

№1, январь 2015

ISSN 1999-9429



Южный
федеральный
университет

И З В Е С Т И Я

- *Беспилотные авиационные системы*
- *Морская робототехника*
- *Наземная робототехника*
- *Системы технического зрения
и бортовые вычислители*
- *Системы и пункты управления*

Тематический выпуск
Перспективные системы
и задачи управления

ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

24. *Teichteil-Konigsbuch F., Fabiani P.* A multi-thread decisional architecture for real-time planning under uncertainty. In: Proceedings of the 3rd international workshop on planning and execution for real-world domains, international conference on automated planning and scheduling (ICAPS), Rhode Island. 2007.
25. *Rajan K., Bernard D., Dorais G., Gamble E., Kanefsky B., Kurien J., Millar W., Muscettola N., Nayak P., Rouquette N., Smith B., Taylor W., Tung Y.* Remote agent: an autonomous control system for the new millennium. In: Proceedings of prestigious applications of intelligent systems, European conference on artificial intelligence (ECAI), Berlin, 2000.
26. *Ai-Chang M., Bresina J., Charest L., Chase A., Hsu J., Jonsson A., Kanefsky B., Morris P., Rajan K., Yglesias J., Chafin B., Dias W., Maldague P.* MAPGEN: mixed initiative planning and scheduling for the Mars'03 MER mission, *IEEE Intell Syst.*, 2004, No. 19 (1), pp. 8-12.
27. *Bresina J., Jonsson A., Morris P., Rajan K.* Activity planning for the mars exploration rovers. In: International conference on automated planning and scheduling (ICAPS), Monterey, California, 2005.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.С. Малышкин.

Мартынова Любовь Александровна – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: martynowa999@bk.ru; 190068, Санкт-Петербург, пр. Римского-Корсакова, 49, кв. 1; тел.: 79219411395; с.н.с.; в.н.с.

Машошин Андрей Иванович – e-mail: aimashoshin@mail.ru; 197046, Санкт-Петербург, Малая Посадская ул., 30; тел.: +79217632345; начальник НИЦ; профессор.

Пашкевич Иван Владимирович – e-mail: iv@bk.ru; 197373 Санкт-Петербург, пр-т Авиа-конструкторов, 32 кв. 168; тел.: +79119330006; главный специалист.

Соколов Анатолий Игоревич – e-mail: aisokolov@eprib.ru; Санкт-Петербург, г. Ломоносов, Дворцовый пр., 33, кв. 11; тел.: 89052709693; начальник НТЦ – главный конструктор по навигации.

Martynova Liubov Alexandrovna – JSC CSRI Elektroprigor; e-mail: martynowa999@bk.ru; 190068, Saint-Petersburg, pr. Rimskogo-Korsakowa, 49, kw. 1; phone: 79219411395; senior researcher; leading researcher.

Mashoshin Andrey Ivanovith – e-mail: aimashoshin@mail.ru; 30, Malaya Posadskaya street, St. Petersburg, 197046, Russia; phone: +79217632345; head of department; professor.

Pashkevich Ivan Vladimirovich – e-mail: iv@bk.ru; 197373, Saint-Petersburg, Aviakonstruktorov, 32, ap.168; phone: +79119330006; chief specialist.

Sokolov Anatolii Igorevich – e-mail: aisokolov@eprib.ru; Saint-Petersburg, Lomonosov, Dwortsowyi pr., 33, kw. 11; phone: +79052709693; head of department – Chief Specialist

УДК 551.46.077:529.584

И.В. Кожемякин, Ю.П. Потехин, К.В. Рождественский, В.А. Рыжов
ВОЛНОВОЙ ГЛАЙДЕР, КАК ЭЛЕМЕНТ МОРСКОЙ ГЛОБАЛЬНОЙ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Представлены некоторые результаты исследований проводимых в СПбГМТУ в области создания автономного необитаемого аппарата – волнового глайдера. Приводится краткий обзор известных разработок морских технических объектов, движущихся за счет использования энергии волн. Обосновывается актуальность создания волнового глайдера, как одного из ключевых элементов морской глобальной информационно-измерительной системы двойного назначения. Рассматривается математическая модель, описывающая поведение волнового глайдера на морском волнении при использовании различных конструктивных решений крыльевого устройства преобразования волновой энергии. Входными

параметрами для моделирования являются: характеристики волны; характеристики надводного модуля волнового глайдера (тела судовых обводов); характеристики кабель-троса, соединяющего надводный и подводный модули; характеристики подводного модуля, включающего несущую конструкцию с системой колеблющихся крыльев. При этом крыльевые элементы могут иметь упругие элементы (связи) по угловым и вертикальным колебаниям. Предлагается численный метод определения гидродинамических характеристик рассматриваемой многокомпонентной динамической системы. Решение задачи рассматривается в рамках линейной нестационарной теории крыла конечного размаха и линейной теории качки. В результате разработана модель позволяет решать практически важные задачи определения гидродинамических характеристик волнового глайдера для следующих конструктивных схем: устройства "активного" типа с "системой автоматического управления" законами вынужденных колебаний крыла; устройства "пассивного" типа с упругими элементами; устройства "пассивного" типа без упругих элементов (с двумя степенями свободы – по угловым и вертикальным колебаниям); устройства с жестко закрепленными на корпусе судна крыльевыми элементами. В работе приводится анализ результатов расчетов, демонстрирующий влияние различных проектных параметров на гидродинамические характеристики волнового глайдера. Даются практические рекомендации по проектированию опытного образца моделируемого морского роботизированного объекта.

Морская глобальная информационно-измерительная система; волновой глайдер; преобразование энергии океана; колеблющееся крыло; моделирование гидродинамических характеристик.

I.V. Kozhemyakin, Yu.P. Potekhin, K.V. Rozhdestvensky, V.A. Ryzhov

WAVE GLIDER AS ELEMENT OF GLOBAL MARINE INFORMATION&MEASUREMENT SYSTEM

Considered in this paper are some results of research conducted at SMTU in the field of creation of a special type of autonomous unmanned vehicle – wave glider. A brief review is presented of some known developments of marine technical objects propelled with use of wave energy. The actuality is justified for the development of the wave glider as a key element of a global marine information & measurement system of dual use. A mathematical model is considered, describing behavior of a wave glider in waves for different design solutions of the wave energy converting devices. The input parameters for the simulation are: characteristics of the wave; wave glider surface modulus characteristics; characteristics of the cable connecting surface and underwater modulus; characteristics of the underwater modulus, comprising a bearing structure with a system of oscillating wings. Wherein the wings may have elastic links in the angular and vertical degree of freedom. Numerical method for the determination of the hydrodynamic characteristics of this multicomponent dynamic system is offered. Solution of the problem is considered in the framework of the linear unsteady wing theory and the linear theory of ship pitching. As a result, the developed model allows to solve important practical problems of determining hydrodynamic characteristics of the wave glider for the following design schemes: "active" type device with automatic control system; "passive" type device with elastic elements; "passive" type device without elastic elements (with angular and vertical degrees of freedom); device with the rigidly fixed wing on the surface modulus. A numerical method is proposed for determination of hydrodynamic characteristics of multi-component dynamic system under consideration. Analysis is presented of some computed results, illustrating influence of various design parameters upon hydrodynamic properties of wave glider. Practical recommendations are given toward design of a prototype of a corresponding marine robotized vehicle.

Global marine information & measurement system; wave glider; ocean energy conversion; oscillating wing; modeling of hydrodynamic characteristics; prototype of a marine robotized vehicle.

Отражены исследования, проводимые в СПбГМТУ, в обеспечение создания глобальной информационно-измерительной системы, использующей в своем составе различные типы морских роботизированных объектов (МРО).

К рассматриваемым МРО отнесены следующие автономные измерительные платформы: подводные глайдеры, буи и зонды переменной плавучести, поверхностные волновые буи, волновые глайдеры, донные коммуникационные станции, узлы подводной стыковки-расстыковки мобильных автономных роботизированных объектов. Перечисленные МРО в совокупности являются универсальными инструментами долговременного мониторинга акватории мирового океана, сбора разнородной информации, ретрансляции ее конечному пользователю, т.е. потенциально эффективными элементами морской информационно-коммуникационной сети. Помимо указанного, МРО могут быть использованы в качестве буферных преобразователей-накопителей энергии океана.

Использование МРО на практике открывает широкие возможности для построения распределенных информационно-измерительных сетей двойного назначения, что говорит об актуальности проводимых исследований по данному направлению.

В настоящей работе внимание уделено одному из перечисленных МРО – волновому глайдеру, практические разработки которого в России находятся на начальной стадии.

Принцип работы волнового глайдера состоит в следующем.

Ввиду того, что интенсивность волнового движения является наибольшей у свободной поверхности и достаточно быстро убывает с увеличением глубины, то этот факт позволяет создать двухкомпонентный аппарат, состоящий из надводного модуля («поплавка») и подводного модуля (системы колеблющихся крыльев, имеющих свободу по вращательным колебаниям), соединенных между собой гибкой или жесткой связью.

Движение волнового глайдера обеспечивается за счет реализации силы тяги, образующейся на колеблющихся крыльях в результате вертикальных колебаний, вызванных волновым движением «поплавка», и свободных вращательных колебаний относительно оси закрепления крыльев на подводном модуле, рис. 1.

При этом главное отличие волнового глайдера от свободно дрейфующих буев состоит в том, что глайдер не дрейфует, а перемещается по заданной программе миссии и независимо от направления движения волн.

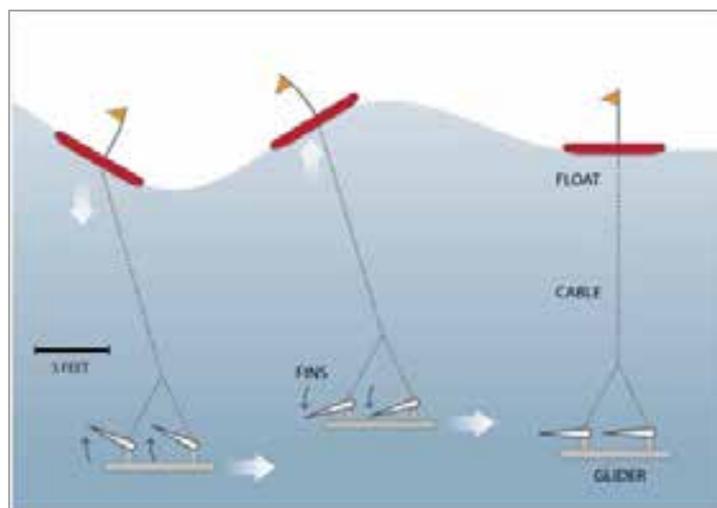


Рис. 1. Принцип действия волнового глайдера

Историческая справка. Идея использования энергии волн для движения морских транспортных объектов, появилась давно и была запатентована в 1858 г. [1]. Первая практическая реализация этой идеи была предложена Х. Линденом [2], который в 1895 г. построил лодку *Autonaut*, движущуюся за счет преобразования энергии волн прикрепленными в носу и корме крыльями-пластинами. Современные проекты морских судов, преобразующих энергию волн для своего движения, стали активно прорабатываться с начала 1980-х гг. [4–9]. При этом все проведенные испытания показали работоспособность крыльевых устройств преобразования морского волнения – возможность их использования как «пассивного» движителя, с одной стороны, и как устройства снижения качки, с другой.

Идея создания роботизированного морского транспортного средства специального назначения, движущегося за счет использования энергии волн - волнового глайдера, была предложена в США в 2005 году. После многочисленных испытаний опытных конструкций в 2008 году компанией *Liquid Robotics Inc. (LRI)* было разработано морское автономное необитаемое транспортное средство *Wave Glider SV2 Series* [10], рис. 2,а. В 2013 г. LRI разработала модификацию волнового глайдера - *SV3 Series* с улучшенными гидродинамическими характеристиками [11], рис. 2,б. Отличительной чертой конструкций этих глайдеров является соединение корпуса надводного модуля с крыльевой системой посредством гибкого кабельтроса. ВГ *SV2* и *SV3* доказали свои возможности на практике, выполнив длительные океанские миссии в штормовых условиях и обеспечивая скорости до 2 узлов.



а



б

Рис. 2. Волновой глайдер *Wave Glider* в модификациях *SV2* (слева) и *SV3* (справа)

В 2014 г. английская компания *MOST AV* предложила свою конструкцию волнового глайдера (названного *AutoNaut*) и провела его испытания, достигнув скорости порядка 3 узлов [12], рис. 3. Конструкция *AutoNaut*, в отличие от глайдеров *SV2* и *SV3 Series* имеет жесткое соединение надводного модуля и крыльевых элементов, преобразующих волновую энергию.

В России практические разработки волновых глайдеров до недавнего времени не проводились. В 2014 г. Самарским государственным техническим университетом (СамГТУ) в сотрудничестве с СПбГМТУ был разработан первый опытный образец отечественного волнового глайдера [13], рис. 4.

Математическая модель. Моделирование движения волнового глайдера (ВГ) является сложной многофакторной гидродинамической задачей.

Входными параметрами задачи являются: характеристики волны; характеристики надводного модуля (НМ) ВГ (тела судовых обводов); характеристики связи (гибкой или жесткой), соединяющей НМ и ПМ; характеристики подводного модуля

ля (ПМ) ВГ, включающего несущую конструкцию с системой колеблющихся крыльев. В общем случае к перечисленным параметрам добавляются характеристики буксируемой полезной нагрузки, связанной кабель-тросом с НМ или ПМ.



Рис. 3. Волновой глайдер AutoNaut



Рис. 4. Подводный модуль волнового глайдера СамГТУ-СПбГМТУ

Указанные компоненты ВГ составляют единую динамическую систему, движущуюся вблизи взволнованной свободной поверхности.

Моделирование гидродинамических характеристик данной системы в общей постановке (в вязкой жидкости) представляет собой сложную вычислительную задачу. Поэтому решение задачи рассмотрено в рамках упрощенной постановки: линейной нестационарной теории крыла конечного размаха и линейной теории качки [14].

Рассматривается задача определения гидродинамических сил на крыле, связанном с НМ ВГ, который идет с постоянной скоростью U_0 под некоторым малым курсовым углом β к фронту волны. Полагается, что крыло конечного размаха является жестким и, в общем случае, может иметь упругие связи по двум степеням свободы (по угловым и вертикальным колебаниям).

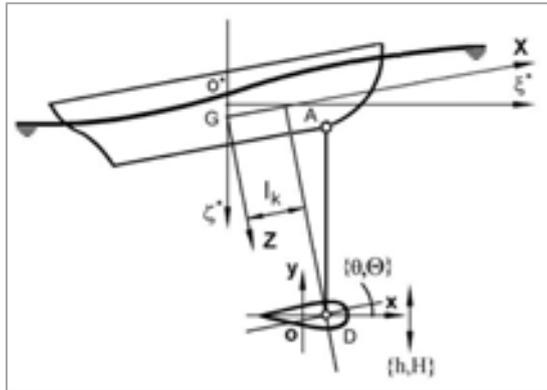


Рис. 5. К постановке задачи о движении ВГ

Конструктивно крыло может быть связано с корпусом НМ ВГ посредством упругого кабель-троса и в точке крепления иметь упруго-шарнирное соединение, обеспечивающее угловые колебания, рис. 5.

Частными случаями конструктивного решения устройства преобразования энергии морского волнения могут являться: крыло, закрепленное на жесткой штанге и имеющее только одну упругую связь по угловым колебаниям, относительно оси, перпендикулярной диаметральной плоскости НМ ВГ или крыло жестко связанное с корпусом НМ.

Волны считаются прогрессивными, плоскими, регулярными, синусоидальными. Под действием синусоидальных волн НМ ВГ совершает установившиеся колебания малой амплитуды и движется как твердое тело с тремя степенями свободы соответствующими двум линейным перемещениям и вращению вокруг горизонтальной поперечной оси, проходящей через центр тяжести НМ ВГ. Считается, что крыло находится на достаточном заглублении под свободной поверхностью и во время качки ни когда не пересекает свободную взволнованную поверхность.

В линейном приближении вертикальная и килевая качка (продольно-горизонтальными колебаниями НМ пренебрегаем) описывается известной системой дифференциальных уравнений [15–16]

$$\begin{aligned} A_{55}\ddot{\psi} + B_{55}\dot{\psi} + C_{55}\psi + A_{53}\ddot{\zeta}_g + B_{53}\dot{\zeta}_g + C_{53}\zeta_g &= P_5 \exp(i\omega t), \\ A_{35}\ddot{\psi} + B_{35}\dot{\psi} + C_{35}\psi + A_{33}\ddot{\zeta}_g + B_{33}\dot{\zeta}_g + C_{33}\zeta_g &= P_3 \exp(i\omega t), \end{aligned} \quad (1)$$

где ζ_g – амплитуда вертикальной качки центра тяжести судна, ψ – угол дифферента при килевой качке, A_{mn} , B_{mn} и C_{mn} – коэффициенты инерционных, демпфирующих и восстанавливающих сил соответственно, P_5, P_3 – комплексные амплитуды возмущающих сил и моментов, ω – приведенная частота качки, равная кажущейся частоте волн. Коэффициенты в уравнениях (1) (при условии, что крыло отсутствует) определяются в приближениях А.Н.Крылова по известным формулам [15].

Для того, чтобы учесть гидродинамическое влияние крыла на качку НМ ВГ необходимо в формулы (1) добавить слагаемые, связанные с вкладом сил и моментов, реализующихся на крыле упруго связанном с НМ ВГ в результате его вызванных нестационарных колебаний. При этом полагается, что частота колебаний крыла и кажущаяся частота волн совпадают.

Через упругие связи крылу, в общем случае, может передаваться возбуждение в виде вертикальных H и вращательных Θ колебаний, обусловленных вертикально-килевой качкой судна. В предельном случае, если связи жесткие,

крыло будет совершать колебания по законам $\{H, \Theta\}$. Если же связи упругие, то в результате взаимодействия крыла с потоком законы $\{h, \theta\}$, характеризующие результирующие вертикальные и вращательные колебания крыла (кинематическую реакцию), будут отличаться от параметров кинематического возбуждения $\{H, \Theta\}$.

Выражения для коэффициентов подъемной силы и продольного момента, возникающих на крыле в результате качки могут быть получены в рамках линейной нестационарной теории несущей поверхности [17].

Ограничиваясь рассмотрением гармонических законов колебаний крыла, его кинематические характеристики (возбуждение и реакцию) могут быть представлены в следующей форме

$$\begin{aligned} H &= H_0 \exp(i\omega t), \\ \Theta &= \Theta_0 \exp(i\omega t), \\ h &= h_0 \exp(i\omega t + \psi_{hw}), \\ \theta &= \theta_0 \exp(i\omega t + \psi_{\theta w}), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\psi_{hw}, \psi_{\theta w}$ – углы сдвига фаз результирующих вертикальных и вращательных колебаний крыла относительно волны.

Тогда в линейном приближении коэффициенты подъемной силы и момента могут быть записаны в виде разложений по выбранным кинематическим параметрам возбуждения $\{H, \Theta, W\}$

$$\begin{aligned} C_Y &= C_Y^H \dot{H} + C_Y^{\dot{H}} \ddot{H} + C_Y^{\Theta} \Theta + C_Y^{\dot{\Theta}} \dot{\Theta} + C_Y^W W + C_Y^{\dot{W}} \dot{W}, \\ m_z &= m_z^H \dot{H} + m_z^{\dot{H}} \ddot{H} + m_z^{\Theta} \Theta + m_z^{\dot{\Theta}} \dot{\Theta} + m_z^W W + m_z^{\dot{W}} \dot{W}, \end{aligned} \quad (5)$$

где W – кинематический параметр, обусловленный набегающей на крыло волной.

Выбрав в качестве обобщенных координат: вертикальное перемещение центра тяжести судна ζ_g , угол дифферента судна ψ и угол поворота крыла θ_k , абсолютные вертикальные и вращательные перемещения точки крыла (относительно системы координат $o\xi^*\zeta^*\eta^*$) определяются выражениями

$$H = -\zeta_g + \psi l_k, \quad \Theta = \theta_k, \quad (6)$$

где l_k – расстояние от центра тяжести НМ ВГ до оси вращения крыла, θ_k – угол колебания крыла (отсчитываемый от неподвижной оси ox).

Подставляя в разложения для коэффициентов подъемной силы и продольного момента крыла (5) выражения для кинематических параметров (6) и их производных, могут быть получены окончательные выражения для C_Y, m_z .

Группируя в формулах для C_Y и m_z коэффициенты, стоящие перед ζ_g и ψ и их производными, и добавляя их к соответствующим коэффициентам уравнений (1), можно записать окончательный вид системы дифференциальных уравнений, описывающих динамическую систему «крыло – НМ ВГ»

$$\begin{aligned} A_{55}^* \ddot{\psi} + B_{55}^* \dot{\psi} + C_{55}^* \psi + A_{53}^* \ddot{\zeta}_g + B_{53}^* \dot{\zeta}_g + C_{53}^* \zeta_g &= P_5^{*c} \cos(\omega t) + P_5^{*s} \sin(\omega t), \\ A_{35}^* \ddot{\psi} + B_{35}^* \dot{\psi} + C_{35}^* \psi + A_{33}^* \ddot{\zeta}_g + B_{33}^* \dot{\zeta}_g + C_{33}^* \zeta_g &= P_3^{*c} \cos(\omega t) + P_3^{*s} \sin(\omega t). \end{aligned} \quad (7)$$

В выражениях (7) присутствуют только вещественные части коэффициентов, которые определяются соотношениями

$$\begin{aligned} A_{55}^* &= A_{55} + C_Y^{\dot{H}} \frac{qbl_k}{U_0^2}, & B_{55}^* &= B_{55} + C_Y^{\dot{H}} \frac{ql_k}{U_0}, & C_{55}^* &= C_{55}, \\ A_{53}^* &= A_{53} - C_Y^{\dot{H}} \frac{qb}{U_0^2}, & B_{53}^* &= B_{53} - C_Y^{\dot{H}} \frac{q}{U_0}, & C_{53}^* &= C_{53}, \\ P_5^{*c} &= P_5^c + q[C_Y^{\Theta} \theta_{0k} \cos(\phi_k) - C_Y^{\dot{\Theta}} k \theta_{0k} \sin(\phi_k)] + \\ &+ C_Y^W \frac{\zeta_A \omega_0}{U_0} \exp(-k_w d) \sin(\Phi) - C_Y^{\dot{W}} \frac{b \zeta_A \omega_0^2}{U_0^2} \exp(-k_w d) \cos(\Phi), \\ P_5^{*s} &= P_5^s - q[C_Y^{\Theta} \theta_{0k} \sin(\phi_k) - C_Y^{\dot{\Theta}} k \theta_{0k} \cos(\phi_k)] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + C_Y^W \frac{\zeta_A \omega_0}{U_0} \exp(-k_w d) \cos(\Phi) + C_Y^W \frac{b \zeta_A \omega_0^2}{U_0^2} \exp(-k_w d) \sin(\Phi)], \\
 A_{35}^* & = A_{35} + C_Y^{\ddot{h}} \frac{q b l_k^2}{U_0^2}, \quad B_{35}^* = B_{35} + C_Y^{\dot{h}} \frac{q l_k^2}{U_0}, \quad C_{35}^* = C_{35}, \\
 A_{33}^* & = A_{33} - C_Y^{\ddot{h}} \frac{q b l_k}{U_0^2}, \quad B_{33}^* = B_{33} C_Y^{\dot{h}} \frac{q l_k}{U_0}, \quad C_{53}^* = C_{53}, \\
 P_3^{*c} & = P_3^c + q l_k [C_Y^{\theta} \theta_{0k} \cos(\phi_k) - C_Y^{\dot{\theta}} k \theta_{0k} \sin(\phi_k)] + \\
 & + C_Y^W \frac{\zeta_A \omega_0}{U_0} \exp(-k_w d) \sin(\Phi) - C_Y^W \frac{b \zeta_A \omega_0^2}{U_0^2} \exp(-k_w d) \cos(\Phi)], \\
 P_3^{*s} & = P_3^s - q l_k [C_Y^{\theta} \theta_{0k} \sin(\phi_k) - C_Y^{\dot{\theta}} k \theta_{0k} \cos(\phi_k)] + \\
 & + C_Y^W \frac{\zeta_A \omega_0}{U_0} \exp(-k_w d) \cos(\Phi) + C_Y^W \frac{b \zeta_A \omega_0^2}{U_0^2} \exp(-k_w d) \sin(\Phi)], \quad (8)
 \end{aligned}$$

где $\Phi = k_w l_k \cos \beta$, $k = \omega b / U_0$ – число Стухаля, $q = \rho U_0^2 S_k / 2$, S_k – площадь крыла.

Коэффициенты гидродинамических сил и моментов, возникающих на крыле конечного размаха с двумя упругими связями вследствие качки НМ ВГ получены в [18]. Ограничиваясь рассмотрением гармонических колебаний в форме (4), уравнения, описывающие процесс колебаний, могут быть записаны в безразмерной форме следующим образом

$$\begin{aligned}
 \frac{\ddot{h}}{k^2} + \left(\frac{\omega_h}{\omega}\right)^2 (h - H) + (x_0 - x_c) \frac{\ddot{\theta}}{k^2} & = \frac{\delta^*}{k^2} C_Y \\
 \frac{\ddot{\theta}}{k^2} + \left(\frac{\omega_\theta}{\omega}\right)^2 (\theta - \Theta) + (x_0 - x_c) \ddot{h} \frac{\beta^{**}}{k^2} & = \frac{\beta^*}{k^2} m_z, \quad (9)
 \end{aligned}$$

где $\omega_h = \sqrt{K_h / m}$, $\omega_\theta = \sqrt{K_\theta / J}$ – круговые частоты собственных отдельных колебаний крыла в вакууме; K_h, K_θ – жесткости упругих связей по вертикальным и вращательным колебаниям; m, J , – соответственно масса и момент инерции крыла относительно оси вращения; $\beta^* = \frac{\rho b_0^3 S_p}{2J} = \frac{\rho b_0^3 l^2}{2J\lambda}$; $\delta^* = \frac{\rho b_0 S_p}{2m} = \frac{\rho b_0 l^2}{2m\lambda}$; $\beta^{**} = \frac{m b_0^2}{J} = \frac{\beta^*}{\delta^*}$.

В результате того, что крыло закреплено упруго, результирующий закон перемещений крыла и соответственно гидродинамические характеристики изменятся. Тогда коэффициенты подъемной силы и момента могут быть записаны в виде разложения по результирующим кинематическим параметрам $\{h, \theta, W\}$

$$\begin{aligned}
 C_Y & = C_Y^{\dot{h}} \dot{h} + C_Y^{\ddot{h}} \ddot{h} + C_Y^\theta \theta + C_Y^{\dot{\theta}} \dot{\theta} + C_Y^W W + C_Y^{\dot{W}} \dot{W}, \\
 m_z & = m_z^{\dot{h}} \dot{h} + m_z^{\ddot{h}} \ddot{h} + m_z^\theta \theta + m_z^{\dot{\theta}} \dot{\theta} + m_z^W W + m_z^{\dot{W}} \dot{W}, \quad (10)
 \end{aligned}$$

Таким образом, для корректного учета влияния упругих связей системы "крыло – НМ ВГ", полученные коэффициенты результирующих гидродинамических силы и момента (10) должны быть подставлены в дифференциальные уравнения вертикально-килевой качки.

Входящие в (10) гидродинамические производные подъемной силы и момента вычисляются с использованием линейной нестационарной теории несущей поверхности [18].

Таким образом, поставленная задача свелась к решению следующих определяющих уравнений: сингулярного интегрального уравнения линейной теории несущей поверхности [18], системы дифференциальных уравнений, характеризующих поведение крыла на упругих связях (9) и системы дифференциальных уравнений вертикально-килевой качки НМ ВГ (7).

При этом указанные уравнения позволяют решать задачу для различных конструктивных схем устоятия извлечения энергии морского волнения:

- ♦ устройства "активного" типа с "системой автоматического управления" законами вынужденных колебаний крыла,

- ◆ устройства "пассивного" типа с упругими элементами,
- ◆ устройства "пассивного" типа без упругих элементов (с двумя степенями свободы – по вращательным и вертикальным колебаниям),
- ◆ устройства с жестко закрепленными на корпусе судна (или штанге) крыльевыми элементами.

Для известного закона колебаний жесткого крыла $\{h, \theta\}$, определяемого значениями безразмерных амплитуд h_0, θ_0 и сдвигами фаз $\psi_{hw}, \psi_{\theta w}$, могут быть определены мгновенные и средние за период колебаний пропульсивные характеристики: подсосывающая сила C_S ; проекция нормальных гидродинамических нагрузок на направление движения C_X ; сила тяги C_T ; мощность, затрачиваемая на поддержание колебаний крыла в жидкости C_P . Выражения для определения средних за период коэффициентов C_S, C_X, C_T, C_P приведены в [18].

Метод решения задачи. Таким образом, решение задачи для динамической системы "крыло-НМ ВГ" осуществлялось по следующему итерационному алгоритму:

- ◆ для заданной скорости движения судна U_0 и характеристик волны определялись параметры качки НМ ВГ ψ, ζ_g (в отсутствии крыла);
- ◆ вычислялись кинематические возбуждения $\{H, \Theta\}$, прикладываемые к крылу;
- ◆ для заданных параметров кинематического возбуждения $\{H, \Theta\}$;
- ◆ рассчитывались гидродинамическая сила и момент, возникающие на крыле упруго связанном с корпусом в результате качки НМ ВГ;
- ◆ определялся "дополнительный" упор T , реализуемый на крыле, при заданной скорости хода НМ ВГ U_0 ;
- ◆ осуществлялся пересчет сопротивления корпуса НМ ВГ (являющегося суммой сопротивления при движении на тихой воде и дополнительного волнового сопротивления), а также сопротивления кабель-троса, с учетом "дополнительного" упора, создаваемого крылом;
- ◆ для полученного уточненного значения сопротивления системы "крыло-НМ ВГ" вычислялась новая достижимая скорость хода U_0^1 ;
- ◆ для новой скорости движения судна U_0^1 определялись параметры качки НМ ВГ ψ, ζ_g с учетом вклада в дифференциальные уравнения сил и моментов, возникающих на крыле;
- ◆ вычислялись новые кинематические возбуждения $\{H, \Theta\}$, прикладываемые к крылу;
- ◆ далее проводился итерационный процесс уточнения "достижимой" скорости НМ ВГ, обусловленный изменением "дополнительного" упора, возникающего на крыле вследствие качки.

Численное решение сингулярного интегрального уравнения теории несущей поверхности осуществлялось методом коллокаций, решение дифференциальных уравнений качки - методом Рунге-Кутты.

В результате решения совместной задачи определялись:

- ◆ пропульсивные характеристики нестационарно движущегося крыла;
- ◆ параметры качки НМ ВГ ψ, ζ_g (в присутствии крыла);
- ◆ изменение скорости хода НМ ВГ (полного сопротивления), вследствие использования крылевой системы извлечения энергии морского волнения.

Анализ результатов расчетов. Ниже приводятся некоторые результаты расчетов ГДХ крылевой системы преобразования энергии морского волнения для ВГ с геометрическими характеристиками, приведенными ниже [19].

Надводный модуль, рис. 6 (слева): длина габаритная – 3,045 м; ширина габаритная – 0,67 м; высота борта – 0,235 м.

Подводный модуль, рис. 6 (справа): длина габаритная – 2,13 м; высота габаритная – 0,21 м; размах крыльев – 1,42 м; число крыльев – 6; удлинение крыла – 8.



Рис. 7. Твёрдые модели компонент ВГ: НМ (слева), ПМ (справа)

При расчетах полагалось, что крыльевая система ПМ ВГ работает как устройство "пассивного" типа без упругих элементов с двумя степенями свободы – по вращательным и вертикальным колебаниям, при этом связь по вертикальным колебаниям принималась жесткой, а вращательные колебания считались свободными: $\omega/\omega_h = 0$, $\omega/\omega_\theta \rightarrow \infty$.

В расчетах проводился анализ влияния различных проектных параметров на ГДХ ВГ, в том числе: расположения точки крепления кабель-троса по длине корпуса НМ, числа крыльевых элементов в ПМ, соотношения суммарной площади крыльев к площади грузовой ватерлинии НМ, длины кабель-троса фиксированного поперечного сечения, и пр.

Расчеты проводились для различных достижимых скоростей движения ВГ на встречном и попутном волнении и при различных характеристиках волны.

В качестве примера приводятся некоторые результаты расчетов для системы из шести прямоугольных в плане крыльев ($n=6$) с удлинением $\lambda = 8$, расположенных по схеме «тандем» с равномерным шагом $1,285 b$ (положение оси вращательных колебаний $\bar{x}_{к0}$ выбрано на расстоянии четверти от передней кромки).

Из выполненных расчетов следует, что чем дальше от миделя расположено крепление кабель-троса, тем для выбранной длины волны больший упор реализуется на системе крыльев в результате качки НМ ВГ. Влияние данного фактора усиливается с увеличением скорости хода ВГ.

В результате моделирования получено, что на встречном волнении максимальная тяга реализуется при скоростях движения в районе 2 узлов на безразмерных длинах волн, лежащих в диапазоне 1,2–1,6, рис. 7.

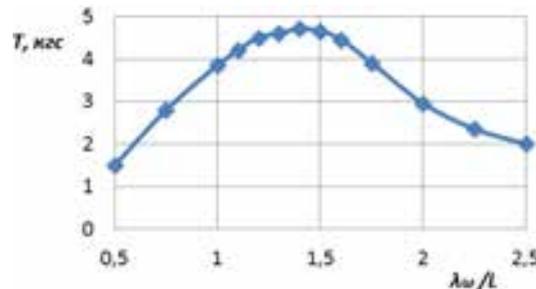


Рис. 7. Резонанс размерной тяги ВГ на встречном волнении ($\beta=180$). Параметры: $v_0 = 2$ узла; $\bar{x}_{тр}=0$; $S_{\Sigma кр} = S_{гвл}$; $\bar{L}_{тр}=46$.

Суммарная площадь крыльевых элементов подводного модуля существенно влияет на достижимую тягу в диапазоне «высоких» скоростей – 1,7–2,5 узлов, рис. 8.

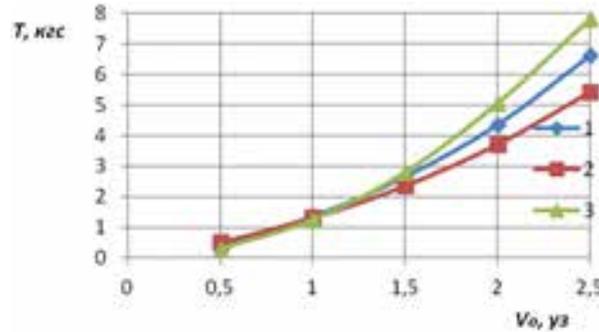


Рис. 8. Влияние суммарной площади крыльевых элементов на размерную тягу ВГ:

$$1 - S_{\Sigma\text{кр}} = S_{\text{гвл}}; 2 - S_{\Sigma\text{кр}} = 0,8S_{\text{гвл}}; 3 - S_{\Sigma\text{кр}} = 1,2S_{\text{гвл}}.$$

$$\text{Параметры } \omega=4,14 (\lambda_w = 3,6); \bar{x}_{\text{тр}} = 0; \bar{L}_{\text{тр}}=46; \beta=180$$

Определенное влияние на тягу ВГ оказывает длина кабель-троса. Из рис. 9 видно, что с ростом относительной длины кабель-троса $\bar{L}_{\text{тр}} = L_{\text{тр}}/d$ (где d – диаметр кабель-троса) достижимая тяга падает. Данное влияние усиливается с ростом скорости движения глайдера. Отсюда следует, что необходимо выбирать минимально допустимую длину, обеспечивая размещение подводного модуля на таком расстоянии от взволнованной поверхности, на котором среда соответствует «невозмущенному» потоку.

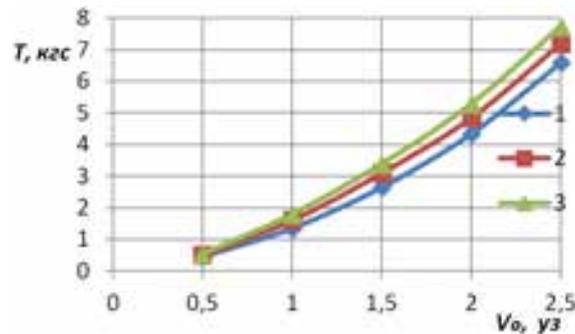


Рис. 9. Влияние длины кабель-троса на размерную тягу ВГ: 1 – $\bar{L}_{\text{тр}} = 46$;

$$2 - \bar{L}_{\text{тр}} = 33; 3 - \bar{L}_{\text{тр}} = 27. \text{ Параметры: } \bar{x}_{\text{тр}} = 0; \omega = 4,14 (\lambda_w = 3,6); S_{\Sigma\text{кр}} = S_{\text{гвл}}; \beta = 180$$

Поведение глайдера на попутном волнении ($\beta=0$) отличается от поведения на встречном волнении. Это определяется как величиной тяги (которая меньше тяги, достижимой на встречном волнении, рис. 10), так и диапазоном относительных длин волн, в котором эта тяга достигает наибольших значений. Для рассматриваемой конструктивной схемы наиболее эффективным режимом извлечения энергии является такой, когда отношение длины волны к длине корпуса НМ ВГ лежит в диапазоне 2,3–3,2, рис. 11.

В процессе моделирования было изучено влияние упругих связей на эффективность «пассивной» пропульсивной системы преобразования волновой энергии.

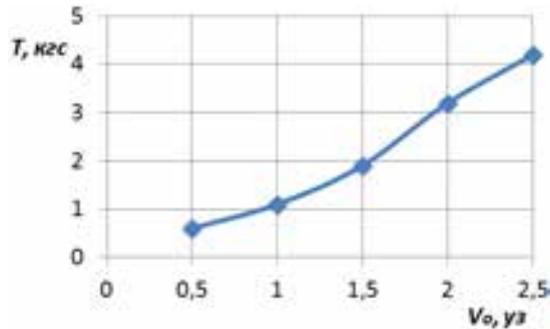


Рис. 10. Размерная тяга T ВГ на попутном волнении ($\beta=0$). Параметры: $\omega=5,18$ ($\lambda_w = 8,1$); $S_{\Sigma\text{кр}} = S_{\text{ГВЛ}}$; $\bar{x}_{\text{тр}} = 0$; $\bar{L}_{\text{тр}} = 46$

Так как решение поставленной задачи для выбранной системы крыльев, их расположения, типа кабель-троса, конкретной геометрии корпуса НМ ВГ зависит от большого числа исходных проектных параметров, то анализ функционирования рассматриваемой динамической системы «НМ – кабель-трос – подводный модуль/система крыльев на упругих связях» является весьма трудоемким.

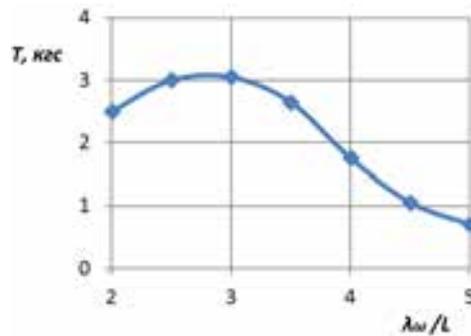


Рис. 11. Резонанс размерной тяги ВГ на попутном волнении ($\beta=0$). Параметры: $v_0 = 2$ узла; $\bar{x}_{\text{тр}} = 0$; $\bar{L}_{\text{тр}} = 46$; $S_{\Sigma\text{кр}} = S_{\text{ГВЛ}}$

Для простоты анализа рассматривается система крыльевых элементов ($n=6$) прямоугольной формы в плане с одной упругой связью по вращательным колебаниям $\{\theta_k\}$ относительно оси, перпендикулярной диаметральной плоскости ПМ ВГ. При этом для крыльев в расчетах принимались следующие значения параметров: $\bar{x}_0 = \bar{x}_c = 0.25$, $\beta^* = 2$, $\delta^* = 1.0$. В соответствии с [5] относительные характеристики упругости представлялись коэффициентами ω/ω_h и ω/ω_θ .

Для конкретной встречной волны ($\beta = \pi$), геометрических характеристик крыльев и их расположения исследовалось влияние жесткости упругой связи по вращательным колебаниям ω/ω_θ . На рис. 12. приведены зависимости тяги, реализуемой на системе крыльев, от скорости движения судна U_0 для различных значений ω/ω_θ .

Из рис. 12 следует, что для рассматриваемой конструктивной схемы существуют резонансные режимы реализации тяги, которые определяются для данной скорости хода (и характеристик волны) конкретным значением жесткостей упругой связи, т.е. отношением ω/ω_θ . При этом с ростом скорости ВГ эти резонансы оказываются более ярко выраженными. Также следует отметить, что

резонансы по тяге наблюдаются в достаточно узком диапазоне жесткостных характеристик упругих связей. В рассмотренном примере можно увидеть выраженный резонанс тяги на скорости 2,5 узла в области параметров упругой связи по вращательным колебаниям $\omega/\omega_\theta = 0,7-0,8$.

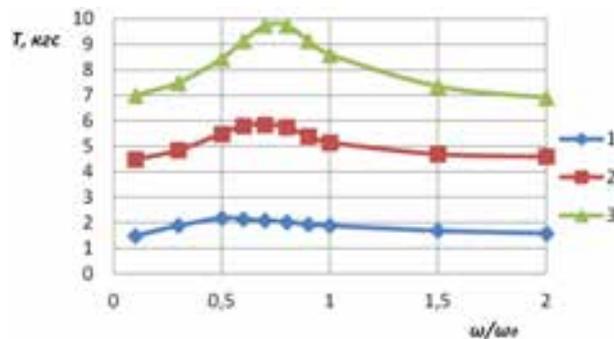


Рис. 12. Влияние упругой связи по вращательным колебаниям на размерную тягу T ВГ: 1 – $v_0 = 1,0$ узел; 2 – $v_0 = 2,0$ узла; 3 – $v_0 = 2,5$ узла. Параметры: $\omega = 4,14$ ($\lambda_w = 3,6$); $S_{\Sigma_{кр}} = S_{гвл}$; $\bar{x}_{тр} = 0$; $\bar{L}_{тр} = 46$; $\beta = 180$

Таким образом, анализ влияния рассмотренных параметров на функционирование системы преобразования энергии морского волнения, позволяет сделать следующие выводы.

1. Рассматриваемая задача определяется большим числом конструктивных параметров рассматриваемой динамической системы. Поэтому корректное ее решение возможно в результате многопараметрического моделирования.

2. Наибольший эффект реализации тяги в случае «пассивной» системы преобразования энергии морского волнения наблюдается на встречном волнении при отношении длины волны к длине ВГ в диапазоне 1,2–1,6.

В довольно широком диапазоне этого отношения происходит существенное умерение продольной качки ВГ.

3. В диапазоне проектных скоростей хода ВГ для конкретных длин волн могут быть найдены оптимальные значения жесткостей упругих связей, обеспечивающих наибольший «выигрыш» в тяге по сравнению с системой преобразования энергии волнения без упругих связей.

Упругие связи позволяют настроить динамическую систему на «резонансный» режим работы в зависимости от параметров волнения и характеристик ВГ.

Для универсальной «многорежимной» работы системы преобразования энергии морского волнения упругие связи должны иметь изменяемую в процессе функционирования жесткость.

4. Технологически для «пассивных» систем наиболее просто использовать настраиваемую упругую связь только по одной из степеней свободы – по вращательным колебаниям. За счет нее могут быть достигнуты приемлемые результаты по достижимой тяге на различном волнении.

5. Наиболее простым и достаточно эффективным конструктивным решением является ВГ с «пассивной» системой крыльев без упругих связей, имеющих свободу по вращательным колебаниям.

Разработанный метод расчетов и проведенные систематические расчеты могут быть использованы в процессе проектирования ВГ различных конструктивных схем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Vrooman D.* Vibrating propeller. US Patent 22,097. Patented Nov. 15, 1858.
2. *Linden H.* Improved combination with floating bodies, of fins adapted to effect their propulsion. GB Patent 14,630. Filed Aug. 1, 1895. Patented Jul. 18, 1896.
3. *Burnett R.F.* Wave energy for propelling craft - nothing new // *The Naval Architect*. – Nov. 1979. – P. 239.
4. *Jakobsen E.* The foilpropeller, wave power for propulsion. In Second International Symposium on Wave & Tidal Energy, BHRA Fluid Engineering, 1981. – P. 363-369.
5. *Anon I.* Wave power for ship propulsion // *The Motor Ship*. – 1983. – № 64. – P. 67-69.
6. *Berg A.* Trials with passive foil propulsion on M/S Kystfangst. Project no. 672.138. Technical report. 1985, Trondheim.
7. Bulletin of the Society on Naval Architect of Japan. – No. 719. – P. 18-26.
8. *Николаев М.Н., Савицкий А.И., Сенькин Ю.Ф.* Основы расчета эффективности судового волнового движителя крыльевого типа // *Судостроение*. – 1995. – № 4. – С. 7-10.
9. *Geoghegan J.J.* Boat, moved only by waves, sails to a seafaring first. *The New York Times*. July 8, 2008.
10. Model 08 Wave Glider. User Manual. Version 2.5, 2011.
11. <http://liquidr.com/>.
12. <http://www.autonautusv.com/>.
13. <http://www.samara.aif.ru/society/details/1329044><http://www.samara.aif.ru/society/details/1329044>.
14. *Рыжов В.А.* Судовая энергосберегающая система с колеблющимися крыльевыми элементами // *Моринтех-97*. Вторая Международная конференция по интеллектуальным технологиям. Кн. 4: Интеллектуальные технологии в прикладных исследованиях. – СПб., 1997. – С. 261-266.
15. *Благовещенский С.Н.* Качка корабля. – Л.: Судпромгиз, 1954. – 520 с.
16. *Бородай И.К., Нецветаев Ю.А.* Качка судов на морском волнении. – Л.: Судостроение, 1969. – 432 с.
17. *Рождественский К.В., Рыжов В.А.* Математические модели в теории машущего крыла. – Л.: Изд-во Ленинградского кораблестроительного института, 1985. – 104 с.
18. *Рождественский К.В., Рыжов В.А., Курапов А.Л.* Исследование пропульсивных характеристик системы, состоящей из крыла с двумя упругими связями // *Труды Ленинградского кораблестроительного института: Математические модели и средства автоматизированных систем в судостроении*. – 1991. – С. 51-61.
19. Отчет о НИР по теме № С-004: «Исследования в обеспечение создания информационно-измерительной системы на основе необитаемых подводных аппаратов типа «глайдер», Этап № 3. – СПбГМТУ, 2014.

REFERENCES

1. *Vrooman D.* Vibrating propeller. US Patent 22,097. Patented Nov. 15, 1858.
2. *Linden H.* Improved combination with floating bodies, of fins adapted to effect their propulsion. GB Patent 14,630. Filed Aug. 1, 1895. Patented Jul. 18, 1896.
3. *Burnett R.F.* Wave energy for propelling craft - nothing new, *The Naval Architect*, Nov. 1979, pp. 239.
4. *Jakobsen E.* The foilpropeller, wave power for propulsion. In Second International Symposium on Wave & Tidal Energy, BHRA Fluid Engineering, 1981, pp. 363-369.
5. *Anon I.* Wave power for ship propulsion, *The Motor Ship*, 1983, No. 64, pp. 67-69.
6. *Berg A.* Trials with passive foil propulsion on M/S Kystfangst. Project no. 672.138. Technical report. 1985, Trondheim.
7. Bulletin of the Society on Naval Architect of Japan, No. 719, pp. 18-26.
8. *Nikolaev M.N., Savitskiy A.I., Sen'kin Yu.F.* Osnovy rascheta effektivnosti sudovogo volnovogo dvizhitelya kryl'evogo tipa [The basis of the calculation of the efficiency of ship wave propulsion wing type], *Sudostroenie* [Shipbuilding], 1995, No. 4, pp. 7-10.
9. *Geoghegan J.J.* Boat, moved only by waves, sails to a seafaring first. *The New York Times*. July 8, 2008.
10. Model 08 Wave Glider. User Manual. Version 2.5, 2011.
11. Available at: <http://liquidr.com/>.

12. Available at: <http://www.autonautusv.com/>.
13. Available at: <http://www.samara.aif.ru/society/details/1329044><http://www.samara.aif.ru/society/details/1329044>.
14. Ryzhov V.A. Sudovaya energosberegayushchaya sistema s koleblyushchimisya kryl'evymi elementami [Marine energy saving system with oscillating wing elements], *Morintekh-97. Vtoraya Mezhdunarodnaya konferentsiya po intellektual'nym tekhnologiyam. Kn. 4: Intellektual'nye tekhnologii v prikladnykh issledovaniyakh* [Morintekh-97. Second international conference on intelligent technologies. Book 4: Intelligent technologies in applied research]. St. Petersburg, 1997, pp. 261-266.
15. Blagoveshchenskiy S.N. Kachka korablya [Pitching of the ship]. Leningrad: Sudpromgiz, 1954, 520 p.
16. Boroday I.K., Netsvetaev Yu.A. Kachka sudov na morskom volnenii [Rolling of ships at sea excitement]. Leningrad: Sudostroenie, 1969, 432 p.
17. Rozhdestvenskiy K.V., Ryzhov V.A. Matematicheskie modeli v teorii mashushchego kryla [Mathematical models in the theory of flapping wing. Leningrad: Izd-vo Leningradskogo korablestroitel'nogo instituta, 1985, 104 p.
18. Rozhdestvenskiy K.V., Ryzhov V.A., Kurapov A.L. Issledovanie propul'sivnykh kharakteristik sistemy, sostoyashchey iz kryla s dvumya uprugimi svyazyami [The study of the propulsion characteristics of the system, consisting of a wing with two elastic links], *Trudy Leningradskogo korablestroitel'nogo instituta: Matematicheskie modeli i sredstva avtomatizirovannykh sistem v sudostroenii* [Proceedings of the Leningrad shipbuilding Institute: Mathematical models and methods for automated systems in shipbuilding]. 1991, pp. 51-61.
19. Otchet o NIR po teme № S-004: «Issledovaniya v obespechenie sozdaniya informatsionno-izmeritel'noy sistemy na osnove neobitaemykh podvodnykh apparatov tipa «glayder», Etap № 3 [Research reports on the topic № C-004: "Research in support of creation of information-measuring system based on unmanned underwater vehicles type "glider", Stage 3]. SPbGMTU, 2014.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.С. Соколов.

Кожемякин Игорь Владиленич – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; e-mail: 1861vp@mail.ru; 190008, г. Санкт-Петербург, ул. Лотманская, 3; тел.: 88127146822; управление оборонных исследований и разработок; начальник.

Потехин Юрий Павлович – e-mail: i.y.potekhins@yandex.ru; тел.: 88124940942; кафедра теории корабля; к.т.н.; профессор.

Рождественский Кирилл Всеволодович – e-mail: kvrxmas@yahoo.com; тел.: 88127142923; д.т.н.; профессор; проректор по МСНиО.

Рыжов Владимир Александрович – e-mail: ryzhov@smtu.ru; тел.: 88124940936; кафедра прикладной математики и математического моделирования; д.т.н.; профессор.

Kozhemyakin Igor Vladilenovich – Saint-Petersburg State Marine Technical University; e-mail: 1861vp@mail.ru; 3, Lotsmanskaya street, St. Petersburg, 190008, Russia; phone: +78127146822; Division of Defense Research and Development; head of division.

Potekhin Yuri Pavlovich – e-mail: i.y.potekhins@yandex.ru; phone: +78124940942; the department of ship theory; cand. of eng. sc.; professor.

Rozhdestvensky Kirill Vsevolodovich – e-mail: kvrxmas@yahoo.com; phone: +78127142923; dr. of eng. sc.; professor; Vice-Rector for International Science & Education.

Ryzhov Vladimir Alexandrovich – e-mail: ryzhov@smtu.ru; phone: +78124940936; the department of applied mathematics and mathematical modeling; dr. of eng. sc.; professor.