

Научная статья
УДК 629.5.031
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-1/56-65>

Упрощённый метод оценки скорости волнового глайдера

Данил Айдарович Альбаев, Кирилл Дмитриевич Овчинников✉

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ ovchinnikov_kd@mail.ru

Аннотация. В работе представлен упрощённый метод для расчёта скорости волнового глайдера. Для описания движения системы «надводный корпус – глайдер» используется метод Кейна, который хорошо известен в области кинематики и динамики манипуляционных роботов. В предложенном алгоритме отсутствуют функции, характерные для классической теории машущего крыла, что сильно упрощает реализацию предложенного метода. Разработанный метод успешно прошёл верификацию и валидацию путём сравнения с экспериментальными данными о движении модели волнового глайдера на встречном регулярном волнении. Дальнейшее развитие этого метода позволит не только прогнозировать достижимые скорости волнового глайдера в реальных ветро-волновых условиях, но и оптимизировать его геометрические параметры.

Ключевые слова: волновой глайдер, машущее крыло, движитель, мореходность

Для цитирования: Альбаев Д.А., Овчинников К.Д. Упрощённый метод оценки скорости волнового глайдера // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 1(62). С. 56–65.

Original article

Simplified method for wave glider speed calculation

Danil A. Albaev, Kirill D. Ovchinnikov✉

State Marine Technical University in St. Petersburg,
St. Petersburg, Russian Federation
✉ ovchinnikov_kd@mail.ru

Abstract. This paper presents a simplified method for calculating the speed of a wave glider. To describe the motion of the “surface hull – glider” system the Kane method is used, which is well known in the field of kinematics and dynamics of manipulative robots. The proposed algorithm lacks the classical theory of flapping foils functions, which greatly simplifies the implementation of the proposed method. The developed method has been successfully verified and validated by comparing it with experimental data on the motion of a wave glider model in a regular head wave. Further development of this method will make it possible not only to predict the achievable speeds of a wave glider in real sea conditions, but also to optimize its geometric parameters.

Keywords: wave glider, flapping foil, propulsion, seaworthiness

For citation: Albaev D.A., Ovchinnikov K.D. Simplified method for wave glider speed calculation. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 1(62), pp. 56–65. (In Russ.).

Введение

Волновой глайдер – это двухмодульный надводный безэкипажный аппарат повышенной автономности. Он состоит из двух основных модулей: надводного и подводного. Надводный модуль (или надводный корпус) представляет собой тело судовых обводов, в котором

располагается необходимое оборудование. Подводный модуль (или глайдер) оснащён системой машущих крыльев и обеспечивает движение всего аппарата. Надводный и подводный модули обычно соединены гибкой связью – кабель-тросом.

Повышенная автономность волнового глайдера достигается благодаря использованию на подводном модуле аппарата нетрадиционной пропульсивной установки – системы машущих крыльев. Вследствие морского волнения, приводящего надводный модуль в качку, подводный модуль совершает вертикальные колебания, которые приводят в движение свободно вращающуюся относительно собственных поперечных осей крыльевую систему. Крыльевая система, имеющая ограничители угла поворота, работая как машущее крыло, создаёт полезную тягу. Аппарат, не тратя бортовую электроэнергию для передвижения, многократно увеличивает свою автономность.

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (СПбГМТУ) активно занимается исследованиями волновых глайдеров для нужд отечественной промышленности и науки.

Основой этих работ являются базовые математические модели машущего крыла как источника полезной тяги, разработка которых ведётся с конца 1970-х годов под руководством профессора К.В. Рождественского. Некоторые основные результаты разработок математических методов того времени представлены в пособии [1], а также в работах [2, 3].

Применение машущего крыла в качестве основного элемента волнового глайдера рассматривалось в теоретических исследованиях [4, 5].

Теоретические исследования сопровождалось экспериментальными. Так, в 2012 году была спроектирована и построена модель волнового глайдера для проведения ходовых и манёвренных испытаний в опытовом бассейне СПбГМТУ. Некоторые результаты экспериментальных исследований ходовых качеств представлены в [6], а манёвренных – в [7].

Применение машущих крыльев рассматривалось не только в рамках концепции волнового глайдера, но и как вспомогательного устройства для умерения качки и генерации полезной тяги на транспортных судах классической архитектуры [8, 9].

Зарубежные исследователи также уделяют большое внимание изучению свойств машущего крыла и его применения как на судах традиционной архитектуры, так и на беспилотных аппаратах типа волновой глайдер [10].

Одни из наиболее важных этапов исследования свойств машущего крыла были выполнены в конце XX века, когда экспериментально были определены параметры крыла, имеющего удивительно большое значение эффективности при использовании в качестве движителя [11].

Наиболее интересными работами, связанными непосредственно с проектированием волновых глайдеров, являются [12, 13, 14], где представлены разработки сложных математических моделей, учитывающих множество нелинейных параметров реального объекта, а также пути идентификации параметров предложенных математических моделей.

Дополнительно следует сказать о внедрении в практику уточнения параметров машущих крыльев, в том числе волновых глайдеров, современных методов вычислительной гидродинамики [15, 16].

Несмотря на большую историю исследования волновых глайдеров в ФГБОУ ВО СПбГМТУ, вопрос определения их оптимальных характеристик в условиях реальных ветро-волновых условий остаётся до сих пор нерешённым. Использование полных математических моделей приводит как к сложности постановки задачи, так и снижению скорости выполнения расчётов, в связи с чем до сих пор остаётся актуальной разработка упрощённых математических моделей для быстрого и успешного выполнения большого количества итерационных расчётов с целью нахождения оптимального решения. Именно разработке упрощённой математической модели определения скорости волнового глайдера и посвящена настоящая работа.

Основой представленной в работе математической модели стала статья [17], которая, в свою очередь, была пересмотрена и существенно дополнена для лучшего соответствия реальным объектам.

Описание математической модели

Для упрощённого анализа определения скорости вертикальная качка надводного модуля полагается синусоидальной и неразделимой от набегающих волн. Волны описываются следующим уравнением:

$$y(x, t) = \frac{H}{2} \sin(kx - \omega t + \delta), \quad (1)$$

где H – высота волны;
 ω – частота волнения;
 $k = \frac{\omega^2}{g}$ – волновое число;
 δ – начальная фаза.

Для разработки математической модели вводится ряд допущений:

1. Рассматривается двумерная постановка задачи с двумя степенями свободы (поступательное движение вдоль оси OX и OY).
2. Вес глайдера полагается много больше сил плавучести. Это гарантирует, что кабель-трос, соединяющий глайдер и надводный модуль, всегда будет натянут.
3. Два конца кабель-троса прикреплены к центрам тяжести надводного корпуса и глайдера. Данное предположение исключает из расчётов килевую качку глайдера.
4. Надводный модуль спроектирован таким образом, чтобы иметь достаточную плавучесть, чтобы его вертикальная качка совпадала с движением волн.

Движения системы «надводный модуль – глайдер» полностью определяется синусоидальным движением волн. Процессы погружения и всплытия полностью симметричны. Разница заключается лишь в положении крыльев из-за разного направления гидродинамических сил. Во время переходного процесса вклад крыльев полагается равным нулю, так как происходит процесс перекладки крыла.

Для описания поведения системы используется хорошо известный метод для описания кинематики и динамики манипуляционных роботов – метод Кейна [18]. Метод Кейна заключается в задании таких систем координат, при которых однозначно определяется взаимное расположение объектов системы.

Так как задача состоит в нахождении скорости надводного модуля u_{fx} , она выбрана как обобщённая скорость $\dot{\pi}_1$. Скорость глайдера относительно надводного модуля $l\dot{\theta}$ (здесь l – длина троса; $\dot{\theta}$ – угловая скорость) определена как вторая обобщённая скорость $\dot{\pi}_2$.

В абсолютной системе координат скорости надводного модуля \mathbf{u}_f и глайдера \mathbf{u}_g могут быть представлены как:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_f = u_{fx}\mathbf{i} + u_{fy}(-\mathbf{j}), \\ \mathbf{u}_g = \mathbf{u}_f + \mathbf{u}_l = u_{fx}\mathbf{i} + u_{fy}(-\mathbf{j}) + l\dot{\theta} \cos \theta \mathbf{i} + l\dot{\theta} \sin \theta (-\mathbf{j}). \end{cases} \quad (2)$$

Здесь \mathbf{i} и \mathbf{j} единичные вектора, связанные с осью OX и OY соответственно. Ускорения могут быть получены дифференцированием системы (2). Частные производные скоростей надводного модуля и глайдера по обобщённым скоростям определяются как:

$$\begin{cases} \mathbf{u}'_{f,\dot{\pi}_1} = \frac{\partial \mathbf{u}_f}{\partial \dot{\pi}_1} = \mathbf{i}, \\ \mathbf{u}'_{f,\dot{\pi}_2} = \frac{\partial \mathbf{u}_f}{\partial \dot{\pi}_2} = \mathbf{0}, \\ \mathbf{u}'_{g,\dot{\pi}_1} = \frac{\partial \mathbf{u}_g}{\partial \dot{\pi}_1} = \mathbf{i}, \\ \mathbf{u}'_{g,\dot{\pi}_2} = \frac{\partial \mathbf{u}_g}{\partial \dot{\pi}_2} = \cos \theta \mathbf{i} + \sin \theta (-\mathbf{j}). \end{cases} \quad (3)$$

На глайдер действуют сила тяжести (\mathbf{G}_g) и гидродинамическая сила на крыльевой системе (\mathbf{F}_g). На надводный модуль действуют силы от волнения в вертикальном направлении

(F_{fw}) и силы сопротивления (F_{fx}), действующие вдоль оси направления движения. Общие комментарии к постановке задачи представлены на рис. 1.

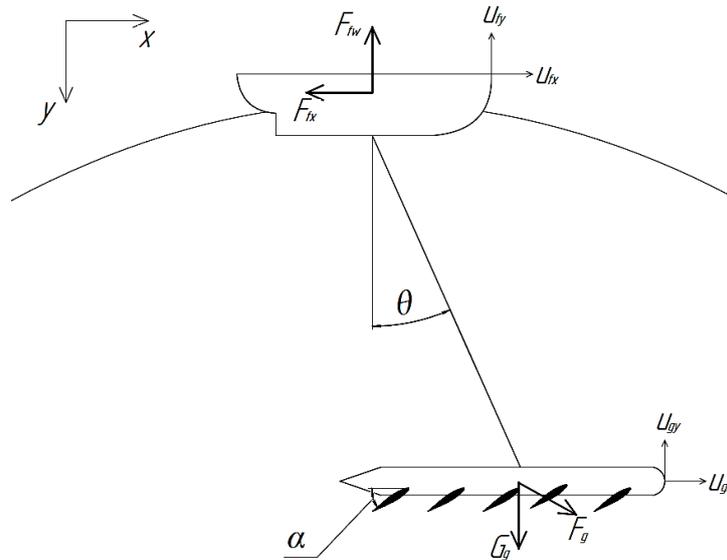


Рис. 1. Схема волнового глайдера

Fig. 1. Wave glider scheme

Силу тяжести глайдера можно представить в виде:

$$\mathbf{G}_g = (m_g g - \rho g V_g) \mathbf{j}, \tag{4}$$

где m_g – масса глайдера;
 V_g – объём глайдера.

Гидродинамическую силу на глайдере можно представить в виде:

$$\mathbf{F}_g = F_L \mathbf{i} + F_D \mathbf{j}. \tag{5}$$

Здесь F_L и F_D – компоненты силы в горизонтальном и вертикальном направлении соответственно, определяемые следующим образом:

$$\begin{cases} F^* = \frac{1}{2} \rho S_g (\sqrt{u_{gx}^2 + u_{gy}^2})^2, \\ F_L = F^* (C_L(\beta) \sin \gamma - C_D(\beta) \cos \gamma), \\ F_D = F^* (C_L(\beta) \cos \gamma - C_D(\beta) \sin \gamma), \end{cases} \tag{6}$$

где $\sqrt{u_{gx}^2 + u_{gy}^2}$ – модуль полной скорости глайдера;
 u_{gx} и u_{gy} – поступательная горизонтальная и вертикальная скорости глайдера;
 S_g – площадь всех крыльев;
 $C_L(\beta)$ и $C_D(\beta)$ – коэффициенты подъёмной силы и силы сопротивления;
 β – угол атаки;
 γ – угол между проекцией полной скорости и осью OX.

Во время движения угол γ постоянно меняется и может быть определён как:

$$\gamma = \text{atan} \left(\frac{u_{gy}}{u_{gx}} \right). \tag{7}$$

Угол β , в свою очередь, определяется как:

$$\beta = \pm \gamma - \alpha. \tag{8}$$

Здесь α – критический угол перекладки крыла. Изменение знака γ связано с процессами погружения и всплытия. Подробное представление углов показано на рис. 2. V_0 на рис. 2 представляет суммарную скорость набегающего потока на крыло.

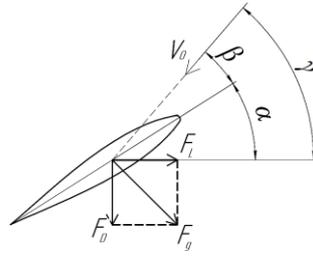


Рис. 2. Определение углов крыла (процесс всплытия)

Fig. 2. Foil angles determination (floatation process)

Стоит отметить, что угол атаки β может иметь диапазон от -180 до 180 градусов. Во время перехода всплытие/погружение и наоборот F^* полагается равной 0 .

Сопrotивление надводного корпуса представляется как суммарное сопротивление прямолинейному движению волнового глайдера, включающее сопротивление непосредственно надводного корпуса, сопротивление троса и сопротивление корпуса глайдера (который является опорой для крепления крыльев). В суммарном сопротивлении отсутствуют только крылья, учёт которых производится в других составляющих. Тогда сопротивление надводного корпуса вычисляется по следующей формуле:

$$F_{fx} = \left(\frac{1}{2} \rho C_S u_{fx}^2 + \frac{1}{2} C_d (2\pi r) l u_{fx}^2 + \frac{1}{2} \rho C_f S_{hg} u_{fx}^2 \right) (-i), \tag{9}$$

где S_f – площадь смоченной поверхности надводного модуля;
 C – коэффициент сопротивления надводного модуля на тихой воде;
 C_d – коэффициент сопротивления троса;
 r – радиус сечения троса;
 C_f – коэффициент сопротивления корпуса глайдера;
 S_{hg} – площадь смоченной поверхности глайдера.

Сила, действующая от набегающего волнения, определяется как:

$$F_{fw} = (F_g \cdot j)j + m_f \dot{u}_{fy} + m_g \dot{u}_{gy}, \tag{10}$$

где m_f – масса надводного модуля.

Обобщённые силы в соответствии с обобщёнными скоростями, действующие на систему, выражаются как:

$$\begin{cases} F_{\dot{\pi}_1} = (F_{fx} + F_{fw}) \cdot u'_{f,\dot{\pi}_1} + (G_g + F_g) \cdot u'_{g,\dot{\pi}_1}, \\ F_{\dot{\pi}_2} = (F_{fx} + F_{fw}) \cdot u'_{f,\dot{\pi}_2} + (G_g + F_g) \cdot u'_{g,\dot{\pi}_2}, \end{cases} \tag{11}$$

а обобщённые силы инерции:

$$\begin{cases} F_{\dot{\pi}_1}^* = -(m_f \dot{u}_f \cdot u'_{f,\dot{\pi}_1} + m_g \dot{u}_g \cdot u'_{g,\dot{\pi}_1}), \\ F_{\dot{\pi}_2}^* = -(m_f \dot{u}_f \cdot u'_{f,\dot{\pi}_2} + m_g \dot{u}_g \cdot u'_{f,\dot{\pi}_1}). \end{cases} \tag{12}$$

Согласно уравнению Кейна [18]:

$$F_v + F_v^* = 0, \tag{13}$$

где F_v и F_v^* – обобщённые силы, отнесённые к обобщённым скоростям.

Складывая соответствующие выражения из системы (11) и (12), получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = \frac{-1}{m_g l (m_f + m_g \sin^2 \theta)} [m_g \cos \theta (F_L - F_{fx} + m_g l \dot{\theta}^2 \sin \theta) - \\ - (m_f + m_g) (F_L \cos \theta - (m_g g - \rho g V_g \pm F_D) \sin \theta - m_g \dot{u}_{fy} \sin \theta)], \\ \dot{u}_{fx} = \frac{1}{m_f + m_g \sin^2 \theta} [F_L \sin^2 \theta + (m_g g - \rho g V_g \pm F_D) \sin \theta \cos \theta + \\ + m_g (\dot{u}_{fy} \sin \theta \cos \theta + l \dot{\theta}^2 \sin \theta) - F_{fx}]. \end{cases} \tag{14}$$

Данная система уравнений является результатом разработки математической модели. Она может быть решена любым численным способом, например, методом Рунге – Кутты четвёртого порядка.

Верификация математической модели

Представленная математическая модель позволяет рассчитывать кинематику движения волнового глайдера при различных периодах и высотах волн. Для первичного представления о возможностях выполнения расчётов были введены данные условного волнового глайдера.

На рис. 3 и 4 представлены этапы выполнения вычислений гидродинамических характеристик волнового глайдера – угла поворота кабель-троса и угла набегания потока на крылья. Результатом вычислений являются скорости надводного модуля волнового глайдера, представленные на рис. 5 для различных значений периода волнения.

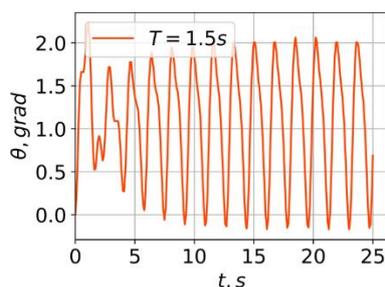


Рис. 3. Изменения угла поворота кабель-троса
 Fig. 3. Changes in the angle of rotation of the cable-rope

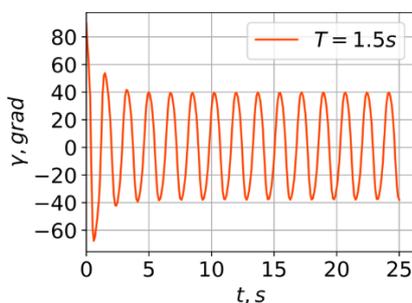


Рис. 4. Изменение угла набегания потока на крылья
 Fig. 4. Changing the angle of flow on the wings

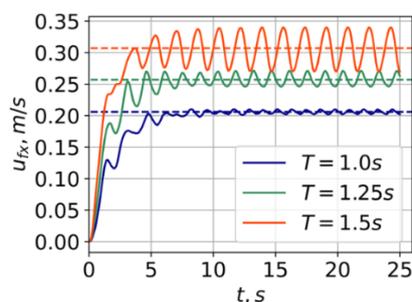


Рис. 5. Скорость движения глайдера при различных периодах волнения
 Fig. 5. Wave glider speed for different wave periods

Валидация математической модели

Для выполнения валидации математической модели используются результаты экспериментального исследования модели волнового глайдера. Фотография модели волнового глайдера представлена на рис. 6, а характеристики модели – в табл. 1. В табл. 1 дополнительно

показаны некоторые характеристики, значения которых необходимы при выполнении расчётов по разработанной математической модели.



Рис. 6. Модель волнового глайдера

Fig. 6. Wave glider model

Таблица 1 / Table 1

Характеристики модели волнового глайдера
Wave glider model parameters

Параметр	Значение
Длина x Ширина x Высота надводного модуля, м	1,015 x 0,224 x 0,078
Масса надводного модуля m_f , кг	4,6
Площадь смоченной поверхности надводного модуля S_f , м ²	0,225
Длина x Ширина x Высота глайдера (без учёта стабилизатора), м	0,770 x 0,532 x 0,080
Количество пар крыльев на подводном модуле	6
Площадь крыльев, суммарно, S_g , м ²	0,185
Угол перекладки крыльев α	$\pi/9$ или 20°
Масса глайдера m_g , кг	5,4
Плавучесть глайдера $\rho g V_g$, Н	19,62
Площадь смоченной поверхности глайдера S_{hg} , м ²	0,12
Длина кабель-троса l , м	1,0
Радиус сечения троса r , м	0,002

Экспериментальные исследования проводились в опытном бассейне кафедры «Теория корабля» ФГБОУ ВО СПбГМТУ, который имеет длину 35,7 м, ширину 5,5 м и глубину 2,1 м.

В опытном бассейне установлен волнопродуктор плунжерного типа, позволяющий создавать двухмерное регулярное волнение длиной от 1,0 до 5,0 м.

В процессе испытаний модель волнового глайдера исследовалась в режиме свободного плавания на встречном волнении. Задаваясь волнением различной интенсивности (длина, высота и крутизна), определялась скорость движения модели.

Для замыкания уравнений математической модели были приняты следующие значения гидродинамических характеристик рассматриваемой модели волнового глайдера:

- коэффициент сопротивления надводного модуля $C = 0,025$,
- коэффициент сопротивления корпуса глайдера $C_f = 0,025$,
- коэффициент сопротивления троса $C_d = 0,4$,
- коэффициенты сил, создаваемых на крыльях, принимались в соответствии с [19].

Сравнение экспериментальных данных и результатов численного расчёта показано на рис. 7. При выполнении расчётов использовались различные значения крутизны волнения, так как в процессе экспериментального исследования при создании волнения наблюдался некоторый разброс параметров создаваемого двухмерного регулярного волнения.

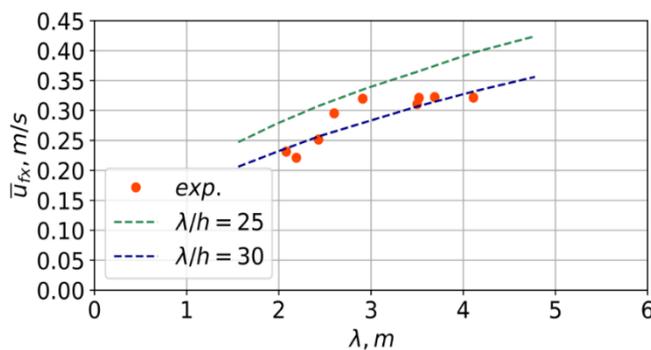


Рис. 7. Сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными

Fig. 7. Mathematical model calculations and experimental data comparison

Согласно данным, представленным на рис. 7, математическая модель адекватно предсказывает скоростные характеристики волнового глайдера на встречном двухмерном регулярном волнении.

Обсуждение результатов

Представленная математическая модель успешно прошла верификацию и валидацию. В отличие от большинства математических моделей, в основе которых лежит теория машущего крыла, в настоящей работе элементы этой теории не рассматриваются. Де-факто математическая модель представляет волновой глайдер в виде планера, поскольку наибольшее время активной фазы создания тяги соответствует режиму максимальной перекладки крыльев глайдера.

Валидация была выполнена с использованием экспериментальных данных, полученных для модели волнового глайдера в опытовом бассейне исключительно на встречном двухмерном регулярном волнении.

Дальнейшее развитие предложенной математической модели должно содержать функции, учитывающие курсовой угол к волнению, а также возможность выполнения расчётов на нерегулярном волнении. В результате такого развития возможно создание математической модели для адекватного описания движения волнового глайдера в реальных ветро-волновых условиях. Это позволит выполнять выбор оптимальных геометрических характеристик элементов волнового глайдера, таких как, например, профиль, площадь и критический угол перекладки отклонения крыльев глайдера и длину троса, обеспечивающих наибольшую скорость хода в ожидаемых ветро-волновых условиях.

Заключение

Разработанная в настоящей работе упрощённая математическая модель позволяет выполнять расчёты ходовых качеств волнового глайдера. Математическая модель успешно прошла верификацию и валидацию путём сравнения с экспериментальными данными модели волнового глайдера на встречном двухмерном регулярном волнении. Дальнейшее развитие математической модели в части выполнения расчётов на трёхмерном нерегулярном волнении позволит выполнять оптимизацию геометрических характеристик при проектировании волновых глайдеров.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Д.А. Альбаев – составление расчётной системы уравнений и описание математической модели, выполнение расчётов, сравнение результатов расчётов и экспериментальных данных; К.Д. Овчинников – обзор литературы, проведение экспериментальных исследований, общая редакция статьи.

D.A. Albaev – compilation of a computational system of equations and description of a mathematical model, performing calculations, comparison of calculation results and experimental data; K.D. Ovchinnikov – literature review, experimental research, general editorial of the article.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рождественский К.В., Рыжов В.А. Математические модели в теории машущего крыла. Л.: Изд. ЛКИ, 1985.
2. Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A. Aerohydrodynamics of flapping-wing propulsors // *Progress in Aerospace Sciences*. 2003. № 39(8). P. 585–633. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0376-0421\(03\)00077-0](https://doi.org/10.1016/s0376-0421(03)00077-0)
3. Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A. Flapping-wing propulsion / *McGraw-Hill yearbook of science and technology*. 2005. P. 112–115.
4. Рождественский К.В. Оценка тяги и скорости волнового глайдера на основе упрощённой математической модели // *Морской вестник*. 2016. № 3(59). С. 95–98.
5. Rozhdestvensky K.V. Study of underwater and wave gliders on the basis of simplified mathematical models // *Appl. Sci*. 2022. № 12. P. 3465. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12073465>
6. Овчинников К.Д., Потехин Ю.П., Рыжов В.А. Экспериментальное исследование характеристик модели волнового глайдера // *Морской вестник*. 2020. № 4(76). С. 33–35.
7. Овчинников К.Д., Синишин А.А., Белая А.Б., Рыжов В.А. Исследование влияния параметров рулевой системы на характеристики управляемости волнового глайдера. 2022. № 3, часть 1. С. 46–51. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.005>
8. Rozhdestvensky K.V., Htet Z.M. A mathematical model of a ship with wings propelled by waves // *Journal of Marine Science and Application*. 2021. № 20. P. 595–620. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11804-021-00221-2>
9. Рождественский К.В., Хтет З.М. К оценке индекса проектной энергетической эффективности (EEDI) судна с энергосберегающими крыльевыми устройствами // *Морские интеллектуальные технологии*. 2021. Т. 3, № 2. С. 58–68. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.035>
10. Wu X., Zhang X., Tian X., Li X., Lu W. A review on fluid dynamics of flapping foils // *Ocean Engineering*. 2020. № 195. P. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106712>
11. Anderson J.M., Streitlien K., Barrett D.S., Triantafyllou M.S. Oscillating foils of high propulsive efficiency // *Journal of Fluid Mechanics*. 1998. Vol. 360. P. 41–72. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112097008392>
12. Wang P., Tian X., Lu W., Hu Z., Luo Y. Dynamic modeling and simulations of the wave glider // *Applied Mathematical Modelling*. 2019. № 66. P. 96–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.08.027>
13. Wang L., Li Y., Liao Y., Pan K., Zhang W. Dynamics modeling of an unmanned wave glider with flexible umbilical // *Ocean Engineering*. 2019. № 180. P. 267–278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.047>
14. Sun X., Sun C., Sang H., Li C. Dynamics modeling and hydrodynamic coefficients identification of the wave glider // *J. Mar. Sci. Eng*. 2022. № 10. P. 520. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10040520>
15. Ahmed A.M.E. Resistance evaluation for the submerged glider system using CFD modelling // *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. 2023. № 29. Iss. 3. P. 147–159. DOI: <https://doi.org/10.37934/arasent.29.3.147159>
16. Feng Z., Chang Z., Deng C., Zhao L., Chen J., Zhang J., Zheng Z. Effects of nonlinearity of restoring springs on propulsion performance of wave glider // *Nonlinear Dyn*. 2022. № 108. P. 2007–2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11071-022-07295-9>
17. Zhou C., Wang B., Zhou H., Li J., Xiong R. Dynamic modeling of a wave glider // *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*. 2017. № 18(9). P. 1295–1304. DOI: <https://doi.org/10.1631/fitee.1700294>
18. Kane T.R., Wang C.F. On the derivation of equations of motion // *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1965. Vol. 13. № 2. P. 487–492.
19. Sheldahl R.E., Klimas P.C. Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines // *Technical Report*. 1981. 120 p. DOI: <https://doi.org/10.2172/6548367>.

REFERENCES

1. Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A. *Mathematical methods in flapping foil theory*. Leningrad: Leningrad Shipbuilding Institute, 1985. (In Russ.).

2. Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A. Aerohydrodynamics of flapping-wing propulsors. *Progress in Aerospace Sciences*, 2003, no. 39(8), pp. 585–633. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0376-0421\(03\)00077-0](https://doi.org/10.1016/s0376-0421(03)00077-0).
3. Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A. Flapping-wing propulsion / McGraw-Hill yearbook of science and technology. 2005. P. 112–115.
4. Rozhdestvensky K.V. Estimation of the thrust and speed of a wave glider based on a simplified mathematical model. *Marine Bulletin*, 2016, no. 3(59), pp. 95–98. (In Russ.).
5. Rozhdestvensky K.V. Study of underwater and wave gliders on the basis of simplified mathematical models. *Appl. Sci.*, 2022, no. 12, p. 3465. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12073465>
6. Ovchinnikov K.D., Potekhin Yu.P., Ryzhov V.A. Experimental study of wave glider parameters. *Morskoy Vestnik*, 2020, no. 4(76), pp. 33–35. (In Russ.).
7. Ovchinnikov K.D., Sinishin A.A., Belaya A.B., Ryzhov V.A. Research of rudder system parameters influence to wave glider maneuverability. *Marine intellectual technologies*, 2022, no. 3, part 1, pp. 46–51. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.005>
8. Rozhdestvensky K.V., Htet Z.M. A mathematical model of a ship with wings propelled by waves. *Journal of Marine Science and Application*, 2021, no. 20, pp. 595–620. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11804-021-00221-2>
9. Rozhdestvensky K.V., Htet Z.M. To estimation of the energy efficiency design index (EEDI) for a ship with energy saving wing devices. *Marine Intellectual Technologies*, 2021, no. 2, part 3, pp. 58–68. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.035>
10. Wu X., Zhang X., Tian X., Li X., Lu W. A review on fluid dynamics of flapping foils. *Ocean Engineering*, 2020, no. 195, pp. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106712>
11. Anderson J.M., Streitlien K., Barrett D.S., Triantafyllou M.S. Oscillating foils of high propulsive efficiency. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, vol. 360, pp. 41–72. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112097008392>
12. Wang P., Tian X., Lu W., Hu Z., Luo Y. Dynamic modeling and simulations of the wave glider. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, no. 66, pp. 96–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.08.027>
13. Wang L., Li Y., Liao Y., Pan K., Zhang W. Dynamics modeling of an unmanned wave glider with flexible umbilical. *Ocean Engineering*, 2019, no. 180, pp. 267–278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.047>
14. Sun X., Sun C., Sang H., Li C. Dynamics modeling and hydrodynamic coefficients identification of the wave glider. *J. Mar. Sci. Eng.*, 2022, no. 10, p. 520. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10040520>
15. Ahmed A.M.E. Resistance evaluation for the submerged glider system using CFD modelling. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 2023, no. 29, iss. 3, pp. 147–159. DOI: <https://doi.org/10.37934/araset.29.3.147159>
16. Feng Z., Chang Z., Deng C., Zhao L., Chen J., Zhang J., Zheng Z. Effects of nonlinearity of restoring springs on propulsion performance of wave glider. *Nonlinear Dyn*, 2022, no. 108, pp. 2007–2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11071-022-07295-9>
17. Zhou C., Wang B., Zhou H., Li J., Xiong R. Dynamic modeling of a wave glider. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2017, no. 18(9), pp. 1295–1304.
18. Kane T.R., Wang C.F. On the derivation of equations of motion. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1965, vol. 13, no. 2, pp. 487–492.
19. Sheldahl R.E., Klimas P.C. Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines. *Technical Report*, 1981. 120 p. DOI: <https://doi.org/10.2172/6548367>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Альбаев Данил Айдарович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория корабля», Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

✉ albaevdani@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5175-6594>

Danil A. Albaev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor in Ship Theory Department, State Marine Technical University in St. Petersburg (St. Petersburg, Russian Federation).

Овчинников Кирилл Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Проектирование судов», Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

✉ ovchinnikov_kd@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-8753-6243>

Kirill D. Ovchinnikov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor in Ship Design Department, State Marine Technical University in St. Petersburg (St. Petersburg, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 10.02.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 08.03.2025.

Принята к публикации / Accepted: 18.03.2025.