb, weight of aviation means of destruction, gust of wind.

Получено 22.05.2018