ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 539.3
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-68-74

Расчет координат расположения беспилотных летательных средств при сбрасывании грузов сельскохозяйственного назначения

Д.В. Белов[1]✉, ***С.А. Андреев***[2]
[1, 2] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия
[1] dmitri.belov@rgau-msha.ru✉
[2] energo-andreev@rgau-msha.ru

Аннотация. В некоторых технологических процессах АПК беспилотное летательное средство (БПЛС) осуществляет доставку удобрений, средств защиты растений, воды и водных растворов. Сброс груза может контролироваться микропроцессором, установленным на БПЛС, с помощью программы, для которой необходим алгоритм. С целью разработки математической модели движения груза при его сбросе с низколетящего БПЛС и алгоритма для определения момента сброса груза для достижения им заданной точки приземления по известным параметрам полета проведены теоретические исследования. Выявлены факторы, влияющие на траекторию движения сбрасываемых объектов. Сформулирована задача определения расстояния от точки сброса груза с летательного средства до требуемой точки приземления. Представлены системы дифференциальных уравнений движения грузов без учета сопротивления воздуха и при квадратичной зависимости силы сопротивления воздуха от скорости падения. Построены кривые, позволяющие упрощенно определить момент сброса груза, используя скорость и высоту полета БПЛС. Приведены уравнения для вычисления конечной горизонтальной составляющей скорости падения груза, тангенса угла и продолжительности его падения, а также искомого расстояния. При этом аргументами найденных функций являются баллистический коэффициент, скорость и высота полета летательного средства. Отмечена необходимость уточнения полученных решений посредством учета зависимости параметров падения грузов от скорости и направления ветра, а также осадков и атмосферного давления. Приведен алгоритм автоматического определения момента сброса груза бортовым восьмиразрядным процессором с циклической реализацией продолжительности обработки поступающей информации.

Ключевые слова: беспилотное летательное средство, БПЛС, сброс, сопротивление воздуха, баллистический коэффициент, продолжительность падения, алгоритм автоматического определения момента сброса груза

Для цитирования: Белов Д.В., Андреев С.А. Расчет координат расположения беспилотных летательных средств при сбрасывании грузов сельскохозяйственного назначения // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 4. С. 68-74. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-68-74

ORIGINAL PAPER

Calculation of unmanned aerial vehicle positioning coordinates when dropping agricultural loads

D.V. Belov[1]✉, ***S.A. Andreev***[2]
[1,2] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia
[1] dmitri.belov@rgau-msha.ru✉
[2] energo-andreev@rgau-msha.ru

Abstract. In some agricultural processes, an unmanned aerial vehicle (UAV) delivers fertilizers, crop protection products, water and water solutions. The drop of material objects (load) can be controlled by a microprocessor installed on the UAV by means of an algorithm-based program. The authors conducted theoretical studies to develop a mathematical model of the load motion when it is dropped from a low-flying UAV and an algorithm for determining the moment of load drop to reach a given landing point using the known flight parameters. The study identified factors influencing the trajectory of the dropped material objects and posed the problem of determining the distance from the point of load dropping from the UAV to the required landing point. The article presents systems of differential equations of load motion without air resistance and with a quadratic dependence of the air resistance force on the drop velocity. Curves are constructed to determine the moment of load drop simplistically using the velocity and flight altitude of the UAV. The equations for calculating the final horizontal component of the loads

© Белов Д.В., Андреев С.А., 2024

drop velocity, the tangent angle and duration of its drop, as well as the required distance are given. The arguments of the found functions are ballistic coefficient, speed and flight altitude of the UAV. The authors note the necessity of refining the obtained solutions by taking into account the dependence of the parameters of the dropped loads on the wind speed and direction, as well as precipitation and atmospheric pressure. The article presents an algorithm of automatic control of the reset of material objects dropping by an on-board eight-bit processor with cyclic implementation of the duration of incoming information processing.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), material objects (loads), release, landing point, air resistance, ballistic coefficient, navigation, fall duration, algorithm

For citation: Belov D.V., Andreev S.A. Calculation of unmanned aerial vehicle positioning coordinates when dropping agricultural loads. *Agricultural Engineering* (*Moscow*), 2024;26(4):68-74. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-68-74

Введение

Ряд технологических процессов современного АПК сопровождается сбрасыванием с перемещающихся в воздухе беспилотных летательных средств (БПЛС) на поверхность земли материальных объектов (МО): небольших грузов хозяйственного назначения, удобрений, средств защиты растений, воды и водных растворов [1]. При использовании в качестве БПЛС дирижаблей или коптеров необходимо учитывать их особенности: низкие скорости горизонтального и вертикального маневрирования, небольшую высоту полета и длительность нахождения над обслуживаемой территорией [2, 3].

Сложность соблюдения требуемой точности определяется наличием начальной поступательной скорости МО, обусловленной движением БПЛС на момент его сброса, наличием силы сопротивления воздуха, влияния ветра, атмосферного давления и осадков.

На основе информации о координатах точки приземления МО, скорости и высоте полета БПЛС формирование команды на сброс МО может реализовываться микропроцессорными средствами, устанавливаемыми на БПЛС[1] [4]. Однако для осуществления компьютерного расчета момента сброса МО необходима программа, составленная по соответствующему алгоритму.

Цель исследований: составление математической модели движения МО при его сбросе с низколетящего БПЛС, алгоритма для определения момента сброса МО для достижения им заданной точки приземления по известным параметрам полета.

Материалы и методы

В качестве исходных материалов использованы сведения из классической теории аэродинамики, законы механики и математические методы моделирования физических процессов. В теоретических исследованиях использован метод абстрагирования, позволивший рассматривать движение МО без сопротивления воздуха и с учетом сопротивления, пропорционального квадрату скорости движения.

Результаты и их обсуждение

Сделаем допущения:

– перемещение МО в пространстве рассматривается как движение центра масс, находящегося во временной таре, ось тары совпадает с касательной к траектории;

– поверхность Земли на рассматриваемом участке является плоской.

Совместим начало координат *O* с точкой на БПЛС, из которой производится сброс груза (рис. 1).

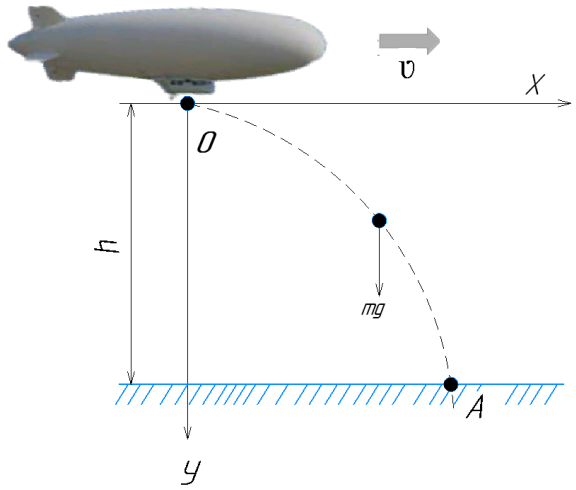


Рис. 1. Траектория движения груза после сброса с БПЛС:
v, *h* – скорость поступательного движения и высота полета БПЛС;
A – абсцисса точки (относ), в которую должен попасть груз

Fig. 1. Trajectory of the load motion after being dropped from the UAV:
v, h – velocity of translational motion and flight altitude of the UAV;
A – abscissa of the point (drift), at which the load should hit

[1] Щербаков Ю.В. Теория полета дирижаблей. М.: Издательство ЛКИ, 2019. 89 с.

В соответствии со вторым законом Ньютона для составляющих сил, действующих на МО, можно записать дифференциальные уравнения движения по координатным осям:

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2x}{dt^2}=0 \\ m\dfrac{d^2y}{dt^2}=mg. \end{cases} \quad (1)$$

В результате интегрирования уравнений системы (1) получим

$$\begin{cases} m\dfrac{dx}{dt}+B_1=B_2 \\ m\dfrac{dy}{dt}+B_3=mgt+B_4. \end{cases} \quad (2)$$

Поскольку в процессе полета масса сбрасываемого МО не меняется, в последующих рассуждениях значения m исключим.

После второго интегрирования будем иметь

$$\begin{cases} x+B_5+B_1t+B_6=B_2t+B_7; \\ y+B_8+B_3t+B_9=\dfrac{1}{2}gt^2+B_{10}t+B_{11}+B_{12} \end{cases} \quad (3)$$

или

$$\begin{cases} x=B_2t-B_7-B_5-B_1t-B_6; \\ y=\dfrac{1}{2}gt^2+B_{10}t-B_3t+B_{11}+B_{12}-B_8-B_9. \end{cases} \quad (4)$$

Сгруппируем слагаемые равенств системы (4) по мере убывания показателей степеней при t:

$$\begin{cases} x=(B_2-B_1)t-B_7-B_6-B_5; \\ y=\dfrac{1}{2}gt^2+(B_{10}-B_3)t+B_{11}+B_{12}-B_8-B_9. \end{cases} \quad (5)$$

Введем обозначения: $C_1=B_2-B_1; C_2=-B_7-B_6-B_5;$ $C_3=B_{10}-B_3; C_4=B_{11}+B_{12}-B_8-B_9.$

Система (5) сводится к виду:

$$\begin{cases} x=C_1t+C_2; \\ y=\dfrac{1}{2}gt^2+C_3t+C_4. \end{cases} \quad (6)$$

С учетом начальных условий (при $t=0$ $x=0;$ $\dfrac{dx}{dt}=0; \dfrac{dy}{dt}=0$)

$$\begin{cases} 0=C_1+C_2; \\ v=C_1; \\ 0=0+C_3\cdot 0+C_4; \\ 0=0+C_3. \end{cases} \quad (7)$$

или $C_1=v, C_2=C_3=C_4=0.$

Система уравнений (1) может быть представлена как

$$\begin{cases} x=vt; \\ y=\dfrac{1}{2}gt^2. \end{cases} \quad (8)$$

Из первого равенства системы (8) выразим $t=\dfrac{x}{v}$ и подставим полученное значение во второе: $y=\dfrac{1}{2}g\dfrac{x^2}{y^2}$. Следовательно, $2v^2y=gx^2$ или $x^2=\dfrac{2v^2y}{g}$.

В результате подстановки получим $x=\sqrt{\dfrac{2v^2y}{g}}=v\sqrt{\dfrac{2y}{g}}$.

При $y=h;$ $\quad x=v\sqrt{\dfrac{2h}{g}}.$ (9)

Выражение (9) позволяет достаточно просто определять расстояние до требуемого места точки приземления МО. Для ручного управления механизмом сброса МО можно воспользоваться семейством кривых (рис. 2).

Для более точных расчетов следует учитывать сопротивление воздуха. Подобные задачи уже решались другими исследователями, однако в них не принималась во внимание начальная скорость МО [5]. Под влиянием сопротивления воздуха горизонтальное смещение (относ) МО уменьшится, а продолжительность падения увеличится: после отделения от горизонтально летящего БПЛС МО по инерции продолжит двигаться в направлении полета, а под действием силы тяжести будет стремиться вниз. Движение МО будет осуществляться по кривой, постепенно переходя от горизонтального к вертикальному[2]. На начальном этапе падения МО (в точке M на рисунке 3) горизонтальная составляющая скорости v_x превышает вертикальную составляющую v_y. Результирующая скорость МО определится как $v_t=\sqrt{v_x^2+v_y^2}$. При дальнейшем падении (в точках N и P) составляющие скоростей сначала сравняются, а затем их соотношение изменится на противоположное[3]. Отметим, что при скорости падения тел в воздухе со скоростью, меньшей 218 м/с, силу сопротивления воздуха можно считать пропорциональной квадрату этой скорости[4].

[2] Миропольский Ф.П., Морозов А.А., Пырьев Е.В. Баллистика авиационных средств поражения // Военно-воздушная инженерная академия имени Н.Е. Жуковского. М.: ИД Академии Жуковского, 2015. 251 с.

[3] Дмитриевский А.А. Внешняя баллистика: Учебное пособие. М.: Машиностроение, 1972. 584 с.

[4] Мхитарян А.М. Аэродинамика. М.: Машиностроение, 1976. 418 с.

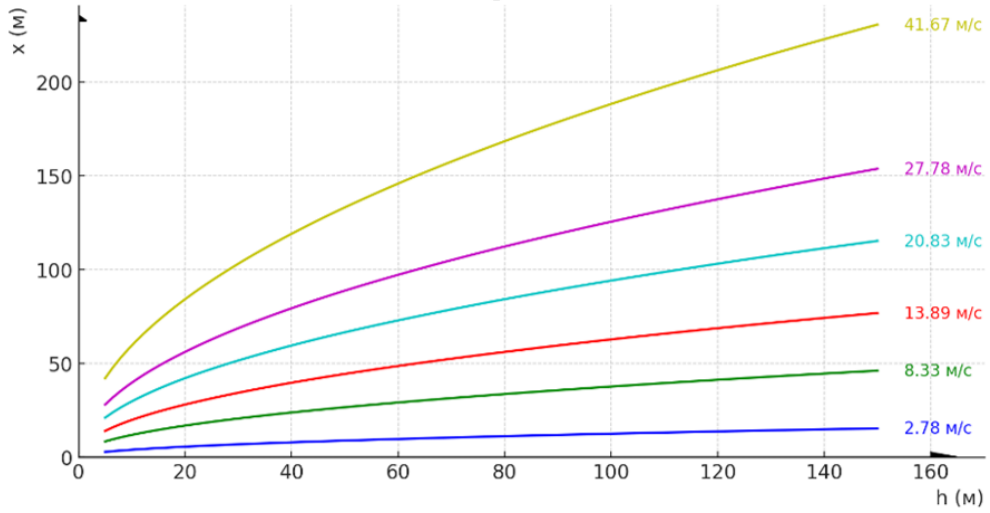


Рис. 2. Зависимость расстояния (*h*) между БПЛС и требуемой точкой приземления груза от скорости и высоты его падения (*x*)

Fig. 2. Dependence of the distance (h) between the UAV and the required location of the load landing point on the fall velocity and altitude

Для наблюдателя, находящегося на БПЛС, МО будет виден под некоторым углом γ к вертикали. В момент падения МО величина этого угла составляет $tg\gamma = \frac{\Delta}{h}$. Для наблюдателя, находящегося в точке сброса 0, МО покажется под углом φ к вертикали и в момент падения $tg\varphi = \frac{A}{h} = \frac{vT - \Delta}{h}$ (рис. 3).

Для определения величин A, Δ, T, а затем углов φ и γ необходимо определить траекторию движения МО в трехмерных координатах (рис. 4).

Уравнения движения для трехмерной системы координат могут быть записаны[5] как

$$\begin{cases} mx'' = -Rcos(R \wedge x); \\ my'' = mg - Rcos(R \wedge y); \\ mz'' = -Rcos(R \wedge z). \end{cases}$$

Заменив тригонометрические функции отношениями $cos(R \wedge x) = \frac{x}{v}$, $cos(R \wedge y) = \frac{y}{v}$ и $cos(R \wedge z) = \frac{z}{v}$, получим $mx'' = \frac{Rx'}{v}$, $my'' = mg - \frac{Ry'}{v}$ и $mz'' = -\frac{Rz'}{v}$.

Учтем начальные условия:

$$\begin{cases} x = y = z = 0; \\ y' = z^{\wedge} = 0; \\ x' = v. \end{cases} \qquad (10)$$

Последнее уравнение системы определяется интегралом $z = 0$, который в соответствии с теоремой единственности

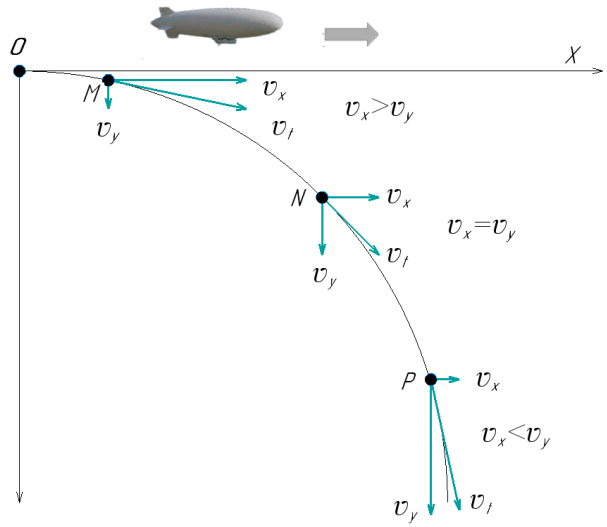


Рис. 3. Изменение векторов горизонтальной и вертикальной составляющих скорости падения груза

Fig. 3. Change in the vectors of the horizontal and vertical components of the load fall velocity

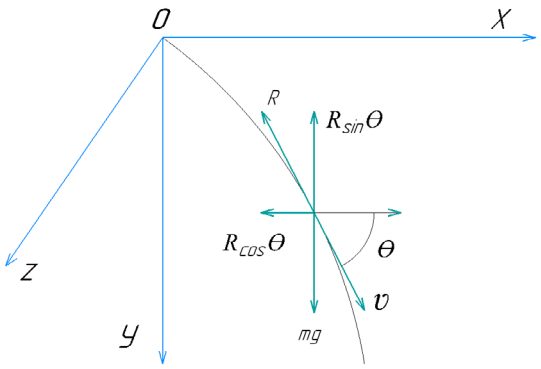


Рис. 4. Траектория движения груза в трехмерных координатах

Fig.4. Trajectory of the load motion in three-dimensional coordinates

[5] Гредасова Н.В., Андреева И.Ю. Обыкновенные дифференциальные уравнения: Учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2022. 88 с.

является исчерпывающим[6]. Следовательно, траектория движения МО представляет собой кривую в плоскости x0y. Для определения этой траектории следует проинтегрировать первые два уравнения системы (10).

Представим силу сопротивления воздуха выражением: $R = mC(h-y)F(v)$.

$$\begin{cases} x' = v \cdot cos\theta; \\ y' = v \cdot sin\theta, \end{cases}$$

где θ – угол между касательной к траектории и осью X; C – безразмерный баллистический коэффициент, учитывающий форму, размеры и расположение МО; для большинства тел $0,07 \le C < 2,2$.

$$\text{Итак, } cos\theta = \frac{x'}{v};\ sin\theta = \frac{y'}{v}.$$

Используя значения R и θ в уравнениях движения и сокращая на m, получим

$$\begin{cases} x'' = -C(h-y)\dfrac{F(v)}{v}x'; \\ y'' = g - C(h-y)\dfrac{F(v)}{v}y'. \end{cases} \quad (11)$$

Система (11) в квадратурах не интегрируется. Найдем приближенные значения A и T. С учетом специфики квадратичного закона сопротивления воздуха система уравнений (11) имеет вид:

$$\begin{cases} x'' = -CvH(h-y)x'; \\ y'' = g - Cv(h-y)y'. \end{cases} \quad (12)$$

Умножим первое уравнение системы (12) на y', а второе – на x'. Одновременно вычтем первое уравнение из второго:

$$yx' - xy' = gx''.$$

В результате деления всех членов последнего равенства на $(x')^2$ получим $\dfrac{y''x' - x''y'}{(x')^2} = \dfrac{g}{x'}$

или $$\frac{d}{dt}\left(\frac{y'}{x'}\right) = \frac{g}{x'} \text{ и } \frac{d}{dt}tg\theta = \frac{g}{x'}.$$

Введем обозначения: $\dfrac{y'}{x'} = tg\theta = p$ и x' = u, с учетом которых получим $p' = \dfrac{g}{u}$.

Объединив последние уравнения в систему и учитывая, что

$$v = \sqrt{(x')^2 + (y')^2} = \sqrt{u^2 + p^2u^2} = up\sqrt{1 + \frac{1}{p^2}} = u\sqrt{1 + p^2},$$

приведем эту систему к виду:

$$\begin{cases} u' = -Cvh(Y-y)\cdot u; \\ p' = \dfrac{g}{u}; \\ x' = u; \\ y' = pv. \end{cases} \quad (13)$$

Используем в качестве независимой переменной величину y:

$$u' = \frac{du}{dt} = \frac{du}{dy}\cdot\frac{dy}{dt} = \frac{du}{dy}pu;$$

$$p' = \frac{dp}{dt} = \frac{dp}{dy}\cdot\frac{dy}{dt} = \frac{dp}{dy}pu;$$

$$x' = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{dy}\cdot\frac{dy}{dt} = \frac{dx}{dy}pu.$$

Систему уравнений (13) можно представить как

$$\begin{cases} \dfrac{du}{dy} = -Cu\sqrt{1 + \dfrac{1}{p^2}}\cdot h(h-y); \\ u^2 p\dfrac{dp}{dy} = g; \\ up\dfrac{dt}{dy} = 1; \\ p\dfrac{dx}{dt} = 1. \end{cases} \quad (14)$$

Начальные условия определятся как

$$y = 0\begin{cases} u = v \\ p = t = x = 0. \end{cases}$$

При увеличении y угол наклона касательной к траектории будет расти, сомножитель $\sqrt{1 + \dfrac{1}{p^2}}$ стремится к единице и никогда не превысит ее. В то же время сомножитель $h(h-y)$ является отношением плотности воздуха на высоте к его плотности у поверхности Земли. Этот сомножитель также стремится к единице, однако всегда меньше ее. На этом основании сделаем допущение, что

$$\sqrt{1 + \frac{1}{p^2}}; h(h-y) = 1.$$

С учетом допущения система уравнений (14) примет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{du}{dy} = -Cu; \\ u^2 p\dfrac{dp}{dy} = g; \\ up\dfrac{dt}{dy} = 1; \\ p\dfrac{dx}{dt} = 1. \end{cases} \quad (15)$$

[6] Виленкин Н.Я., Доброхотова М.А., Сафонов А.Н. Дифференциальные уравнения: Учебное пособие. М.: Просвещение, 1984. 176 с.

Результаты интегрирования четырех уравнений системы (15):

$$\begin{cases} u = ve^{-Cv} \\ p = \dfrac{\sqrt{2gy}}{v_0}\left(1+\dfrac{Cy}{2}\right); \\ t = \sqrt{\dfrac{2y}{g}}\left(1+\dfrac{Cy}{6}\right); \\ x = v\sqrt{\dfrac{2y}{g}}\left(1+\dfrac{Cy}{6}\right). \end{cases} \quad (16)$$

Для определения параметров приземления МО в системе (16) следует учесть $y = h$. Тогда с учетом квадратичной зависимости сопротивления воздуха от скорости падения МО при его сбрасывании с БПЛС, перемещающегося со скоростью v, известном баллистическом коэффициенте C и высоте полета h конечная горизонтальная составляющая скорости u, тангенс угла падения p, длительность падения T и относ A могут быть рассчитаны как

$$\begin{cases} u = ve^{-Cv} \\ p = \dfrac{\sqrt{2gh}}{v}\left(1+\dfrac{Ch}{2}\right); \\ T = \sqrt{\dfrac{2h}{g}}\left(1+\dfrac{Ch}{6}\right); \\ A = v\sqrt{\dfrac{2H}{g}}\left(1+\dfrac{CH}{6}\right). \end{cases} \quad (17)$$

Для достижения наиболее точного попадания в точку назначения идеальным можно считать такой вариант, при котором БПЛС прекратит свое движение параллельно поверхности Земли, находясь непосредственно над этой точкой. После этого должно произойти снижение высоты расположения БПЛС до минимальной и должен быть произведен сброс МО [6]. Однако с практической точки зрения такой вариант представляется маловероятным вследствие низкой производительности процесса при большом количестве МО и пунктов их доставки [7]. В реальных условиях сбрасывание МО осуществляется с поступательно движущегося БПЛС. БПЛС совершает непрерывное движение по заданной траектории, а МО сбрасываются по мере приближения к требуемым точкам [8]. При этом вероятные возмущающие воздействия, не предусмотренные программой, обусловлены лишь влиянием ветра, осадков или непланируемым появлением новых точек доставки МО. В соответствии с четвертым равенством системы (17) увеличение относа МО достигается увеличением скорости полета БПЛС и высоты полета. При этом следует учитывать, что быстрое изменение поступательной скорости движения БПЛС затруднительно, а значительное увеличение высоты полета увеличивает длительность полета МО и повышает уязвимость результатов расчета ввиду действия ветра или других погодных факторов.

Алгоритм, реализованный бортовым процессором БПЛС для определения момента сброса МО, представлен на рисунке 5 [9, 10].

Исходная информация для расчета (баллистический коэффициент N, ускорение свободного падения g и допустимая продолжительность t обработки информации от появившегося в обозрении точки ожидания МО) закладывается перед началом работы в блок 2. В блок 5 поступает текущая исходная информация от электронных средств навигации о фактическом расстоянии x_0 от точки ожидания приземления МО до перпендикуляра от поверхности Земли к БПЛС, о высоте полета H и скорости v. В блоке 6 производится расчет требуемого расстояния от места ожидания приземления МО до пересечения перпендикуляра с Землей. В блоке 7 сравниваются значения расчетного расстояния A с фактическим x_0. Выполнение условия $A \le x_0$ свидетельствует о необходимости

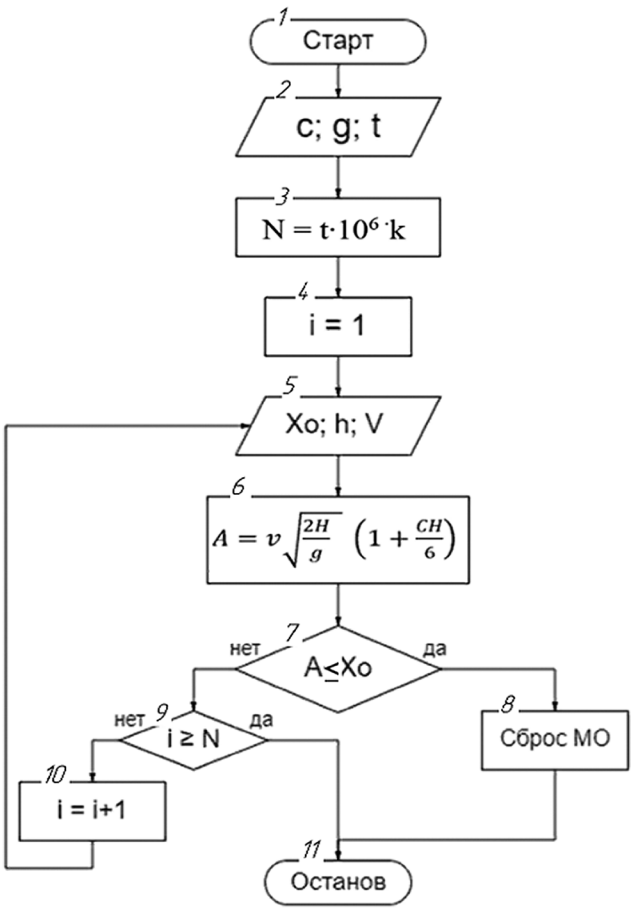


Рис. 5. Алгоритм автоматического определения момента сброса груза с учетом сопротивления воздуха, пропорционального квадрату скорости падения

Fig. 5. Algorithm for automatically determining the moment of load dropping, taking into account air resistance proportional to the square of the fall velocity

немедленного сброса МО, осуществляемого по команде, сформированной в блоке 8. При невыполнении этого условия происходит повторный ввод навигационной информации в блок 5 и совершается последующая ее обработка в блоках 6 и 7. Блоки 4, 9 и 10 предназначены для организации циклической работы алгоритма в течение заданного времени t. При этом количество циклов рассчитывается в блоке 3 по формуле:

$$N = t \cdot 10^6 \cdot k,$$

где k – разрядность процессора, $k = 8$.

Остановка работы алгоритма (блок 11) производится либо при сбросе МО, либо при исчерпании лимита времени t, определяемого количеством циклов N.

Выводы

1. Расстояние от точки сброса материального объекта до требуемой точки приземления без учета сопротивления воздуха определяется скоростью полета БПЛС и высотой полета. При учете сопротивления воздуха, пропорционального квадрату скорости падения материального объекта, помимо скорости полета БПЛС и высоты полета, при определении расстояния необходимо учитывать баллистический коэффициент.

2. Алгоритм, учитывающий сопротивление воздуха, баллистический коэффициент и параметры полета, позволяет автоматически определить момент сброса материального объекта бортовым процессором БПЛС.

Список источников / References

1. Wang G., Han Yu., Li X., Andaloro J., Chen P., Hoffmann W.C., Han X., Chen S., Lan Yu. Field evaluation of spray drift and environmental impact using an agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer. Science of The Total Environment. 2020;737:139793. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139793

2. Белов Д.В., Андреев С.А. Расчет скорости нагрева гелия в рабочей камере дирижабля // Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии (сушка, тепловые и массообменные процессы) СЭТМТ-2023: Сборник научных трудов Восьмой Международной научно-практической конференции, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 17-19 октября 2023 г. М.: ООО «Мегаполис», 2023. С. 327-330. EDN: ICQYMA

Belov D.V. Andreev, S.A. Calculation of the heating rate of helium in the working chamber of the airship. *Modern energy-saving thermal and mass transfer technologies* (*drying, thermal and mass transfer processes*) *SETMT – 2023*: *Proceedings of the Eighth International Scientific and Practical Conference, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy.* 2023. Pp. 327-330. (In Russ.)

3. Malyuta D., Brommer Ch., Hentzen D., Stastny T., Siegwart R., Brockers R. Long-duration fully autonomous operation of rotorcraft unmanned aerial systems for remote-sensing data acquisition. Journal of Field Robotics. 2020;37(1):137-157. https://doi.org/10.1002/rob.21898

4. Shahid N., Abrar M., Ajmal U., Masroor R., Amjad Sh., Jeelani M. Path planning in unmanned aerial vehicles: An optimistic overview. International Journal of Communication Systems. 2022;35(6): e5090. https://doi.org/10.1002/dac.5090

5. Горбач Н.И., Лужинский Е.С., Неверовская Я.Б. Исследование падения тяжелого груза в воздухе при квадратичном законе сопротивления // Теоретическая и прикладная механика: Международный научно-технический сборник. Минск: БНТУ, 2011. Вып. 26. С. 290-294. https://rep.bntu.by/handle/data/72932

Gorbach N.I., Luzhinskiy E.S., Neverovskaya Ya.B. Study of the fall of a heavy load in the air under the quadratic law of resistance. *Theoretical and applied mechanics*: *International scientific and technical journal* (*dedicated to the 90th anniversary of BNTU and the 80th anniversary of Ivlev D.D*. Ministry of Education of the Republic of Belarus, Minsk: BNTU, 2011;26:290-294. (In Russ.)

6. Benarbia T., Kyamakya K. A literature review of drone-based package delivery logistics systems and their implementation feasibility. Toward the New Era of Sustainable Design, Manufacturing and Management. Sustainability. 2022;14(1):360. https://doi.org/10.3390/su14010360

7. Li Y., Liu M., Jiang D. Application of unmanned aerial vehicles in logistics: a literature review. Sustainability. 2022;14(21):14473. https://doi.org/10.3390/su142114473

8. Saponi M. Borboni A., Adamini R., Faglia R., Amici C. Embedded payload solutions in UAVs for medium and small package delivery. Machines. 2022;10(9):737. https://doi.org/10.3390/machines10090737

9. Федоренко Р.В. Структурно-алгоритмическая и аппаратная организация автопилота посадки робота-дирижабля с применением визуальной навигации // Наука и образование: Научное издание МГТУ имени Н.Э. Баумана. 2011. № 9. С. 9. EDN: OHFTOP

Fedorenko R.V. Structural-algorithmic and hardware organization of the autopilot for landing a robot-airship using visual navigation. *Science and Education of Bauman MSTU*, 2011;9:9. (In Russ.)

10. Федоренко Р.В. Алгоритмы автопилота посадки роботизированного дирижабля // Инженерный вестник Дона. 2011. № 1. С. 365-371. EDN: NXPBVV

Fedorenko R.V. Autopilot algorithm for landing a robotic airship. *Engineering Journal of Don*, 2011;1:365-371. (In Russ.)

Информация об авторах

Белов Дмитрий Владимирович[1], аспирант;
dmitri.belov@rgau-msha.ru

Андреев Сергей Андреевич[2], канд. техн. наук, доцент;
energo-andreev@rgau-msha.ru

[1,2] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Author Information

Dmitriy V. Belov[1], postgraduate student,
dmitri.belov@rgau-msha.ru

Sergey A. Andreev[2], CSc (Eng), Associate Professor;
energo-andreev@rgau-msha.ru

[1,2] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Статья поступила 11.01.2024, после рецензирования и доработки 12.06.2024; принята к публикации 13.06.2024

Received 11.01.2024; Revised 12.06.2024; Accepted 13.06.2024