

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Научная статья
УДК 533.65
DOI: [10.34759/trd-2022-127-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-17)

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА МНОГОСЕГМЕНТНОГО ПАРЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ГЕТЕРОГЕННОЙ ПОЛЕТНОЙ ЗОНЕ

Асланова Айтен Баба гызы

Национальное аэрокосмическое агентство,
Баку, Азербайджанская Республика
aslanova.ayten6@hotmail.com

Аннотация. Теплые потоки воздуха, возникающие из-за более высокого нагрева поверхности Земли солнечными лучами, позволяют осуществить летательными аппаратами полет в режиме парения. Нагретые потоки воздуха организованно восходят вверх вдоль возвышенных зон ландшафта местности, что позволяют пилотам осуществить полет в режиме парения используя восходящие потоки, нередко достаточно скрученные из-за воздействия ветра. Для увеличения времени полета БПЛА используют такие меры как оптимизация аэродинамической формы, установка солнечных панелей, увеличение крыльев для повышения подъемной силы, использование термальных потоков воздуха для перехода в режим парения. Однако

вопросы адаптивной реализации режима парения в воздухе с учетом сложной сцены по сегментному изменению аэродинамических сил путем динамического изменения площади крыльев БПЛА еще не рассмотрены. Статья посвящена оптимизации режима парения беспилотных летательных аппаратах в условиях направленных потоков воздуха. Сформулирована задача оптимизации полета БПЛА в режиме парения в условиях восходящего потока нагретого воздуха в гетерогенной многосегментной полетной зоне. В качестве критерия оптимальности принято достижение минимума суммарной аэродинамической силы сопротивления, действующей на БПЛА. Допускается адаптивное управление площадью крыльев в зависимости от скорости восходящих потоков теплого воздуха. При этом зона полета гетерогенна может быть разделена на сегменты, где скорость восходящих потоков воздуха изменяется равномерно. Решение задачи оптимизации показало, что минимум суммарной аэродинамической силы сопротивления может быть достигнут при обратной кубической зависимости площади крыльев БПЛА от скорости восходящего воздушного потока.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, аэродинамическое сопротивление, оптимизация, парение, адаптивное управление

Для цитирования: Асланова А.Б. Оптимизация режима многосегментного парения беспилотного летательного аппарата в гетерогенной полетной зоне // Труды МАИ. 2022. № 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-17)

INFORMATION TECHNOLOGIES AND
TELECOMMUNICATIONS

**OPTIMIZATION OF THE UAV MULTI-SEGMENT HOVERING
MODE IN A HETEROGENEOUS FLIGHT ZONE**

Aslanova Auten Baba gyzy

National Aerospace Agency,

Baku, Republic of Azerbaijan

aslanova.ayten6@hotmail.com

Abstract. The warm airflows arising from the higher heating of the Earth's surface by the sunrays allow the aircraft flight executing in the hovering mode. Heated airflows rise up in an orderly way along the elevated areas of the terrain landscape, which allows pilots flight execution in hovering mode, employing updrafts, often rather twisted due to the wind impact. To increase the UAV flight time, measures as such aerodynamic shape optimizing, solar panels installing, wings increasing for the lifting force improving and thermal air flows employing to switch to the hovering mode are being used. However, the issues of the hovering mode adaptive implementation in the air with account for the complex scene of a segment-by-segment change in aerodynamic forces by dynamical changing of the UAV wing area have not been considered yet. The article deals with the unmanned aerial vehicles hovering mode optimizing under conditions of directed airflows. The problem of the UAV flight optimizing in the hovering mode under conditions of an upward flow of heated air in a

heterogeneous multi-segment flight zone is formulated. Achieving minimum of the total aerodynamic drag force acting on the UAV is accepted as an optimality criterion. Adaptive control of the wing area is conceded, depending on the speed of the warm air updrafts. The flight zone herewith is heterogeneous and can be divided into segments where the velocity of the ascending air flows varies uniformly. The optimization problem solution revealed that the total aerodynamic drag force minimum can be achieved with the inverse cubic dependence of the UAV wing area on the speed of the ascending airflow.

Keywords: UAV, aerodynamic drag, optimization, soaring, adaptive control

For citation: Aslanova A.B. Optimization of the UAV multi-segment hovering mode in a heterogeneous flight zone. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-17)

Как отмечается в работе [1] термальные потоки воздуха, возникающие из-за более высокого нагрева поверхности Земли солнечными лучами, позволяют осуществить летательными аппаратами полет в режиме парения. Это явление было обнаружено пилотами еще в начале 20-х годов прошлого столетия. Нагретые потоки воздуха организованно восходят вверх вдоль возвышенных зон ландшафта местности, что позволяют пилотам осуществить полет в режиме парения используя восходящие потоки, нередко достаточно скрученные из-за воздействия ветра (рис. 1). Индикаторами наличия термальных восходящих воздушных потоков могут быть круговые полеты птиц, движение вверх пылевых потоков, появление кучевых облаков, оболочек тумана или другой влажной смеси воздуха. Вопросы эффективного

использования таких тепловых потоков для парения подробно описаны в [1-3]. Общая концепция полетной эффективности-перспективного направления, позволяющего оценить рациональность организации процесса расходования энергетического потенциала летательного аппарата (ЛА) на траектории была предложена в работе [4]. В работе [5] получено аналитическое решение задачи Коши для квазилинейного уравнения параболического типа в анизотропном пространстве со степенной зависимостью от температуры компонентов тензора теплопроводности. Методика оптимизации основных проектных параметров реактивного аппарата вертикального взлета и посадки с управлением газовыми соплами и моделирование его движения была предложена в работе [6]. В работе [7] проведен анализ методики измерения динамических угловых производных, а также комплексов вращательных и нестационарных производных, подготовленных к последующему их разделению, в условиях требуемых углов атаки и скольжения. Задача определения конечной точки траектории воздушного объекта по данным радиолокационных наблюдений была рассмотрена в работе [8]. Результаты такого определения могут использоваться для своевременного предупреждения защищаемых наземных объектов об опасности со стороны летательных аппаратов. В работе [9] проведен сравнительный анализ нестационарных составляющих потоков для различных случаев относительного обдува самолета: при движении самолета и при движении воздуха относительно неподвижного самолета. Новая математическая модель аэродинамических характеристик с введением точных (нелинейных) выражений составляющих,

соответствующих структуре обтекания, была разработана в работе [10]. В работе [11] представлен теоретический анализ применения нейронных сетей для прогнозирования параметров состояния летательного аппарата по результатам траекторных измерений. Вопросы параметрической идентификации кинематической модели движения летательного аппарата (ЛА) в условиях неполной информации о характеристиках параметров модели и ошибок наблюдений были рассмотрены в работе [12].

Как отмечается в работе [13], для увеличения времени полета БПЛА используют такие меры как оптимизация аэродинамической формы, установка солнечных панелей, увеличение крыльев для повышения подъемной силы, использование термальных потоков воздуха для перехода в режим парения. В то же время вопросы адаптивной реализации режима парения в воздухе с учетом сложной сцены по сегментному изменению аэродинамических сил путем динамического изменения площади крыльев БПЛА еще не рассмотрены. Возможно это связано с технологическими сложностями реализации режима динамически управляемой площади крыл во время полета БПЛА. Однако, можно ожидать, что с развитием техники и технологий это технологическая проблема будет успешно решена. В этом плане имеет смысл ставить и решать выше указанную задачу в следующей формулировке: В многосегментной термальной зоне, благоприятствующей реализации полета в режиме парения, в которой сегменты четко различны по своим аэродинамическим характеристикам определить порядок адаптивного управления площадями крыл БПЛА для достижения минимальной

величины суммарной аэродинамической силы сопротивления, действующей на БПЛА. Рассмотрим предлагаемое решение данного вопроса.

Согласно [14] термальные потоки являются турбулентными воздушными потоками, однако существуют различные упрощенные модели расчета траектории и режима полета [15]. В работе [16] указывается, что возможность управление формой своих крыльев подобно птицам в режиме парения пока недоступно для БПЛА, однако здесь заложен некоторый потенциал для дальнейшего увеличения эффективности полетов беспилотных аппаратов. Отметим, что в работах по оптимизации режимов полета БПЛА в основном ставится цель увеличения времени полета [17,18], в то время как цель уменьшения аэродинамической силы сопротивления в режиме парения также содействует увеличению времени парения, что эквивалентно увеличению полетного времени БПЛА.

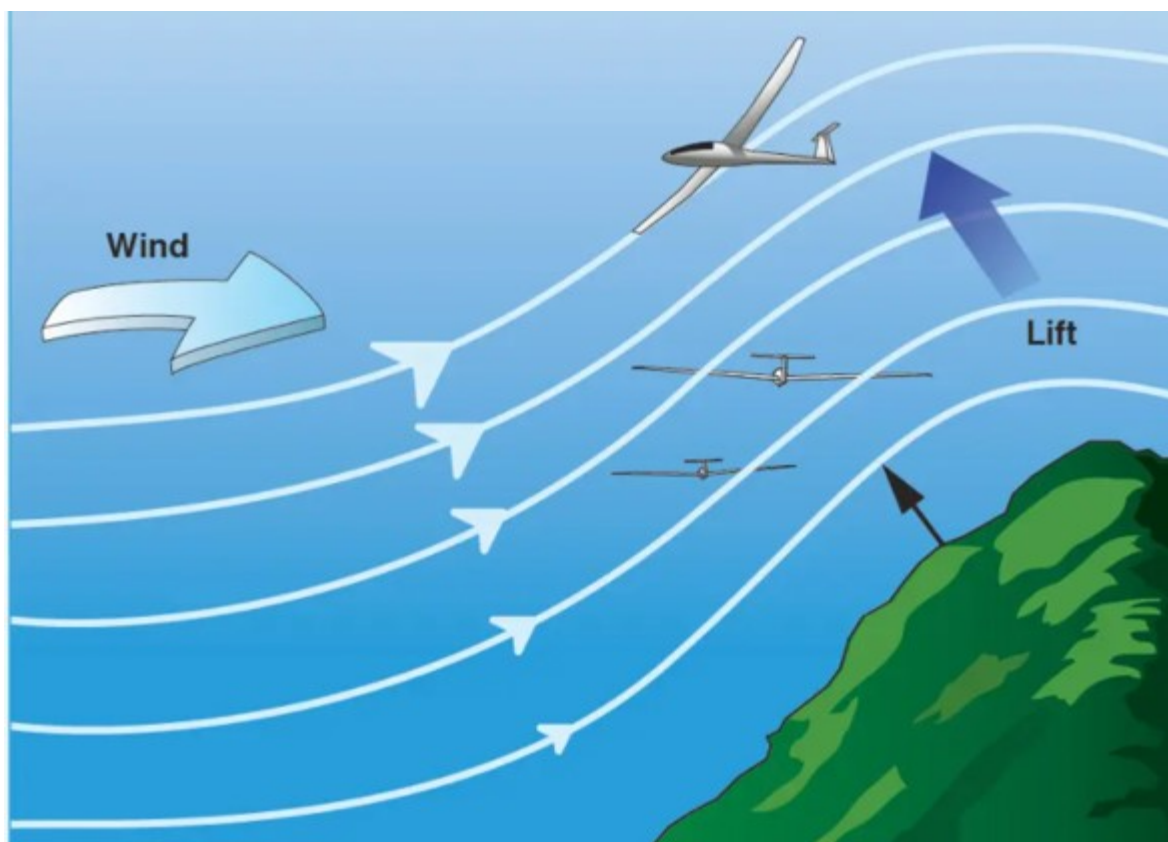


Рис.1.Графическая иллюстрация возникновения термальных потоков воздуха при наличии ветра. [1].

Предлагаемый метод

Согласно работе [19], при использовании скорости воздушного потока в качестве контрольного показателя можно строить кинематическую модель полета, где БПЛА рассматривается в состоянии равновесия в течении всего полета. При этом допускаем, что временные промежутки перехода с одного сегмента зоны парения на другую намного короче, чем длительность парения в пределах одного из таких сегментов. В работе [19] для анализа кинематики полета использована модель точечной массы БПЛА в режиме стабильного полета. (рис.2).

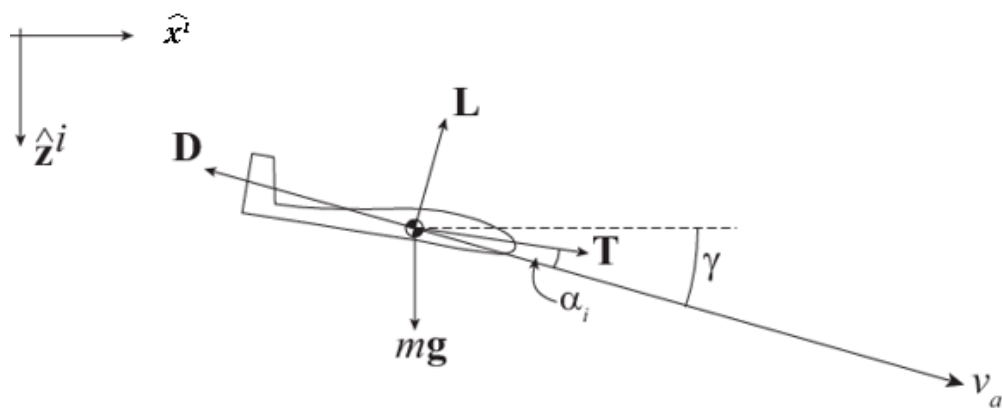


Рис.2. Кинематическая схема полета БПЛА в режиме парения [19].

Принятые обозначения: \bar{x}, \bar{z} - единичные векторы инерциальной координатной системы; γ - угол полетной трассы; T-сила тяги; D-сила сопротивления; L-подъемная сила; mg-сила тяжести.

Условия равновесия действующих на БПЛА сил имеет вид [19]:

$$mg \cdot \cos\gamma = L + T \sin\alpha \quad (1)$$

$$mg \cdot \sin\gamma = D - T \cos\alpha \quad (2)$$

где: m- масса БПЛА ; α -угол атаки.

Если допустить, что угол γ очень маленький, то можно считать , что $\sin\gamma = \gamma$; $\cos\gamma = 1$. Также допускаем, что $\alpha = 0$. В этом случае из уравнения (1) получим

$$mg = \frac{1}{2} \rho v_a^2 S G_L \quad (3)$$

где: G_L -коэффициент подъема, ρ -плотность воздуха, v_a - скорость воздушного потока, S- площадь крыла.

Воспользуемся уравнением второго порядка для вычисления полярной оценки аэродинамического сопротивления C_D [19]

$$C_D = a_0 + a_1 \cdot C_L + a_2 C_L^2 \quad (4)$$

В этом случае сила сопротивления вычисляется как [19]

$$D = \frac{1}{2} \rho v_a^2 S (a_0 + a_1 C_L + a_2 C_L^2) \quad (5)$$

Примем, что вся траектория полета в режиме парения проходит через сегменты, где коэффициент подъема определяется на основе (3) как

$$G_L = \frac{2mg}{\rho v_a^2 S} \quad (6)$$

При этом, в указанных сегментах, по предположению, скорости воздушного потока составляют множество V_a , т.е

$$V_a = \{v_a\}, \quad (7)$$

где: $v_{ai} = v_{ai-1} + \Delta v_a$; $\Delta v_a = \text{const}$.

С учетом (5) и (7) суммарная аэродинамическая сила сопротивления может быть вычислена как :

$$D_\Sigma = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{2} \rho v_{ai}^2 S (a_0 + a_1 G_{Li} + a_2 G_{Li}^2) \right] \quad (8)$$

На основе выражений (6) и (8) получаем:

$$D_\Sigma = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{2} \rho v_{ai}^2 \left(S a_0 + \frac{2a_1 mg}{\rho v_{ai}^2} + \frac{4a_2 m^2 g^2}{\rho^2 \cdot v_{ai}^4 S} \right) \right] \quad (9)$$

Введем на рассмотрение функцию адаптивного управления площадью крыла S в зависимости от v_{ai} , т.е.

$$S_i = f(v_{ai}) \quad (10)$$

Условно переходя на непрерывную форму записи, выражение (9) представим как :

$$D_{\text{ин}} = \int_0^{v_{\text{amax}}} \left[\frac{1}{2} \rho v_a^2 (f(v_a) \cdot a_0 + \frac{2a_1 mg}{\rho v_a^2} + \frac{4a_2 m^2 g^2}{\rho^2 \cdot v_a^4 f(v_a)}) \right] dv_a \quad (11)$$

Таким образом, выражение (11) является целевым функционалом, рассматриваемой задачи вычисления оптимальной функции $f(v_a)$, при которой интегральная величина аэродинамического сопротивления при парении БПЛА достиг бы минимума. Согласно методу Эйлера решение задачи, т.е. функция $f(v_a)$ должна удовлетворить условию [20].

$$\frac{dD(f(v_a))}{df(v_a)} = 0 \quad (12)$$

С учетом условия (12) из (11) получаем

$$\frac{1}{2} \rho v_a^2 \cdot a_0 = \frac{4a_2 m^2 g^2}{\rho^2 \cdot v_a^4 f^2(v_a)} \quad (13)$$

Из (13) находим

$$f^2(v_a) = \frac{8a_2 m^2 g^2}{\rho^2 \cdot v_a^6 \rho a_0} \quad (14)$$

Из (14) окончательно получаем:

$$f(v_a)_{\text{opt}} = \frac{mg}{v_a^3} \sqrt{\frac{8a_2}{\rho^3 a_0}} \quad (15)$$

При этом $D_{\text{ин}}$ достигает минимума. В этом легко убедиться взяв вторую производную интегранта в (11) по $f(v_a)$, которая окажется положительной величиной.

Таким образом, согласно полученному решению (15) площадь крыльев в оптимальном режиме парения должна уменьшаться с ростом v_a по обратному кубическому закону, будучи зависимым также от mg и ρ .

Заключение

Таким образом, сформулирована и решена задача оптимизации полета БПЛА в режиме парения в гетерогенной многосегментной полетной зоне. Критерием оптимальности является достижение минимума суммарной аэродинамической силы сопротивления, действующей на БПЛА. При этом вводится адаптивное управление площадью крыльев в зависимости от скорости восходящих потоков теплого воздуха. Допускается, что трасса полета гетерогенна, т.е. может быть разделена на сегменты, где скорость восходящих потоков воздуха изменяется равномерно. Решение непрерывного аналога составленной дискретной задачи оптимизации показало, что минимум суммарной аэродинамической силы сопротивления может быть достигнут при обратной кубической зависимости площади крыльев БПЛА от скорости восходящего воздушного потока.

Список источников

1. Soaring Techniques Chapter 10. URL: <https://www.scribd.com/document/24475859/Chapter-10-Basic-Soaring-Techniques>
2. R. Bencatel, J.T. De Sousa, A. Girard. Atmospheric flow field models applicable for aircraft endurance extension // Progress in Aerospace Sciences, 2013, vol. 61 (1). DOI:[10.1016/j.paerosci.2013.03.001](https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2013.03.001)

3. М. Allen. Updraft model for development of autonomous soaring uninhabited air vehicles // 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2006. DOI:[10.2514/6.2006-1510](https://doi.org/10.2514/6.2006-1510)
4. Костяной Е.М. Повышение баллистической эффективности летательных аппаратов путем оптимизации их конструктивных параметров // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=25424&PAGEN_2=2
5. Формалев В.Ф., Селин И.А. Тепловые волны в нелинейном анизотропном пространстве // Труды МАИ. 2010. № 37. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=13424>
6. Ким К.Х., Безвербый В.К., Гуцин В.Н. Методика оптимизации с помощью неопределенных множителей Лагранжа основных проектных параметров реактивного аппарата вертикального взлета и посадки (АВВП) с управлением газовыми соплами // Труды МАИ. 2006. № 22. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34098>
7. Захаров М.А. Анализ методики измерения комплексов аэродинамических производных в условиях требуемых углов атаки и скольжения // Труды МАИ. 2004. № 17. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34200>
8. Юдин В.Н., Нгуен З.Х. Синтез алгоритма принятия решения о траектории воздушного объекта по данным радиолокационных наблюдений // Труды МАИ. 2003. № 12. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34465>

9. Захаров М.А. Нестационарные составляющие коэффициентов нормальной силы и момента тангажа самолета, обусловленные горизонтальным оперением // Труды МАИ. 2003. № 11. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34475>
10. Захаров М.А. Математическая модель коэффициентов аэродинамических характеристик в продольном движении летательного аппарата на больших углах атаки с учетом отрывного обтекания // Труды МАИ. 2002. № 9. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34575>
11. Будкина Е.М. Нейросетевой метод оценивания параметров состояния летательного аппарата по результатам измерений // Труды МАИ. 2001. № 6. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34637>
12. Панков А.Р., Попов А.С. Минимаксное оценивание движения летательного аппарата в условиях априорной стохастической неопределенности // Труды МАИ. 2002. № 7. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34626>
13. Jie Chen, Zhiwei Shi, Mengbei Zhou, et al. Modeling and simulation of UAV static soaring based on multi-hole probe // AIP Advances, 2021. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0055276>
14. Zsuzsa Akos, Mate Nagu, Severin Leven, Tamas Vicsek. Thermal soaring flight of birds and unmanned aerial vehicles // Biological Physics, 2010. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1012.0434>

14. Hauert S., Zufferey J.C., Floreano D. Evolved swarming without positioning information in aerial communication relay // *Autonomous Robots*, 2009, vol. 26 (1). DOI:[10.1007/s10514-008-9104-9](https://doi.org/10.1007/s10514-008-9104-9)
15. Tucker V. Gliding birds: The effect of variable wing span // *Journal of Experimental Biology*, 2001, pp. 13333-58.
17. James Usevitch, David Usevitch, Daniel Fry. Optimization of High Endurance Single Wing UAV, 2016. URL: <https://zenodo.org/record/49616/files/optimization-high-endurance1.pdf>
18. Drone Building and Optimization: How to Increase Your Flight Time, Payload and Overall Efficiency, Tyto Robotics. URL: <https://www.tytorobotics.com/pages/ebook-landing>
19. Jack W. Langelaan. Long Distance / Duration Trajectory Optimization for Small UAVs // Guidance, Navigation and Control Conference, August 16-19. 2007, Hilton Head, South Carolina, USA.
20. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. - М.: Наука, 1974. – 472 с.

References

1. *Soaring Techniques Chapter 10.* URL: <https://www.scribd.com/document/24475859/Chapter-10-Basic-Soaring-Techniques>

2. R. Bencatel, J.T. De Sousa, A. Girard. Atmospheric flow field models applicable for aircraft endurance extension, *Progress in Aerospace Sciences*, 2013, vol. 61 (1). DOI: [10.1016/j.paerosci.2013.03.001](https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2013.03.001)
3. M. Allen. Updraft model for development of autonomous soaring uninhabited air vehicles, *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2006. DOI: [10.2514/6.2006-1510](https://doi.org/10.2514/6.2006-1510)
4. Kostyanoi E.M. *Trudy MAI*, 2011, no. 45. URL: https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=25424&PAGEN_2=2
5. Formalev V.F., Selin I.A. *Trudy MAI*, 2010, no. 37. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=13424>
6. Kim K.Kh., Bezverbyi V.K., Gushchin V.N. *Trudy MAI*, 2006, no. 22. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34098>
7. Zakharov M.A. *Trudy MAI*, 2004, no. 17. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34200>
8. Yudin V.N., Nguen Z.Kh. *Trudy MAI*, 2003, no. 12. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34465>
9. Zakharov M.A. *Trudy MAI*, 2003, no. 11. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34475>
10. Zakharov M.A. *Trudy MAI*, 2002, no. 9. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34575>
11. Budkina E.M. *Trudy MAI*, 2001, no. 6. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34637>

12. Pankov A.R., Popov A.S. *Trudy MAI*, 2002, no. 7. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34626>
13. Jie Chen, Zhiwei Shi, Menqbei Zhou, et al. Modeling and simulation of UAV static soaring based on multi-hole probe, *AIP Advances*, 2021. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0055276>
14. Zsuzsa Akos, Mate Nagu, Severin Leven, Tamas Vicsek. Thermal soaring flight of birds and unmanned aerial vehicles, *Biological Physics*, 2010. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1012.0434>
15. Hauer S., Zufferey J.C., Floreano D. Evolved swarming without positioning information in aerial communication relay, *Autonomous Robots*, 2009, vol. 26 (1). DOI: [10.1007/s10514-008-9104-9](https://doi.org/10.1007/s10514-008-9104-9)
16. Tucker V. Gliding birds: The effect of variable wing span, *Journal of Experimental Biology*, 2001, pp. 13333-58.
17. James Usevitch, David Usevitch, Daniel Fry. Optimization of High Endurance Single Wing UAV, 2016. URL: <https://zenodo.org/record/49616/files/optimization-high-endurance1.pdf>
18. *Drone Building and Optimization: How to Increase Your Flight Time, Payload and Overall Efficiency*, Tyto Robotics. URL: <https://www.tytorobotics.com/pages/ebook-landing>
19. Jack W. Langelaan. Long Distance / Duration Trajectory Optimization for Small UAVs, *Guidance, Navigation and Control Conference*, August 16-19. 2007, Hilton Head, South Carolina, USA.

20. El'sgol'ts L.E. *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie* (Differential equations and calculus of variations), Moscow, Nauka, 1974, 472 p.

Статья поступила в редакцию 29.09.2022

Статья после доработки 30.09.2022

Одобрена после рецензирования 13.10.2022

Принята к публикации 26.12.2022

The article was submitted on 29.09.2022; approved after reviewing on 13.10.2022; accepted for publication on 26.12.2022