

Труды МАИ. 2025. № 141
Trudy MAI. 2025. No. 141. (In Russ.)

ИНФОРМАТИКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ

Научная статья
УДК 621.452
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184506>
EDN: <https://www.elibrary.ru/OFEQAU>

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИНТЕЗ
ОПТИМАЛЬНОГО ГРУППОВОГО ВЫСОТНОГО ПОЛЕТА
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Омар Анар оглы Гусейнов^{1✉}, Фалах Фахраддин оглы Гулиев²,

¹Национальное Аэрокосмическое Агентство,

²Производственное Объединение «Джихаз»,

Баку, Азербайджанская Республика

¹Omer.huseynov.22@mail.ru[✉]

Аннотация. Одной из важнейших миссий, выполняемых с помощью БПЛА является разведывательная деятельность, осуществляемая с целью обнаружения и идентификации объектов, представляющих особый интерес. Повышение эффективности, быстродействия и оперативности выполнения этой миссии может быть достигнуто путем организации групповых полетов БПЛА. Вместе с тем, разведывательная деятельность группы БПЛА должна быть осуществлена незаметно для внешних наблюдателей и для выполнения этого требования группа БПЛА должна осуществлять полеты на больших высотах, используя высокочувствительную разведывательную аппаратуру. Высотные полеты позволяют расширить зону охвата разведываемого участка, что является дополнительным преимуществом высотных полетов. Вместе с тем, при организации высотных полетов БПЛА должны быть учтены

атмосферные условия, воздействующие на летательные аппараты, например, такие факторы, как температура, давление и плотность воздуха. Хорошо известно, что плотность воздуха зависит от таких факторов как высота полета, температура, давление воздуха и относительная влажность. Сформулирована и решена задача математического моделирования, оптимизации модели и синтеза режима функционирования группового высотного полета БПЛА в смысле поиска минимального значения плотности воздуха, при которой возможен групповой полет БПЛА с оптимальной взаимосвязью между диаметром пропеллера (винта) БПЛА и крутящим моментом. Вычисление функциональной зависимости между указанными показателями, при которой полет возможен на определенной высоте позволяет определить те высотные интервалы полетов БПЛА, которые соответствуют значениям $\rho_{\text{ср}}$, вычисленным по заданным интервалам значений крутящего момента.

Ключевые слова: математическое моделирование, оптимизация, крутящий момент, БПЛА, групповой полет

Для цитирования: Гусейнов О.А. оглы, Гулиев Ф.Ф. оглы. Математическое моделирование и синтез оптимального группового высотного полета беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2025. № 141. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184506>

COMPUTER SCIENCE, MODELING AND MANAGEMENT

Original article

MATHEMATICAL MODELING AND SYNTHESIS OF OPTIMAL GROUP HIGH-ALTITUDE FLIGHT OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Omar Anar oglu Huseynov^{1✉}, Falah Fakhraddin oglu Guliyev²

¹National Aerospace Agency, Baku, The Republic of Azerbaijan

²Industrial Association “Djihaz”,
Baku, The Republic of Azerbaijan

¹Omer.huseynov.22@mail.ru✉

Abstract. One of the most important missions carried out with the help of UAVs is intelligence activities carried out in order to detect and identify objects of special interest. Increasing the efficiency, speed and efficiency of this mission can be achieved by organizing group flights of UAVs. At the same time, the reconnaissance activities of the UAV group must be carried out unnoticed by external observers and to fulfill this requirement, the UAV group must fly at high altitudes using highly sensitive reconnaissance equipment. High-altitude flights allow you to expand the coverage area of the explored area, which is an additional advantage of high-altitude flights. At the same time, when organizing high-altitude UAV flights, atmospheric conditions affecting aircraft should be taken into account, for example, factors such as temperature, pressure and air density. It is well known that air density depends on factors such as altitude, temperature, air pressure and relative humidity. The problem of mathematical modeling, optimization of the model and synthesis of the mode of operation of a group high-altitude flight of a UAV is formulated and solved in the sense of finding the minimum value of air density at which a group flight of a UAV is possible with an optimal relationship between the diameter of the propeller (screw) of the UAV and the torque. Calculating the functional dependence between these indicators, at which flight is possible at a certain altitude, allows you to determine those altitude intervals of UAV flights that correspond to the values of r_{sr} calculated from the specified intervals of torque values.

Keywords: mathematical modeling, optimization, torque, UAV, group flight

For citation: Huseynov Omar Anar oglu, Guliyev Falah Fakhraddin oglu. Mathematical modeling and synthesis of optimal group high-altitude flight of unmanned aerial vehicles.

Trudy MAI. 2025. No. 141. (In. Russ.). URL:

<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184506>

Введение

Одной из значительных функций, выполняемых БПЛА является разведывательная деятельность, осуществляемая с целью обнаружения и идентификации объектов, представляющих особый интерес [1-3]. Такая деятельность на широких просторах может быть осуществлена при помощи групповых полетов БПЛА, что может привести к повышению эффективности, быстродействию и оперативности проводимой разведки. Вместе с тем, часто такая разведка должна быть осуществлена незаметно для наблюдателей, расположенных на земле, т.е. на больших высотах, используя высокочувствительную разведывательную аппаратуру. При этом увеличение высоты полета также может привести к расширению зоны охвата исследуемого участка одним БПЛА что является дополнительным преимуществом высотных полетов. Вместе с тем, успешное функционирование БПЛА в режиме высотных полетов неразрывно связано с правильным выбором адекватной математической модели силовой установки [4]. Как отмечается в работе [5], на ранних стадиях проектирования силовых установок авиационных средств целесообразно использовать математические модели для выбора их оптимальных параметров и оценки их эффективности. Согласно [6] одним из таких методов является метод полунатурного моделирования, примененный в этой работе для моделирования мультикоптеров. Метод полунатурного моделирования также позволяет осуществить отработку измерительных систем и идентификацию характеристик математической модели [7]. Промышленные образцы мультикоптеров различного назначения появились в конце 20-го и в начале 21-го веков [8]. Дальнейшее стремительное развитие беспилотных летательных средств привело к появлению различных методик концептуальной разработки беспилотных летательных аппаратов [9]. Так, например, в работе [10] изложены особенности взаимодействия БПЛА при групповых полетах для решения задачи мониторинга и сформулирована задача оптимизации групповых полетов. В работе [11] рассмотрены оптимального выбора трассы полета с учетом влияния динамики воздушных масс. В работе [12] рассмотрен вопрос о расширении функциональных возможностей БПЛА мультироторного типа с

учетом моделирования свойств подстилающей поверхности для осуществления аварийной посадки.

При планировании высотных полетов БПЛА должны быть приняты во внимание атмосферные условия, воздействующие на летательные аппараты, такие факторы, как температура, давление и плотность воздуха [13,14]. Хорошо известно, что плотность воздуха зависит от таких факторов как высота полета, температура, давление воздуха и относительная влажность [15,16]. Учет влияния плотности воздуха для БПЛА винтового типа согласно [17,18] осуществляется с использованием следующих базовых уравнений

$$T = C_T \rho \left(\frac{N}{60} \right)^2 D_p^4 \quad (1)$$

$$M = C_M \rho \left(\frac{N}{60} \right)^2 D_p^5 \quad (2)$$

характеризующих связь аэродинамических показателей винта (пропеллера) с плотностью воздуха.

В формулах (1), (2) приняты следующие обозначения: T -тяговая сила (Ньютон), M -крутящий момент (Ньютон-метр), N -скорость вращения винта (обороты в минуту); ρ -плотность воздуха ($\text{кг}/\text{м}^3$); C_T -коэффициент тяги винта; C_M -коэффициент крутящего момента; D -диаметр винта (пропеллера)(м).

Что касается зависимости плотности воздуха от атмосферных условий и высоты полета (h), то здесь используется следующий международный стандарт атмосферной модели [19], согласно которому

$$\rho = \frac{273\rho_0}{273+T} \left(1 - 0,0065 \frac{h}{273+T} \right)^{5,25} \quad (3)$$

где ρ_0 -стандартная плотность воздуха; $\rho_0 = 1,293 \text{ кг}/\text{м}^3$; h -высота полета (м); T -локальная температура ($^{\circ}\text{C}$).

Целью настоящей статьи является математическое моделирование группового высотного полета беспилотных летательных аппаратов и синтез оптимизированного режима осуществления такого полета.

Материалы и методы

Известный метод определения технических показателей группового полета БПЛА может быть изложена с использованием формул (1)-(3) в виде следующего алгоритма:

1. Задаваясь показателями ρ_0, T, h в формуле (3), определяют величину ρ , т.е. плотность воздуха на высоте h .
2. Используя вычисленное значение ρ , задавшись значениями показателей C_T, N, D_p определяют величину тяговой силы T по формуле (1).
3. Используя вычисленное значение ρ , задавшись значениями показателей C_M, N, D_p определяют величину крутящего момента M по формуле (2).

Блок-схема вышеизложенного алгоритма показана на рис. 1.

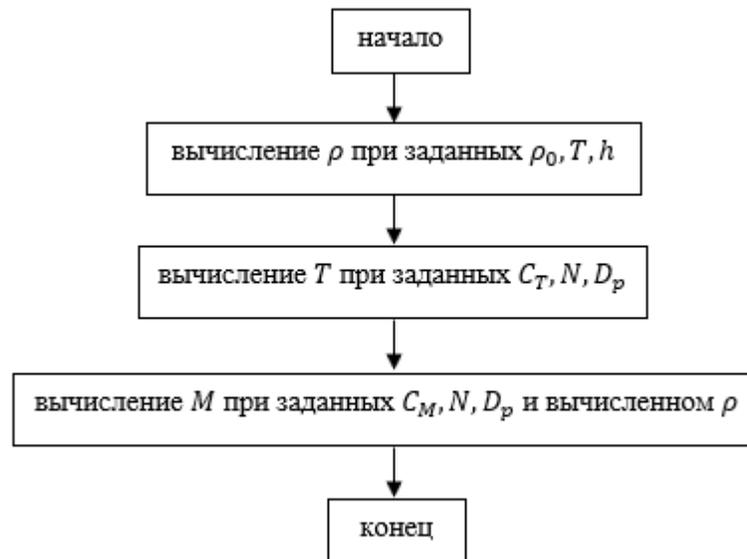


Рис. 1. Блок-схема известного алгоритма вычисления T и M для винтового БПЛА

Вместе с тем, при решении задач выполнения высотной разведывательной миссии особый интерес представляет следующий вопрос: Какая высота полета может быть достигнута на базе имеющегося парка БПЛА при планируемом групповом полете летательных средств.

Предлагаемый метод решение поставленного вопроса базируется на создании математической модели, оптимизации модели и синтеза нового режима групповых полетов, формируемого с учетом следующих операций:

1. С учетом данных существующего парка БПЛА определяется такой состав группы, в которых оптимальный выбор пар параметров (T_i, D_{pi}) ; $i = \overline{1, n}$; n - количество БПЛА в группе, обеспечивает минимальную среднюю величину плотности воздуха (ρ) в некотором высотном сегменте полета (рис. 2).

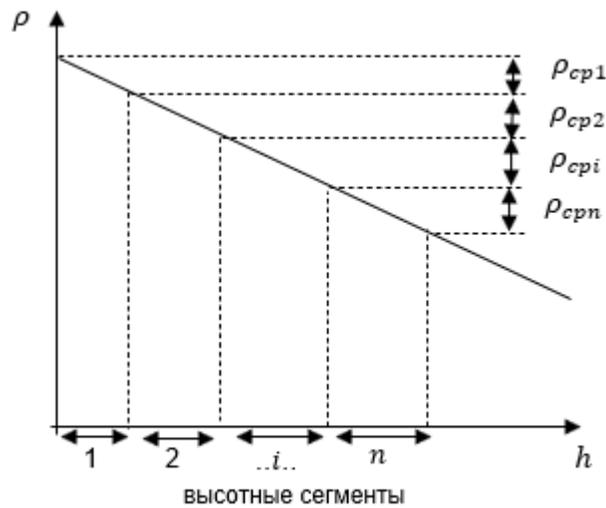


Рис. 2. Выбор высотных сегментов группового полета БПЛА в зависимости от вычисленной величины $\rho_{ср.i}$; $i = \overline{1, n}$ по модельной линии зависимости $\rho(h)$

2. Определение соответствующего сегмента высоты при осуществлении группового полета с использованием формулы (3), или известных графических материалов касательно зависимости ρ и h (рис. 3).

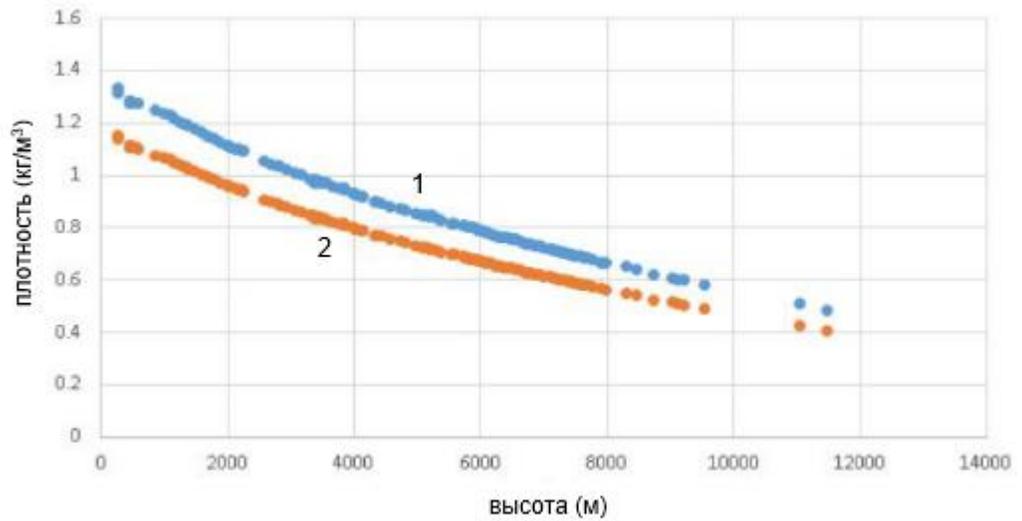


Рис. 3. Реальная зависимость плотности воздуха для влажного воздуха (1) и сухого воздуха (2)[20]

Блок-схема общего алгоритма реализации предлагаемого метода, в котором возможен оптимальный выбор функций (1) и (3) или (2) и (3) показан на рис. 4.

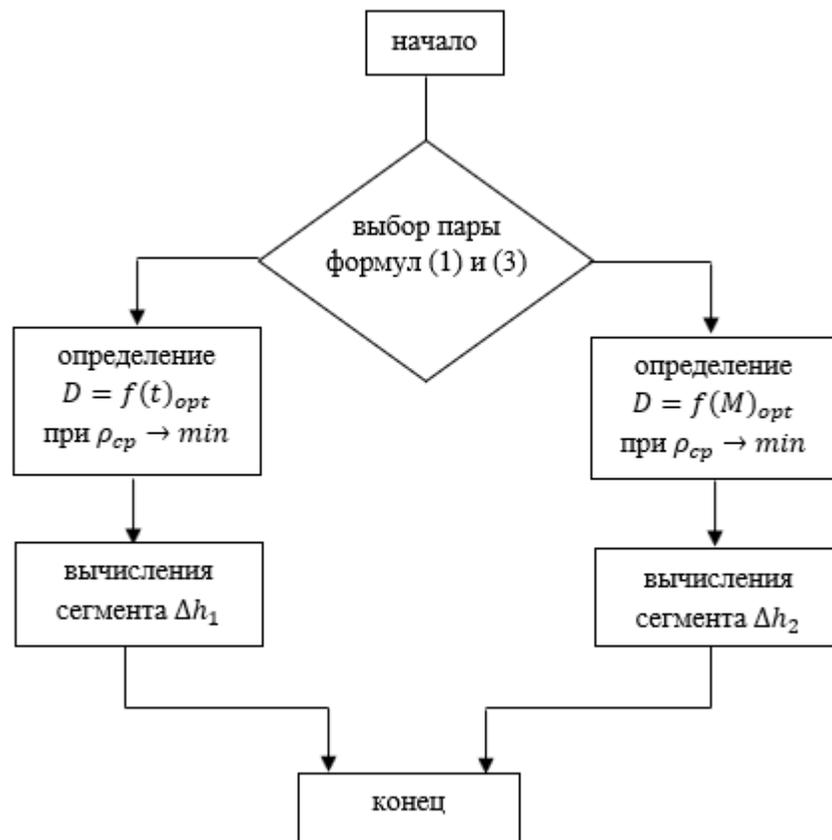


Рис. 4. Общий алгоритм реализации предложенного метода ре

Как видно из алгоритма реализации предложенного метода ре, представленного на рис. 4, решение задачи $\rho \rightarrow \min$ может быть осуществлена двумя путями: (1) путем вычисления оптимальной функции $D = f(T)$ и (2) путем вычисления оптимальной функции $D = f(M)$. Так как решение этих задач симметрично, рассмотрим решение одного из этих задач, а именно, а именно, второй задачи. Комплекс процедур по созданию математической модели групповых моделей заключается в следующем:

Выражение (2) перепишем как

$$\rho = \frac{M}{C_M \left(\frac{N}{60}\right)^2 D_p^5} \quad (4)$$

Допустим наличие двух множеств

$$M = \{M_i\} \quad (5)$$

где $M_i = M_{i-1} + \Delta M$; $\Delta M = \text{const}$; $i = \overline{1, n}$; $M_0 = 0$.

А также

$$D_p = \{D_{pi}\} \quad (6)$$

Введем на рассмотрение дискретную функцию

$$D_{pi} = f(M_i) \quad (7)$$

С учетом (4) и (7) среднюю величину $\rho_{\text{ср}}$ вычислим как

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{1}{\Delta n} \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{C_M \left(\frac{N}{60}\right)^2 f(M_i)^5} \quad (8)$$

Для решения задачи вычисления оптимальной функции $f(M_i)_{\text{opt}}$ приводящей $\rho_{\text{ср}}$ к минимуму наложим на $f(M_i)$ следующее ограничительное условие:

$$\sum_{i=1}^n f(M_i) = C_1; C_1 = \text{const} \quad (9)$$

Функционал цели (8) в непрерывном случае имеет вид

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{1}{\Delta M} \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \frac{M dM}{C_M \left(\frac{N}{60}\right)^2 f(M)^5} \quad (10)$$

Ограничительное условие (9) в непрерывной модели имеет вид

$$\int_{M_{\min}}^{M_{\max}} f(M) dM = C_2; C_2 = \text{const} \quad (11)$$

С учетом выражений (10), (11) составим целевой функционал F безусловной вариационной оптимизации

$$F = \frac{1}{\Delta M} \int_{M_{min}}^{M_{max}} \frac{M}{C_M \left(\frac{N}{60}\right)^2 f(M)^5} dM + \lambda \left[\int_{M_{min}}^{M_{max}} f(M) dM - C_2 \right] \quad (12)$$

где $\Delta M = M_{max} - M_{min}$; λ -множитель Лагранжа.

Таким образом, формулы (4)-(12) составляют математическую модель, оптимизация которой позволит синтезировать предлагаемый оптимальный режим группового полета. Далее изложим порядок синтеза оптимального режима группового полета.

Решение задачи (12), согласно методу Эйлера, удовлетворяет следующему условию:

$$\frac{d \left\{ \frac{M}{\Delta M C_M \left(\frac{N}{60}\right)^2 f(M)^5} + \lambda f(M) \right\}}{df(M)} = 0 \quad (13)$$

Из выражения (13) находим

$$-\frac{5M}{\Delta M C_M \left(\frac{N}{60}\right)^2 f(M)^6} + \lambda = 0 \quad (14)$$

Из выражения (14) находим

$$f(M) = \sqrt[6]{\frac{5M}{\lambda \Delta M C_M \left(\frac{N}{60}\right)^2}} \quad (15)$$

Для вычисления λ воспользуемся выражениями (11) и (15). Имеем

$$\int_{M_{min}}^{M_{max}} \sqrt[6]{\frac{5M}{\lambda \Delta M C_M \left(\frac{N}{60}\right)^2}} dM = C_2 \quad (16)$$

Из выражения (16) находим

$$\lambda = 6 \cdot \sqrt[6]{\frac{5M}{\lambda \Delta M C_M \left(\frac{N}{60}\right)^2}} \cdot \frac{\left(M_{max}^{\frac{7}{6}} - M_{min}^{\frac{7}{6}}\right)}{7C_2} \quad (17)$$

С учетом выражений (15) и (17) получаем

$$f(M) = \frac{7}{6} C_2 \cdot \sqrt[6]{\frac{M}{M_{max}^{\frac{7}{6}} - M_{min}^{\frac{7}{6}}}} \quad (18)$$

При решении (18) F достигает минимума, т.е. среднее значение плотности воздуха принимает минимальное значение. Это, в свою очередь, означает что при условии (18) высота полета группы БПЛА может достичь максимума.

Обсуждение

Таким образом, сформулирована и решена задача определения условия, при которой группа разведывательных БПЛА сможет функционировать на максимально возможной высоте в смысле поиска такой оптимальной полетной взаимосвязи между диаметром пропеллера (винта) (D) БПЛА и крутящим моментом (M), реализация которого возможна минимальной плотности воздуха, т.е. на максимальной высоте. Вычисление функциональной зависимости между M и D при которой полет возможен на максимальной высоте позволяет определить те высотные интервалы полетов БПЛА, которые соответствуют значениям $\rho_{ср}$, вычисленным по заданным интервалам ($M_{max} - M_{min}$). Отмечено, что поставленная задача также может быть решена путем вычисления оптимальной функции взаимосвязи диаметра пропеллера (винта) и тяговой силы.

Основные выводы и заключение

1. Определено, что групповой полет n числа разведывательных дронов (БПЛА) может быть оптимизирован в смысле нахождения такой функциональной зависимости между диаметром винта (пропеллера) и крутящего момента при которой возможен групповой полет в высотном сегменте с минимальной величиной плотности воздуха. При этом предполагается, что групповой полет осуществляется n числом БПЛА, у которых крутящий момент винта растет от минимума до максимума в группе.
2. Показано, что в зависимости от существующего интервала крутящих моментов может быть определен минимально возможное значение плотности воздуха, т.е.

общий высотный интервал полета может быть разделен на сегменты высот, в которых могут функционировать отдельные группы разведывательных БПЛА.

Список источников

1. Zuo Z., Liu C., Han Q., Song J. Unmanned aerial vehicles: control methods and future challenges // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. 2022. Vol. 9, No. 4. P. 1-14. DOI: [10.1109/JAS.2022.105410](https://doi.org/10.1109/JAS.2022.105410)
2. Alsawy A., Hicks A., Moss D., Mckeever S. An Image Processing Based Classifier to Support Safe Dropping for Delivery-by-Drone // 2022 IEEE 5th International Conference on Image Processing Applications and Systems (IPAS). Genova, Italy, 5–7 December 2022. DOI: [10.1109/IPAS55744.2022.10052868](https://doi.org/10.1109/IPAS55744.2022.10052868)
3. Harrington P., Ng W.P., Binns R. Autonomous Drone Control within a Wi-Fi Network // In Proceedings of the 2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), Porto, Portugal, 20–22 July 2020, IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2020. DOI: [10.1109/CSNDSP49049.2020.924](https://doi.org/10.1109/CSNDSP49049.2020.924)
4. Зиненков Ю.В., Луковников А.В., Черкасов А.Н. Математическое моделирование силовой установки на базе ТРДД для высотного беспилотного аппарата // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2014. № 4. С. 46-54.
5. Бутов А.М., Козарев Л.А. Математическое моделирование рабочего процесса авиационных двигателей. - М.: ВВИА им. Н.Е.Жуковского, 1993. - 143 с.
6. Гоголев А.А. Полунатурное моделирование беспилотных летательных аппаратов типа мультикоптер // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=77238>
7. Огольцов И.И., Рожнин Н.Б., Шеваль В.В. Разработка математической модели пространственного полета квадрокоптера // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=62031>

8. Каримов А.Х. Цели и задачи, решаемые беспилотными авиационными комплексами нового поколения // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26767>
9. Гусейнова Р.О., Гумбатов Д.А. Оптимизация концептуальной разработки беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2024. № 136. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180684>
10. Кочкаров А.А. Современная инженерия малых беспилотных летательных аппаратов и особенности их сетевого взаимодействия // Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности. 2018. № 1 (1). С. 113-121. DOI: [10.20948/future-2018-17](https://doi.org/10.20948/future-2018-17)
11. Тимошенко А.В., Балдычев М.Т., Маренков И.А., Пивкин И.Г. Способ построения «субоптимальных» маршрутов мониторинга разнотипных источников беспилотным летательным аппаратом // Труды МАИ. 2020. № 111. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=115145>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-10](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-10)
12. Кошкаров А.С., Гулий Д.Д., Барякшева В.А. Алгоритм аварийной посадки беспилотного летательного аппарата мультироторного типа на основе анализа изображения подстилающей поверхности // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176835>
13. Ziquan Yu, Youmin Zhang, Bin Jiang, et al. Fractional Order PID-Based Adaptive Fault-Tolerant Cooperative Control of Networked Unmanned Aerial Vehicles against Actuator Faults and Wind Effects with Hardware-in-the-Loop Experimental Validation // Control Engineering Practice. 2021. Vol. 114, P. 104861. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104861>
14. Lei Cui, Ruizhi Zhang, Hongjiu Yang, Zhiqiang Zuo. Adaptive Super-Twisting Trajectory Tracking Control for an Unmanned Aerial Vehicle under Gust Winds // Aerospace Science and Technology. 2021. Vol. 115, P. 106833. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2021.106833>
15. Rioussset J.A., Pasko V.P., Bourdon A. Air-density-dependent model for analysis of air heating associated with streamers, leaders, and transient luminous events // Journal of Geophysical Research Atmospheres. 2010. Vol. 115, P. 12321. DOI: [10.1029/2010JA015918](https://doi.org/10.1029/2010JA015918)

16. Ziquan Yu, Youmin Zhang, Bin Jiang, et al. Fractional Order PID-Based Adaptive Fault-Tolerant Cooperative Control of Networked Unmanned Aerial Vehicles against Actuator Faults and Wind Effects with Hardware-in-the-Loop Experimental Validation // *Control Engineering Practice*. 2021. Vol. 114, P. 104861. DOI: [10.1016/j.conengprac.2021.104861](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104861)
17. Dai X., Quan Q., Ren J., Cai K.Y. An analytical design-optimization method for electric propulsion systems of multicopter UAVs with desired hovering endurance // *IEEE/ASME transactions on mechatronics*. 2019. Vol. 24, No 1. DOI: [10.1109/TMECH.2019.2890901](https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2890901)
18. Joshi D., Deb D., Muyeen M. Comprehensive review on electric propulsion system of unmanned aerial vehicles // *Frontiers in energy research*. 2022. Vol. 10. DOI: [10.3389/fenrg.2022.75201](https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.75201)
19. Cavcar M. The international standard atmosphere. Anadolu University, 2000. Turkey, Vol. 30, P. 9.
20. Anton Kuzubov, Aaron Kates, David Western. Team KNSP. Design, construction and testing of humidity's effect on atmospheric conditions. Technical Report. May 2017, Missouri University of Science and Technology, Rolla.

References

1. Zuo Z., Liu C., Han Q., Song J. Unmanned aerial vehicles: control methods and future challenges. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2022. Vol. 9, No. 4. P. 1-14. DOI: [10.1109/JAS.2022.105410](https://doi.org/10.1109/JAS.2022.105410)
2. Alsawy A., Hicks A., Moss D., Mckeever S. An Image Processing Based Classifier to Support Safe Dropping for Delivery-by-Drone. *2022 IEEE 5th International Conference on Image Processing Applications and Systems (IPAS)*. Genova, Italy, 5–7 December 2022. DOI: [10.1109/IPAS55744.2022.10052868](https://doi.org/10.1109/IPAS55744.2022.10052868)
3. Harrington P., Ng W.P., Binns R. Autonomous Drone Control within a Wi-Fi Network. *In Proceedings of the 2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, Porto, Portugal, 20–22 July 2020, IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2020. DOI: [10.1109/CSNDSP49049.2020.924](https://doi.org/10.1109/CSNDSP49049.2020.924)

4. Zinenkov YU.V., Lukovnikov A.V., Cherkasov A.N. Mathematical modeling of a power plant based on a turbofan engine for a high-altitude unmanned vehicle. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2014. No. 4. P. 46-54. (In Russ.)
5. Butov A.M., Kozarev L.A. *Matematicheskoe modelirovanie rabocheho protsessa aviatsionnykh dvigatelei* (Mathematical modeling of working process in aviation engine). Moscow: VVIA im. N.E.Zhukovskogo Publ., 1993. 143 p.
6. Gogolev A.A. Semi-natural modelling of unmanned aerial vehicles like multicopter. *Trudy MAI*. 2017. No. 92. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=77238>
7. Ogol'tsov I.I., Rozhnin N.B., Sheval' V.V. Development of mathematical model of spatial flight of a kvadrokopter. *Trudy MAI*. 2015. No. 83. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=62031>
8. Karimov A.KH. Main goals and tasks solved by unmanned aerial vehicles (UAVs). *Trudy MAI*. 2011. No. 47. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26767>
9. Guseinova R.O., Gumbatov D.A. Optimization of the conceptual development of unmanned aerial vehicles. *Trudy MAI*. 2024. No. 136. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=180684>
10. Kochkarov A.A. Modern engineering of small drones and features of their network interaction. *Proektirovanie budushchego. Problemy tsifrovoi real'nosti*. 2018. No. 1 (1). P. 113-121. (In Russ.). DOI: [10.20948/future-2018-17](https://doi.org/10.20948/future-2018-17)
11. Timoshenko A.V., Baldychev M.T., Marenkov I.A., Pivkin I.G. Technique elaboration for various types of sources “suboptimal” monitoring routes by unmanned aerial vehicle. *Trudy MAI*. 2020. No. 111. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=115145>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-10](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-10)
12. Koshkarov A.S., Gulii D.D., Baryaksheva V.A. Multi-rotor unmanned aerial vehicle emergency landing algorithm based on underlying surface image analysis. *Trudy MAI*. 2023. No. 132. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176835>

13. Ziquan Yu, Youmin Zhang, Bin Jiang, et al. Fractional Order PID-Based Adaptive Fault-Tolerant Cooperative Control of Networked Unmanned Aerial Vehicles against Actuator Faults and Wind Effects with Hardware-in-the-Loop Experimental Validation. *Control Engineering Practice*. 2021. Vol. 114, P. 104861. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104861>
14. Lei Cui, Ruizhi Zhang, Hongjiu Yang, Zhiqiang Zuo. Adaptive Super-Twisting Trajectory Tracking Control for an Unmanned Aerial Vehicle under Gust Winds. *Aerospace Science and Technology*. 2021. Vol. 115, P. 106833. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2021.106833>
15. Rioussset J.A., Pasko V.P., Bourdon A. Air-density-dependent model for analysis of air heating associated with streamers, leaders, and transient luminous events. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2010. Vol. 115, P. 12321. DOI: [10.1029/2010JA015918](https://doi.org/10.1029/2010JA015918)
16. Ziquan Yu, Youmin Zhang, Bin Jiang, et al. Fractional Order PID-Based Adaptive Fault-Tolerant Cooperative Control of Networked Unmanned Aerial Vehicles against Actuator Faults and Wind Effects with Hardware-in-the-Loop Experimental Validation. *Control Engineering Practice*. 2021. Vol. 114, P. 104861. DOI: [10.1016/j.conengprac.2021.104861](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104861)
17. Dai X., Quan Q., Ren J., Cai K.Y. An analytical design-optimization method for electric propulsion systems of multicopter UAVs with desired hovering endurance. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*. 2019. Vol. 24, No 1. DOI: [10.1109/TMECH.2019.2890901](https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2890901)
18. Joshi D., Deb D., Muyeen M. Comprehensive review on electric propulsion system of unmanned aerial vehicles. *Frontiers in energy research*. 2022. Vol. 10. DOI: [10.3389/fenrg.2022.75201](https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.75201)
19. Cavcar M. *The international standard atmosphere*. Anadolu University, 2000. Turkey, Vol. 30, P. 9.
20. Anton Kuzubov, Aaron Kates, David Western. Team KNSP. *Design, construction and testing of humidity's effect on atmospheric conditions*. Technical Report. May 2017, Missouri University of Science and Technology, Rolla.

Статья поступила в редакцию 03.12.2024

Одобрена после рецензирования 25.12.2024

Принята к публикации 25.04.2025

The article was submitted on 03.12.2024; approved after reviewing on 25.12.2024; accepted for publication on 25.04.2025