

УДК 531.391.1:532.5.011
DOI: 10.37890/jwt.vi87.695

Методика оценки проектных параметров сверхмалого электрического безэкипажного экранного катера

Ю.А. Карпиков

ORCID: 0009-0003-6669-8958

А.В. Февральских

ORCID: 0000-0002-5959-7994

А.А. Крайнов

ORCID: 0000-0003-1156-8702

НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В предлагаемой работе рассмотрен метод предварительной оценки проектных параметров сверхмалых электрических безэкипажных экранных катеров. Для выполнения исследования моделировались характеристики малых экранолетов нормальной схемы с прямым крылом малого удлинения. Определение потребных параметров электрической силовой установки выполнено на основе имитационного моделирования уравнений движения экранных катеров с учетом траекторных ограничений в варьируемом диапазоне проектных параметров. Зависимости основных аэродинамических коэффициентов от высоты движения над подстилающей поверхностью приняты на основе экспериментальных данных о прототипе. Разработанная методика основана на траекторном проектировании и позволяет предварительно оценивать массово-габаритные характеристики малых экранных катеров, а также выбирать различные варианты оснащения их электрических силовых установок. Предложенный метод может быть интегрирован в обобщенную методику проектирования и оптимизации характеристик аппаратов указанных типов.

Ключевые слова: проектирование, безэкипажный катер, сверхмалый экраноплан, аккумуляторная батарея, электрический транспорт, имитационное моделирование, оптимизация, математическая модель

Methodology for estimating the design parameters of an ultra-small electric powered screen boat

Yuri A. Karpikov

ORCID: 0009-0003-6669-8958

Andrey V. Fevral'skikh

ORCID: 0000-0002-5959-7994

Artem A. Krainov

ORCID: 0000-0003-1156-8702

NSTU named after R.E. Alekseev

Abstract. In this paper, we consider a method for preliminary evaluation of the design parameters of ultra-small electric powered screen boats. To perform the study, the characteristics of small screens of a normal circuit with a straight wing of small elongation were modeled. The required parameters of the electric propulsion system were determined based on simulation modeling of the equations of motion of screen boats, taking into account trajectory constraints in a variable range of design parameters. The dependences of the main aerodynamic coefficients on the height of movement above the underlying surface are based on experimental data on the prototype. The developed methodology is based on trajectory design and allows you to pre-evaluate the mass-dimensional characteristics of small screen boats, as well as choose various options for equipping their electric propulsion systems. The

proposed method can be integrated into a generalized methodology for designing and optimizing the characteristics of these types of devices.

Keywords: design, unmanned boat, ultra-small screen boat, battery, electric transport, simulation, optimization, mathematical model

Введение

Использование экранопланов для решения транспортных задач, по мнению многих современных исследователей, является перспективным направлением совершенствования морской техники [1,2]. В России применение экранопланов особенно актуально в силу наличия развитой речной сети и необходимости обеспечения транспортной системы Северного морского пути [3]. Другой современной тенденцией развития морской техники является насыщение роботизированными технологиями. Безэкипажные катера различных типов находят все больше сфер применения в военном [4] и гражданском секторах [5,6]. В этих условиях одним из важнейших показателей технического совершенства современных безэкипажных катеров является обеспечение высоких транспортных характеристик. Создание сверхмалых экранопланов - одно из перспективных направлений развития скоростных безэкипажных катеров [7]. Высокие показатели транспортной эффективности могут быть достигнуты данным классом техники в связи с широким распространением современных электродвигателей (ЭД), а также литий-полимерных аккумуляторных батарей (АБ) с большой удельной емкостью [8].

Для принятия технических решений на ранних стадиях проектирования необходимо выбирать варианты оснащения сверхмалых электрических безэкипажных экранных катеров (ЭБЭК) аккумуляторными батареями, маршевыми электродвигателями, а также предварительно оценивать их массово-габаритные характеристики. В данной работе предлагается подход к расчетной оценке указанных проектных параметров и выбору вариантов оснащения ЭБЭК. Предлагаемый подход основан на адаптации методики баллистического проектирования для моделирования хода аппарата над подстилающей поверхностью, учета зависимостей для моделирования аэродинамических характеристик экраноплана и особенностей работы электрической силовой установки (СУ).

Методика оценки проектных параметров электрических безэкипажных экранных катеров

Для расчетной оценки характеристик ЭБЭК используется методика баллистического проектирования [9], в соответствии с которой, рассматривается система уравнений движения. Движение ЭБЭК над подстилающей поверхностью описывается уравнениями, отличными от характерных для безэкипажного катера с погруженной частью [10]. В качестве функционального требования задаются характерные точки траектории движения с учетом изменения высоты над подстилающей поверхностью при достижении заданной дальности. Система уравнений движения поэтапно интегрируется с учетом изменения параметров движения. При моделировании движения в качестве основной характеристики принимается нагрузка на крыло p (кгс/м²). Варьируя значения нагрузки на крыло и увязывая его значение с относительными массами частей ЭБЭК, возможно определить значение нагрузки на крыло для аппарата минимальной массы, способного совершить движение по траектории с учетом принятых ограничений. Для предварительной оценки транспортных характеристик методом баллистического проектирования рекомендуется использовать упрощенную запись системы уравнений движения, приведенных к линейному виду, в ней учитывается только продольное движение без боковых маневров.

Наибольшие значения потребных мощностей W_{Π} достигаются СУ в начальный момент движения и при разгоне, для выполнения условий отрыва и выхода на крейсерский режим соответственно. Эти режимы также соответствуют наиболее быстрому расходу емкости АБ. Располагаемая мощность СУ ограничивается значением W_p . При этом на меньшей относительной высоте положительное влияние экранного эффекта значительнее, что позволяет снизить нагрузку на СУ. В данной работе полагалось, что старт осуществляется со специального катапультного устройства с достижение стартовой скорости $v_{\text{СТАРТ}}=55\text{км/ч}$, а высота движения над подстилающей поверхностью меньше или равна хорде крыла. С учетом указанных условий потери энергии до выхода на крейсерский режим движения меньше, чем для классического БПЛА.

Уравнения движения ЭБЭК схожи с таковыми для БПЛА, однако в соотношениях (1)-(3), содержащих аэродинамические коэффициенты C_x и C_y , необходимо учитывать влияние близости подстилающей поверхности:

$$\sin \alpha \sim \alpha = \frac{Mg}{\frac{W}{v} + C_{y\alpha}(\bar{h}) \frac{M}{p} q} \quad (1)$$

$$\dot{v} = \frac{\frac{W}{v} - C_x(\bar{h}, \alpha) \frac{M}{p} q}{M} - g \sin \theta \quad (2)$$

$$W_{\Pi} = \left(Mg \sin \theta + C_x(\bar{h}, \alpha) \frac{M}{p} q \right) \cdot v, \quad (3)$$

где θ – угол наклона траектории;

α – угол атаки;

$C_{y\alpha}(\bar{h})$ – производная коэффициента подъемной силы по углу атаки для разных относительных высот движения над подстилающей поверхностью;

$C_x(\bar{h}, \alpha)$ – коэффициент сопротивления для разных углов атаки и относительных высот движения над подстилающей поверхностью;

q – скоростной напор;

M – значение массы аппарата (кг);

W_{Π} – потребная мощность (Вт);

v – скорость аппарата (м/с);

p – удельная нагрузка на крыло (кг/м²).

Значение текущей мощности W СУ определяется значением располагаемой мощности, если в процессе интегрирования уравнений значение потребной мощности больше располагаемой $W_{\Pi} > W_p$. В этом случае происходит увеличение угла атаки для компенсации недостатка подъемной силы и достижения равновесия системы уравнений. Возрастание угла атаки ограничивается заданием угла сваливания, принятого равным $\alpha_{\text{кр}} = 70^\circ$.

В предлагаемой методике изменения аэродинамических коэффициентов моделируется в зависимости от высоты движения над подстилающей поверхностью [11,12]. Данные продувок, использованные для моделирования аэродинамических коэффициентов представлены на рис. 1. и рис. 2.

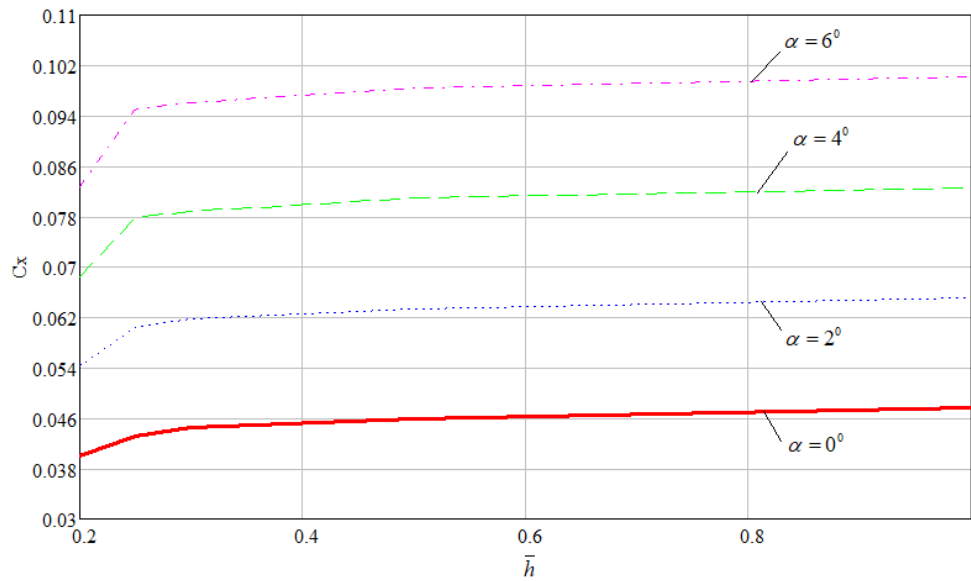


Рис. 1. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от относительной высоты движения над подстилающей поверхностью для различных углов атаки

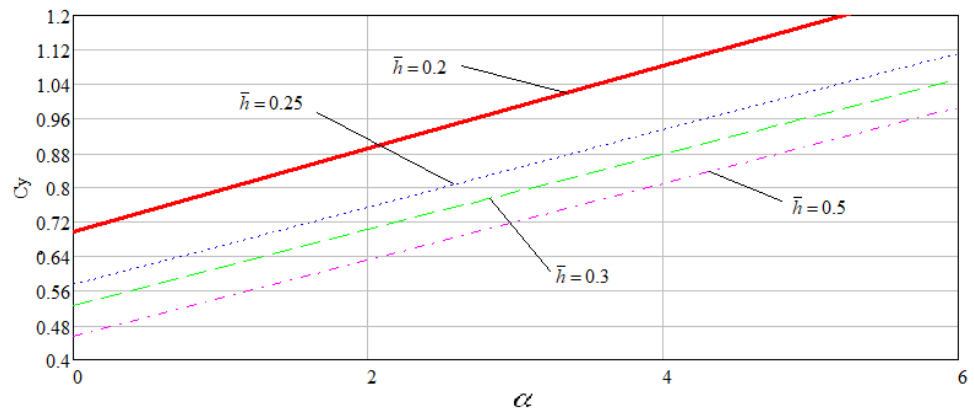


Рис. 2. Зависимость коэффициента подъемной силы от угла атаки для различных относительных высот движения над подстилающей поверхностью

Облик сверхмалого электрического экраноплана, для которого выполнялась оценка представлен на рис.3. Характерными особенностями данного аппарата является применение нормальной аэродинамической схемы с низкорасположенным крылом малого удлинения и Т-образным оперением, расположение двух винтовых двигателей в переднюю часть аппарата в зону обдува крыла [12]. Удлинение крыла данного аппарата составляет $\lambda=2,22$.

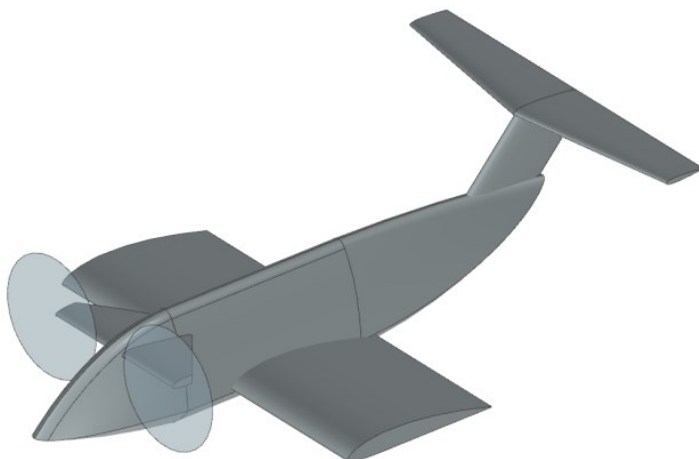


Рис. 3. Облик сверхмалого электрического экраноплана

В результате баллистического расчета решение системы уравнений движения ЭБЭК производится при заданных траекторных и скоростных ограничениях, а также с учетом изменения коэффициентов C_x и C_y в зависимости от высоты движения над подстилающей поверхностью. Численное интегрирование по времени для определения параметров на всех этапах движения итеративно выполняется методом Эйлера.

Максимальные мощности ЭД, выбираемых для оснащения вариантов ЭБЭК не должны быть менее потребных максимальных мощностей W_{max} , получаемых в результате реализаций траекторий движения. Выбор АБ основан, как возможности максимальной токоотдачи на режимах максимальной мощности, так и на соответствии емкости АБ значению суммарной затраченной на движение энергии E при достижении заданной дальности [13].

Выбранные АБ и ЭД позволяют оценить относительный вес СУ $\mu_{СУ}$.

Относительная масса конструкции μ_K и бортового оборудования $\mu_{оборуд}$ могут быть определены по известным эмпирическим зависимостям. Тогда значение стартовой массы ЭБЭК можно определить из уравнения баланса в виде:

$$m_0 = \frac{m_{ПН}}{1 - \sum \mu_i} \quad (4)$$

На ранних этапах проектирования для оценки проектных характеристик, соответствующих рациональному облику ЭБЭК допустимо использовать метод оптимизации по доминирующему критерию. Согласно данному принципу рациональным обликом ЭБЭК можно считать аппарат, оптимизированный по доминирующему критерию минимальной массы, характеристики которого соответствуют всем заданным параметрам, а также траекторным и скоростным ограничениям. Варьируя удельную нагрузку на крыло p методом последовательных уступок с заданием порога невязки $\Delta m_{0n \text{ ТРЕБ}}$ возможно найти значение минимальной стартовой массы для заданного диапазона удельных нагрузок на крыло.

$$m_{0n}^{opt} = \text{MIN}(m_{0n}(p_i)) \quad (5)$$

при:

$$m_{0n}(p_i) - m_{0n-1}(p_i) < \Delta m_{0n \text{ ТРЕБ}} \quad (6)$$

После определения минимальной стартовой массы m_0 в соответствии с формулами (5) и (6) можно перейти к уточнению массовой сводки аппарата и более детальному проектированию.

Результаты

Варианты оснащения ЭБЭК и полученные расчетные дальности движения приведены в табл.1. Для сравнительной оценки полезного влияния экранного эффекта выполнена проектная оценка минимальных масс БПЛА с удлинением $\lambda=6$, выполняющих полеты на дальности, указанные в табл.1. Данные, по сравнительной оценке, возрастания расчетной дальности движения для различных масс аппаратов при использовании полезного экранного эффекта представлены на рис.4.

Таблица 1

Данные расчетов различных вариантов оснащения электрических безэкипажных экранных катеров

Вар.	Стартовая масса (кг)	Электромотор	Полезная нагрузка (кг)	Хорда крыла (мм)	Высота движения над подстилающей поверхностью (м)	Расчетная дальность (км)
1	36,6	2xT-Motor U7 KV280	5	680	0,5	42
2	50	2xT-Motor VL8015 KV170	5	720	0,52	65
3	74,8	2xT-Motor MN1015 KV70	5	800	0,52	80

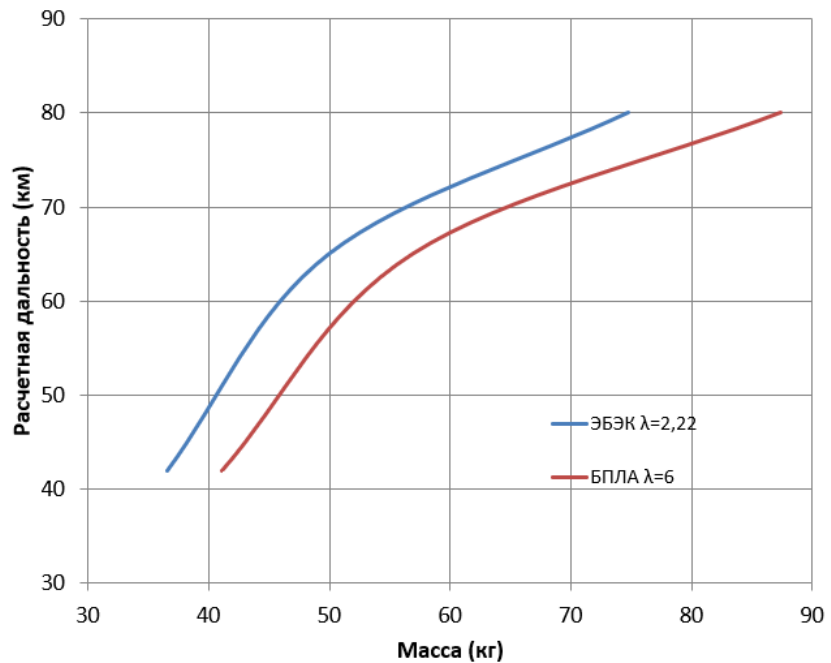


Рис. 4. Оценка возрастания расчетной дальности движения для различных масс аппаратов при использовании полезного экранного эффекта

Обсуждение

На основе анализа расчетных данных, приведенных в табл. 1 и показанных на рис. 4, можно сделать вывод о положительном влиянии применения экранного эффекта на транспортные характеристики аппарата. За счет снижения потребного значения мощности работы электрической СУ при движении на крейсерском режиме с большим аэродинамическим качеством ЭБЭК емкость АБ расходуется медленнее. Использование данной положительной особенности позволяет получить расчетную дальность ЭБЭК аналогичную БПЛА при оснащении ЭБЭК более легкой АБ. Уменьшение стартовой массы ЭБЭК по отношению к стартовой массе БПЛА для аппаратов с массой в 37 кг составляет около 10,9 %, при стартовой массе в 75 кг – около 14,5 %.

Заключение

Полученные результаты могут использоваться для предварительных расчетов массово-габаритных характеристик сверхмалых электрических безэкипажных экранных катеров. Данные характеристики могут быть увязаны с вариантами их оснащения аккумуляторными батареями и маршевыми электродвигателями. Результаты, получаемые на основе предлагаемой методики, можно применить в математической модели проектирования сверхмалого электрического безэкипажного экранного катера для оптимизации его облика.

Список литературы

1. Красильникова О.А., Зайцев А.В. Экономические аспекты организации высокоэффективной транспортной системы на базе экранопланов нового поколения / Успехи современного естествознания – 2011. – № 7. – С. 130-132. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=27144>
2. В.И. Любимов, А.А. Гаккель, В.И. Барышев / Анализ тенденций развития экранопланов и перспективы их использования в транспортной системе России Вестник ВГАВТ, выпуск 53, 2017 г. – С. 69-74. <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-tendentsiy-razvitiya-ekranoplanov-i-perspektivy-ih-ispolzovaniya-v-transportnoy-sisteme-rossii>
3. Февральских А.В., Ваганов А.Б., Савинов В.Н., Орлов Ю.Ф. Оценка преимуществ эксплуатации экранопланов в транспортной системе Северного морского пути по результатам математического моделирования / Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – № 4-3 (66). – С. 18-25. (К1). DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.046>
4. С.Н. Охрименко, И.Л. Рубанов, А.Н. Рубцов Безэкипажные катера и корабли их характеристики и решаемые ими задачи / Подводные исследования и робототехника 2025 № 2 (5). – С. 81-86. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_52_02_08
5. НПЦ «Крылья Сахалина» осуществили первую в России доставку гуманитарной помощи населению с помощью безэкипажного катера <https://sakhwings.ru/news/moneron>
6. М.Ю. Бибиков, В.А. Никитин, В.В. Смирнов/ Дронная разведка оперативно-ледовой обстановки при движении по северному морскому пути/ Международный журнал гуманитарных и естественных наук, ч. 5-1 (80), 2023. – С. 43-49. DOI:10.24412/2500-1000-2023-5-1-43-49
7. Christopher McFadden. Turkey revives the sea-skimming Ekranoplan as a smart drone / Interesting Engineering Aug 04, 2025
8. Попов С.В./ Электросудоходство: вызовы и перспективы развития / Актуальные исследования 2023. №10 (140). – С. 15-20. DOI:10.5281/zenodo.13713238
9. Балык В.М., Гайдаров Д.Д., Соцков И.А. Многокритериальный выбор рациональных обликочных характеристик беспилотного летательного аппарата при многоимпульсном режиме движения // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 3. С. 59–68. <https://mai.ru/publications/index.php?ID=176875>

10. Филиппова Е. Р., Ясинская Ю. В. Исследование системы управления движением безэкипажного катера // Труды Санкт-Петербургского Государственного морского технического университета. 2025. № 1 (13), том 4 – С. 61-68. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_61
11. Белавин Н.И. Экранопланы. Л., изд. «Судостроение», 1977, 228 с.
12. Е.М. Грамузов, В.И. Любимов, А.В. Февральских [и др.] Автоматизированная оптимизация компоновки крыла и горизонтального оперения экраноплана по результатам численного моделирования аэродинамики / Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 3-1(45). – С. 38-47. <https://morintex.ru/ru-nauchnyj-zhurnal/biblioteka-zhurnala/2019-god/>
13. Зиненков Ю.В., Луковников А.В. Особенности расчета летно-технических характеристик электрической силовой установки беспилотного летательного аппарата самолетного типа с помощью математического моделирования // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 2. С. 85–94. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180651>

References

1. Krasilnikova O.A., Zaitsev A.V. Economic aspects of organizing a highly efficient transport system based on new-generation ekranoplanes / Successes of modern natural science – 2011. No. 7. pp. 130-132. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=27144>
2. V.I. Lyubimov, A.A. Gakkel, V.I. Baryshev / Analysis of trends in the development of ekranoplanes and prospects for their use in the transport system Russian Bulletin of VGAVT, issue 53, 2017. pp. 69-74. <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-tendentsiy-razvitiya-ekranoplanov-i-perspektivy-ih-ispolzovaniya-v-transportnoy-sisteme-rossii>
3. Fevral'skikh A.V., Vaganov A.B., Savinov V.N., Orlov Yu.F. Evaluation of the advantages of using ekranoplanes in the transport system of the Northern Sea Route based on the results of mathematical modeling / Marine intelligent Technologies. – 2024. – № 4-3 (66). – Pp. 18-25. (K1) DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.046>
4. S.N. Okhrimenko, I.L. Rubanov, A.N. Rubtsov Unmanned boats and ships, their characteristics and tasks solved by them / Underwater Exploration and Robotics 2025 No. 2 (5). pp. 81-86. DOI: [10.37102/1992-4429_2025_52_02_08](https://doi.org/10.37102/1992-4429_2025_52_02_08)
5. NPC «Wings of Sakhalin» carried out the first delivery of humanitarian aid to the population in Russia using a crewless boat <https://sakhwings.ru/news/moneron>
6. M.Y. Bibikov, V.A. Nikitin, V.V. Smirnov/ Drone reconnaissance of the operational ice situation during movement along the Northern Sea Route/ International Journal of Humanities and Natural Sciences, part 5-1 (80), 2023. pp. 43-49. DOI:10.24412/2500-1000-2023-5-1-43-49
7. Christopher McFadden. Turkey revives the sea-skimming Ekranoplan as a smart drone / Interesting Engineering Aug 04, 2025
8. Popov S.V./ Electric shipping: challenges and development prospects / Current research • 2023. No. 10 (140). pp. 15-20. DOI:10.5281/zenodo.13713238
9. Balyk V.M., Gaidarov D.D., Sotskov I.A. Multi-criteria selection of rational shape characteristics of an unmanned aerial vehicle in a multi-pulse mode of motion // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2023. Vol. 30. No. 3. pp. 59-68. <https://mai.ru/publications/index.php?ID=176875>
10. Filippova E. R., Yasinskaya Yu. V. Investigation of the motion control system of a crewless boat // Proceedings of the St. Petersburg State Maritime Technical University. 2025. No. 1 (13), volume 4. pp. 61-68. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_61
11. Belavin N.I. Ekranoplans. L., ed. «Shipbuilding», 1977, 228 p.
12. E.M. Gramuzov, V.I. Lyubimov, A.V. Fevral'skikh [et al.] Automated optimization of wing layout and horizontal tail of an ekranoplane based on the results of numerical modeling of aerodynamics / Marine intelligent technologies. – 2019. – № 3-1(45). – Pp. 38-47. <https://morintex.ru/ru-nauchnyj-zhurnal/biblioteka-zhurnala/2019-god/>
13. Zinenkov Yu.V., Lukovnikov A.V. Features of calculating the flight performance characteristics of an electric power plant of an aircraft-type unmanned aerial vehicle using mathematical modeling // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2024. Vol. 31. No. 2. pp. 85-94. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180651>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Карпиков Юрий Андреевич, аспирант,
Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева,
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина,
24, e-mail: yourockkarp@mail.ru

Февральских Андрей Владимирович,
доктор технических наук, доцент,
Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева,
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина,
24, e-mail: a.fevralskih@gmail.com

Крайнов Артем Александрович, кандидат
технических наук, доцент, Нижегородский
государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 603155, г. Нижний
Новгород, ул. Минина, 24,
e-mail: art.kr-91@mail.ru

Yuri A. Karpikov, graduate student Nizhny
Novgorod State Technical University named
after R.E. Alekseev. 24 Minina Street, Nizhny
Novgorod, 603155, e-mail:
yourockkarp@mail.ru

Andrey V. Fevralskikh, Doctor of Technical
Sciences, Associate Professor Nizhny
Novgorod State Technical University named
after R.E. Alekseev. 24 Minina Street, Nizhny
Novgorod, 603155, e-mail:
a.fevralskih@gmail.com

Artem A. Krainov, Candidate of Technical
Sciences, Associate Professor Nizhny
Novgorod State Technical University named
after R.E. Alekseev. 24 Minina Street, Nizhny
Novgorod, 603155, e-mail: art.kr-91@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.12.2025; принята к публикации 20.04.2026;
опубликована онлайн 20.06.2026. Received 05.12.2025; published online 20.06.2026.