

УВЕЛИЧЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ЭКРАНОПЛАНА ЗА СЧЕТ ОГИБАНИЯ ВОЛН

А. Ю. Княжский^а, ассистент

А. В. Небылов^а, доктор техн. наук, профессор

В. А. Небылов^а, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: одной из основных проблем, тормозящих широкое внедрение экранопланов на мировой рынок, является высокая зависимость их подъемной силы от морского волнения. Это препятствует осуществлению безопасных и экономически выгодных грузопассажирских перевозок на большие расстояния над водной поверхностью. **Цель исследования:** разработка и оценка эффективности метода огибания аппаратом гребней морских волн. **Методы:** математическое моделирование на основе заранее заданной вероятности столкновения с морской поверхностью; имитационное моделирование для определения допустимой опорной истинной высоты полета управляемого экраноплана. **Результаты:** предложен способ огибания гребней морских волн, позволяющий повысить аэродинамическое качество экраноплана и снизить вероятность его столкновения с волной при интенсивном морском волнении. Суть метода заключается в прокладке траектории аппарата по желобам морских волн за счет движения в направлении минимального градиента морской поверхности в определенном секторе, направление которого совпадает с направлением на конечную точку маршрута. **Практическая значимость:** применение предложенного метода управления полетом экраноплана при интенсивном морском волнении дает возможность повысить безопасность его полета, а также его аэродинамическое качество, что, в свою очередь, позволяет снизить расход топлива.

Ключевые слова — экраноплан, морское волнение, управление движением, транспорт, минимизация высоты, безопасность полетов, оптимизация траектории, топливная эффективность.

Введение

Экраноплан (Ground Effect Vehicle — GEV) является перспективным транспортным средством будущего. Он способен иметь грузоподъемность морского судна и скорость, близкую к авиационной, объединяя преимущества обоих типов транспортных аппаратов. В случае обнаружения неисправности возможна быстрая посадка на водную поверхность без совершения специальных посадочных маневров, что повышает безопасность полетов. Экранопланы относят к безаэродромной авиации.

Данный тип летательных аппаратов можно использовать для решения многих транспортных задач. Возможные страны-разработчики определяются исходя из их географического положения и стратегических интересов. Наибольший интерес к освоению экранопланных технологий и продвижению их на рынок представляют страны с высоким экономическим и технологическим уровнем развития, имеющие выход к морю. В частности, предельного внимания заслуживают Россия, Южная Корея, Китай, США, Япония и Австралия. Например, южнокорейская компания Wingship Technology Corp. уже готовит серийное производство больших экранопланов WTC-500 и WTC-1500 (рис. 1) и имеет возможность выхода на азиатский и американский рынки [1].

До конца 80-х гг. в России уделялось большое внимание разработке экранопланов, проводилось

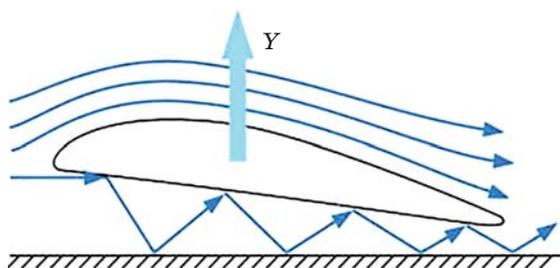
множество исследований и опытно-конструкторских работ, но позже государственное финансирование было приостановлено более чем на 20 лет. То технологическое отставание, которое сформировалось за эти годы, требует отнестись к отечественному экранопланостроению достаточно серьезно.

Свои преимущества экраноплан получает за счет использования экранного эффекта, заключающегося в возникновении области повышенного давления между его корпусом и опорной поверхностью при расстоянии между ними, мень-



■ Рис. 1. Экраноплан WTC-1500

■ Fig. 1. GEV WTC-1500



■ **Рис. 2.** Принцип возникновения воздушной подушки
 ■ **Fig. 2.** Principle of emergence of air cushion

шем 0,2 хорды крыла. Повышенное давление образуется в результате переотражений набегающего потока воздуха между нижней плоскостью крыла и опорной поверхностью (экраном) [2–4]. Принцип возникновения динамической воздушной подушки при полете вблизи экрана проиллюстрирован на рис. 2 [5].

Таким образом, при движении вблизи экрана подъемная сила аппарата формируется не только за счет понижения давления над верхней плоскостью крыла, как у обычных самолетов, но и в результате повышения давления под нижней плоскостью [6, 7].

В основном экранопланы летают над водой, но также возможны полеты над степью, пустыней, тундрой и любой другой ровной поверхностью. Низковысотные полеты над земными типами поверхностей ограничены из-за высокой вероятности столкновения с препятствиями. Над водной поверхностью препятствия в виде морских судов, представляющие наибольшую опасность для низколетящих аппаратов, можно легко обнаруживать во время полета методами активной локации. Отрицательной стороной использования водной поверхности в качестве опорной является ее подверженность волнению, особенно в океане. Это является одним из основных препятствий для межконтинентальных перелетов на экранопланах. Морское волнение уменьшает аэродинамическое качество низколетящего аппарата, рассеивая переотражаемый набегающий воздушный поток. Кроме того, при сильном морском волнении увеличивается вероятность столкновения с гребнями волн, из-за чего приходится повышать высоту полета, что снижает аэродинамическое качество низколетящего аппарата. Адекватные модели волновых возмущений рассмотрены в работах [8, 9].

Повысить минимальную высоту полета, на которой будет наблюдаться экранный эффект, можно, увеличив размеры аппарата, однако это не всегда выгодно из-за возрастания стоимости его разработки и эксплуатации. В статье предлагается способ понижения минимального предела вы-

соты полета для увеличения действия экранного эффекта и повышения аэродинамического качества аппарата за счет огибания крупных морских волн. Такой режим управления полетом экраноплана уменьшает вероятность столкновения аппарата с гребнями волн.

Исследование минимально-градиентного метода управления

Под аэродинамическим качеством крыла или летательного аппарата понимается отношение его подъемной силы к силе лобового сопротивления. Исходя из того, что подъемная сила и лобовое сопротивление определяются по формулам

$$Y = C_y S \frac{\rho v^2}{2}; \quad (1)$$

$$Q = C_x S \frac{\rho v^2}{2}, \quad (2)$$

где C_y — коэффициент подъемной силы, зависящий от удлинения, формы профиля крыла и угла атаки и определяемый продувками модели крыла; C_x — коэффициент лобового сопротивления крыла, характеризуемый продувками его модели; S — характерная площадь крыла; ρ — плотность воздуха на высоте полета; v — скорость набегающего потока [10].

Аэродинамическое качество определяется отношением коэффициентов

$$K = \frac{Y}{Q} = \frac{C_y}{C_x}. \quad (3)$$

При движении вблизи экрана аэродинамическое качество значительно возрастает с уменьшением высоты полета. Поэтому минимизация средней истинной высоты полета является одной из основных задач, решаемых при построении систем автоматического управления движением экранопланов.

Прокладка траектории по желобам крупных волн уменьшает вероятность столкновения экраноплана с волной, позволяя при этом уменьшить среднюю истинную высоту полета, вследствие чего увеличивается аэродинамическое качество аппарата. Если направление желобов волн сильно отличается от требуемого направления движения, например, движение проходит поперек волн, то предлагаемый способ управления применять нецелесообразно. Желоба волн имеют наименьшие высоты по сравнению с другими областями морской поверхности. Это означает, что движение по желобам можно рассматривать как движение в направлении минимального градиента высот морской поверхности ξ , рассчитывае-

мого относительно некоторой точки поверхности под корпусом экраноплана:

$$\gamma(t) = \min \nabla \zeta(x, y)$$

при $\gamma_{\min}(t) < \gamma(t) < \gamma_{\max}(t)$, (4)

где γ — курс аппарата; x и y — пространственные координаты; t — время.

Сектор разрешенных направлений движения относительно продольной оси аппарата $[y_{\min}, y_{\max}]$ определяется в зависимости от скорости, расстояния до конечной точки маршрута, кратчайшего направления движения, высоты волн и направлен на точку следования.

При движении в направлении минимального градиента подстилающей поверхности уменьшается частота изменений истинной высоты полета аппарата, что позволяет уменьшить опорную высоту при той же вероятности касания корпусом экраноплана морской поверхности. Причиной возникновения колебаний истинной высоты экраноплана является морское волнение, представляемое суммой некоторого числа пространственных гармоник с разными частотами, амплитудами и фазами. Математическая модель морского волнения подробно описана в работах [11–17].

Экраноплан обладает свойством самостабилизации по истинной высоте полета, поскольку при ее изменении подъемная сила, зависящая от расстояния до опорной поверхности, восстанавливает первоначальное значение высоты. Поэтому при прохождении желоба волны экраноплан постепенно снижает абсолютную высоту полета, а при пролете над ее гребнем набирает. Поскольку длины океанских волн часто превышают 300, а иногда и 500 м, можно говорить о возможности уменьшения колебаний истинной высоты экраноплана несмотря на низкочастотные неровности морской поверхности.

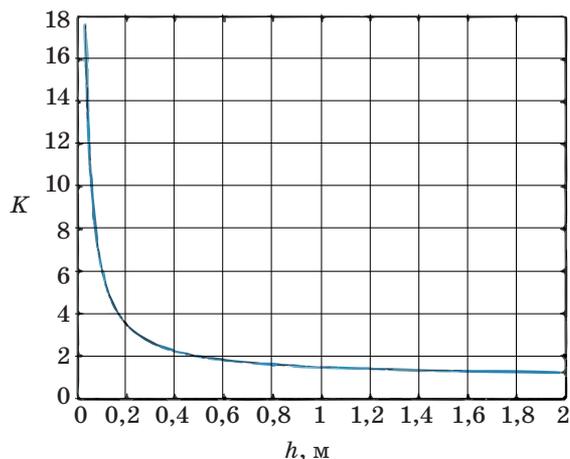
Для оценки эффективности этого метода управления полетом экраноплана в работе был использован метод математического моделирования на основе заранее заданной вероятности столкновения с морской поверхностью, путем имитационного моделирования определялась допустимая опорная истинная высота полета управляемого экраноплана. Далее вычислялись траектории управляемого и неуправляемого полетов и по формулам (1)–(3) определялись средние значения аэродинамического качества (АК) экраноплана при управляемом и неуправляемом полетах.

Общая эффективность алгоритма управления определяется по соотношению

$$\left(\hat{K}_y / \hat{K}_n - 1 \right) \times 100\%, \quad (5)$$

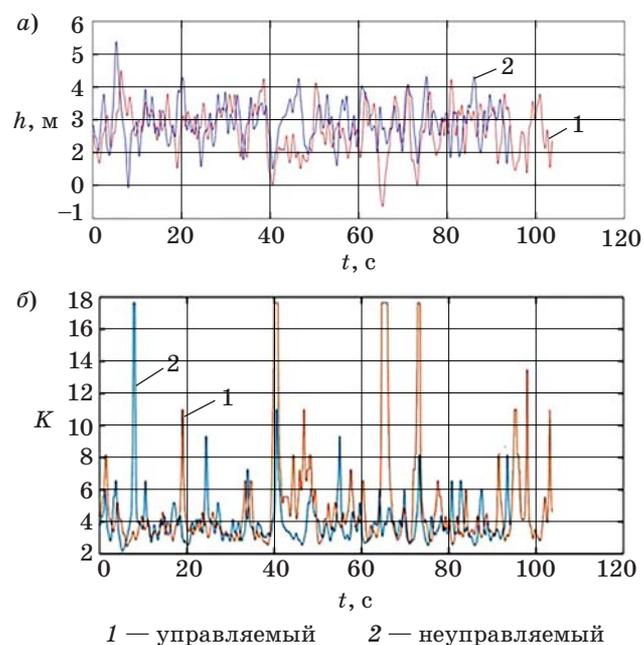
где \hat{K}_y, \hat{K}_n — среднее значение аэродинамического качества для управляемого и прямолинейного полета соответственно.

Зависимость отношения АК экраноплана в зоне действия экранного эффекта к АК аппарата,



■ **Рис. 3.** Зависимость аэродинамического качества экраноплана от высоты (для $h > 0,03$), рассчитанная по выражению (6)

■ **Fig. 3.** Dependence of the aerodynamic quality of the GEV on the altitude (for $h > 0,03$), calculated by (6)



■ **Рис. 4.** Зависимость изменения истинной высоты экраноплана (а) и аэродинамического коэффициента (б) от времени при управляемом и неуправляемом полетах

■ **Fig. 4.** Dependences of changes in the true height of the GEV (a) and aerodynamic coefficient (б) versus time with controlled (red) and uncontrolled (blue) flights

совершающего полет вдали от экрана, выражается формулой [15]

$$K/K_{\infty} = 1 + b/25h \text{ при } h/b \geq 0,03, \quad (6)$$

где b и h — хорда крыла и истинная высота полета соответственно.

Зависимость АК экраноплана от его удаленности от экрана представлена на рис. 3. На рис. 4, а показаны зависимости изменений истинной высоты экраноплана от времени при управляемом и неуправляемом полетах на скорости 36 м/с с разрешенной шириной сектора движения 50°. На рис. 4, б показаны зависимости аэродинамического коэффициента от времени для соответствующих траекторий.

При морском волнении 4–7 баллов, скорости 13–38 м/с, максимальной угловой скорости поворота 5–15 град/с и различии требуемого и наилучшего направлений движения не более чем на 40°

для управляемого полета АК экраноплана в среднем увеличивается на 21 %, длина траектории возрастает на 10 %, высота полета относительно среднего уровня моря снижается на 0,5–2,5 м.

Заключение

Результаты моделирования свидетельствуют о значительном возрастании аэродинамического качества экраноплана при использовании в его автопилоте минимально-градиентного метода управления и подтверждают эффективность обхода гребней волн при интенсивном морском волнении. Отсюда следует вывод о целесообразности создания адаптивной системы управления движением экраноплана над взволнованной морской поверхностью, подстраивающей параметры движения аппарата под текущие погодные условия для улучшения аэродинамического качества аппарата и повышения безопасности полета.

Литература

1. Небылов А. В., Небылов В. А. Проблемы, теория и системы автоматического управления движением экранопланов // XII Всерос. совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. 2014. С. 3391–3400.
2. Tofa M. M., Maimun A., Ahmed Y. M., Jamei S., Priyanto A., and Rahimuddin. Experimental Investigation of a Wing-in-Ground Effect Craft // The Scientific World Journal. 2014. Vol. 2014. Article ID 489308. 7 p. doi:10.1155/2014/489308
3. Yun Liang, Bliault Alan, Doo Johnny. WIG Craft and Ekranoplan: Ground Effect Craft Technology. — Springer, 2010. — 443 p.
4. Pagowski Z. T., Szafran K. “Ground Effect” Inter-Modal Fast Sea Transport // TransNav: The Intern. Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2014. Vol. 8. N 2. P. 317–320.
5. Paęowski Z. T., Szafran K., Kończak J. “Ground Effect” Transport on the Baltic Sea, Maritime Transport & Shipping // TransNav: The Intern. Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2014. Vol. 8. N 2. P. 221–234.
6. Wang H., Teo C. J., Khoo B. C., Goh C. J. Computational Aerodynamics and Flight Stability of Wing-In-Ground (WIG) Craft // 7th Asian-Pacific Conf. on Aerospace Technology and Science. 2013. P. 15–24.
7. Rozhdestvensky K. V. Aerodynamics of a Lifting System in Extreme Ground Effect. — Springer Science & Business Media, 2000. — 352 p.
8. Nebylov A. V. Prospects for Cooperation in New-Generation Alternate High Speed Water-Borne AirTransportation System Development // AeroIndia Intern. Seminar. Bangalore, 2011. P. 1–6.
9. Nebylov A. V., Nebylov V. A. Seaplane Landing Smart Control at Wave Disturbances // 18th IFAC World Congress. Milano, 2011. P. 3021–3026.
10. Боднер В. А. Системы управления летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1973. — 504 с.
11. Бородай И. К., Невцветаев Ю. А. Мореходность судов. — Л.: Судостроение, 1982. — 287 с.
12. Галенин Б. Г. и др. Ветер, волны и морские порты / под ред. Ю. М. Крылова. — Л.: Гидрометеиздат, 1986. — 264 с.
13. Давидан И. Н., Лопатухин Л. И., Рожков В. А. Ветровое волнение в мировом океане. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 256 с.
14. Гургенидзе А. Т., Трапезников Ю. А., Румянцева С. А. и др. Теоретические основы и методы расчета ветрового волнения / под ред. И. Н. Давидана. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 263 с.
15. Nebylov A. V., Nebylov V. A., Pierre Fabre. WIG-craft Flight Control above the Waved Sea // Workshop on Advanced Control and Navigation for Autonomous Aerospace Vehicles (ACNAAV 2015), Seville, Spain, June 10–12, 2015. P. 102–107.
16. Князхский А., Небылов А., Небылов В. Methods for Signal Processing and Motion Control of Ground Effect Vehicle // 4th IEEE Intern. Workshop on Metrology for Aerospace, Padua, Italy, 2017. P. 307–311.
17. Князхский А. Я., Небылов А. В., Небылов В. А. Optimization of WIG-craft 3D-trajectory near the Rough Sea Surface // EUCASS (European Conf. for Aerospace Sciences), Milan, Italy, 2017. <https://www.eucass.eu/doi/EUCASS2017-338.pdf> (дата обращения: 10.10.2017).

UDC 629.7.05

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.24

Improving GEV Aerodynamic Quality by Enveloping Sea Waves

Knyazhsky A. Yu.^a, Assistant Professor, knjagskij@mail.ruNebylov A. V.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, nebylov@aanet.ruNebylov V. A.^a, PhD, Tech., Senior Researcher, vladnebylov@gmail.com^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: One of the main problems hindering the wide introduction of Ground Effect Vehicles to the world market is their high sensitivity to sea waves. This prevents the implementation of safe and cost-effective freight and passenger transport over long distances above the water surface. **Purpose:** Developing a method for enveloping the sea waves by a vehicle, and assessing its effectiveness. **Methods:** Mathematical modeling based on a predetermined probability of a collision between a GEV and the sea surface; simulation to determine the permissible reference flight altitude above the sea for a controlled GEV. **Results:** A method for enveloping the crests of sea waves is proposed which can increase the aerodynamic quality of a GEV and reduce the probability of its collision with a wave when the sea is disturbed. The essence of the method is laying a vehicle trajectory along the sea wave chutes by moving in the direction of the minimum gradient of the underlying surface in a certain sector whose direction coincides with the direction to the final point of the route. **Practical relevance:** The proposed method allows you to improve the flight safety and aerodynamic quality of a GEV and, hence, to reduce its fuel consumption.

Keywords — Ground Effect Vehicle, Sea Waves, Motion Control, Transport, Altitude Minimization, Flight Safety, Trajectory Optimization, Fuel Efficiency.

References

1. Nebylov A. V., Nebylov V. A. Problems, Theory and Systems of Automatic Control of Movement of Ekranoplans. *XII Vserossiiskoe soveshchaniye po problemam upravleniya VSPU-2014* [XII All-Russian Meeting on the Management Problems of the VSPU-2014], 2014, pp. 3391–3400 (In Russian).
2. Tofa M. M., Maimun A., Ahmed Y. M., Jamei S., Priyanto A., Rahimuddin. Experimental Investigation of a Wing-in-Ground Effect Craft. *The Scientific World Journal*, 2014, vol. 2014, Article ID 489308, 7 p. doi:10.1155/2014/489308
3. Liang Yun, Alan Bliault, Johnny Doo. *WIG Craft and Ekranoplan: Ground Effect Craft Technology*. Springer, 2010. 443 p.
4. Pagowski Z. T., Szafran K. “Ground effect” Inter-Modal Fast Sea Transport. *TransNav. The Intern. Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 317–320.
5. Pagowski Z. T., Szafran K., Kończak J. “Ground effect” Transport on the Baltic Sea, Maritime Transport & Shipping. *The Intern. Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 221–234.
6. Wang H., Teo C. J., Khoo B. C., Goh C. J. Computational Aerodynamics and Flight Stability of Wing-InGround (WIG) Craft. *7th Asian-Pacific Conf. on Aerospace Technology and Science*, 2013, pp. 15–24.
7. Rozhdestvensky K. V. *Aerodynamics of a Lifting System in Extreme Ground Effect*. Springer Science & Business Media, 2000. 352 p.
8. Nebylov A. V. Prospects for Cooperation in New-Generation Alternate High Speed Water-Borne Air Transportation System Development. *AeroIndia International Seminar*, Bangalore, 2011, pp. 1–6.
9. Nebylov A. V., Nebylov V. A. Seaplane Landing Smart Control at Wave Disturbances. *18th IFAC World Congress*, Milano, 2011, pp. 3021–3026.
10. Bodner V. A. *Sistemy upravleniya letatel'nymi apparatami* [Control Systems for Aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 504 p. (In Russian).
11. Boroday I. K., Netsvetaev Yu. A. *Morekhnodnost' sudov* [Seaworthiness of Ships]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1982. 287 p. (In Russian).
12. Galenin B. G., et al. *Veter, volny i morskije porty* [Wind, Waves and Seaports]. Ed. Yu. M. Krylov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 264 p. (In Russian).
13. Davydan I. N., Lopatukhin L. I., Rozhkov V. A. *Vetrovoe volnenie v mirovom okeane* [Wind Turbulence in the World Ocean]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 256 p. (In Russian).
14. Gurgendize A. T., Trapeznikov Yu. A., Rumyantseva S. A., et al. *Teoreticheskie osnovy i metody rascheta vetrovogo volneniya* [Theoretical Foundations and Methods for Calculating of Wind Waves]. Ed. I. N. Davydan. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988. 263 p. (In Russian).
15. Nebylov A. V., Nebylov V. A., Pierre Fabre. WIG-craft Flight Control above the Waved Sea. *Workshop on Advanced Control and Navigation for Autonomous Aerospace Vehicles ACNAAV 2015*, Seville, Spain, 2015, pp. 102–107.
16. Knyazhskiy A., Nebylov A., Nebylov V. Methods for Signal Processing and Motion Control of Ground Effect Vehicle. *4th IEEE Intern. Workshop on Metrology for Aerospace*, Padua, Italy, 2017, pp. 307–311.
17. Knyazhskiy A. Y., Nebylov A. V., Nebylov V. A. Optimization of WIG-craft 3D-trajectory near the Rough Sea Surface. *European Conference for AeroSpace Sciences EUCASS*, Milan, Italy, 2017. Available at: <https://www.eucass.eu/doi/EUCASS2017-338.pdf> (accessed 10 October 2017).