

Д. Г. Грязин, д-р техн. наук, нач. отдела, gdg@mt.IFMO.ru,
АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", Научно-исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург

Вопросы создания восполняемых источников энергии морских автономных подводных роботизированных комплексов¹

Рассматриваются пути создания восполняемых источников энергии морских объектов, работающих в отсутствие солнечной энергии. Очевидно, что продолжительность работы многих морских подводных аппаратов ограничена зарядом их аккумуляторных батарей. При работе на малых глубинах такие аппараты находятся в среде, возмущенной волнами, и имеют качку. Поверхностные плавающие буи также подвержены возмущениям от морского волнения. При их эксплуатации в условиях полярной ночи использование солнечной энергии для заряда батарей также становится затруднительным. Для решения указанной задачи предложено использовать энергию поверхностных волн или качки объекта. Энергия от волнового течения и орбитальной скорости движения частиц воды в волне может быть преобразована во вращение вертушки. Рассматриваются теоретические основы использования таких устройств для сбора энергии и их возможности. Указывается, что установка нескольких подобных устройств, ориентированных во взаимно перпендикулярных направлениях, позволит преобразовывать энергию, возникающую и от поступательного движения подводного аппарата при изменении его глубины. Кроме того, обсуждается использование энергии качки объекта для ее преобразования в электрическую энергию. Эта идея чрезвычайно привлекательна и потому не является новой. Однако подобные генераторы никогда не использовались на морских роботизированных объектах. Рассматривается конструкция индукционного генератора, которая запатентована автором. Показано, что ее работа описывается дифференциальным уравнением второго порядка. Предложено использовать в подобных преобразователях, настройку электромеханической системы в резонанс с преобладающими колебаниями качки. Для этого можно изменять степень успокоения колебательной системы. Обсуждаются возможные технические решения и физические принципы их работы. Проведена оценка мощности таких малогабаритных преобразователей. Выполнено сравнение с существующими подобными образцами. Показано, что предложенные генераторы могут вырабатывать энергию в несколько десятков ватт.

Ключевые слова: восполнение энергии, морские автономные аппараты, буй, качка, ветровые волны

Введение

Задача создания источников для восполнения энергии батарей подвижных объектов всегда была актуальной. Во многих случаях она решается путем применения солнечных батарей, качество которых постоянно улучшается. В том случае, если объект работает в условиях полярной ночи или под поверхностью воды, создание источников восполнения энергии становится затруднительным.

В настоящее время энергетический ресурс морских подповерхностных буев, донных станций, метеорологических буев для высоких широт ограничен емкостью применяемых аккумуляторных батарей. В последнее время к числу таких традиционных объектов добавились подводные глайдеры и подводные автономные необитаемые аппараты — носители роботизированных комплексов. Отметим, что объем задач, решаемых с помощью этих роботизированных комплексов, напрямую зависит от ем-

кости аккумуляторной батареи носителя, что сделало задачу восполнения заряда аккумуляторных батарей без использования солнечной энергии еще более актуальной. Очевидно, что число физических явлений, которые можно использовать для выработки электрической энергии в условиях работы указанных объектов, очень ограничено. В электрическую энергию могут быть преобразованы следующие виды кинетической энергии:

- от морских поверхностных гравитационных волн;
- от качки носителя;
- от подповерхностного волнового движения частиц воды;
- от морских течений;
- от погружения или всплытия носителя.

Использование того или иного вида энергии возможно в зависимости от того, установлен ли объект — носитель роботизированного комплекса стационарно под водой или является подвижным аппаратом.

Вопросы создания подобных источников энергии были тщательно проработаны в книге М. Мак-Кормика [4], который предложил схе-

¹Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-08-00010.

мы преобразователей и обосновал принципы их расчета. В настоящее время крупные промышленные преобразователи волновой энергии в электрическую выпускаются промышленно. Одним из мировых лидеров их производства является датская компания Wave Star Energy [8]. В Советском Союзе подобными преобразователями занимались ученые кафедры судостроения и судоремонта Калининградского технологического института под руководством проф. Н. Б. Севастьянова в конце 80-х лет прошлого столетия. Они обратили внимание на тот факт, что морское судно в условиях плавания может рассматриваться как естественный источник накопления энергии волн, которую в дальнейшем и будет расходовать. При этом использование преобразователей энергии волн на борту поможет в борьбе с качкой корабля. В начале 90-х проработкой схем плавающих преобразователей энергии волн занимался А. А. Темев [5, 6], который в настоящее время довел свои разработки до стадии испытаний экспериментальных образцов [7].

Очевидно, что в настоящее время в мире получили распространение волновые генераторы значительной мощности и больших габаритных размеров, работающие от энергии поверхностных гравитационных волн, однако отсутствуют малогабаритные генераторы для восполнения энергии аккумуляторных батарей автономных подводных подвижных объектов.

Возможности использования энергии подповерхностных волн

Из теории поверхностных гравитационных волн известно [1], что частицы воды в волне движутся по эллиптическим траекториям, причем высота волны h связана с радиусом орбитального движения частиц воды соотношением $h = 2r$, где r — радиус орбитального движения частиц воды на поверхности. Орбиты движения затухают с глубиной Z по закону $\gamma_m = e^{-KZ}$, где $K = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны. При этом траектории замкнуты, и нет увлечения частиц воды при деформации свободной поверхности. Распространяется лишь сама деформация [1]. Отметим, что вертикальная полуось орбит уменьшается с глубиной быстрее, чем горизонтальная [2], и на предельной глубине, приближающейся к дли-

не волны, частицы воды колеблются на отрезке горизонтальной прямой. В том случае, если мы имеем дело с гармонической волной конечной амплитуды, профиль отдельной волны в жидкости бесконечной глубины перемещается с фазовой скоростью $V_C = \frac{\omega}{K}$.

Основные параметры волнового движения в жидкости бесконечной глубины связаны между собой следующими выражениями:

$$V_C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = \frac{g\tau}{2\pi}; \quad (1)$$

$$\tau = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}}; \quad \omega = \frac{2\pi}{\tau},$$

где τ — период волны; V_C — фазовая скорость волн; λ — длина волны.

Из выражения (1) видно, что фазовая скорость волны тем выше, чем больше ее длина.

Отметим, что кроме фазовой скорости волны имеют еще групповую скорость движения [2]. Групповая же скорость тем больше, чем круче волна, и в общем случае в два раза меньше фазовой скорости волн. Очевидно, что каждая из волн определенной длины имеет свою скорость. В связи с этим волны постоянно складываются и преобразуются, что особенно заметно при визуальных наблюдениях.

Таким образом, на носитель, находящийся на глубине менее половины длины поверхностной волны, будет действовать не только гидростатическое давление, но и гидродинамическое волновое давление, вызванное фазовой скоростью движения частиц воды в волне, вектор которой соответствует направлению бега волн при прохождении гребня и направленный в обратном направлении при прохождении подошвы:

$$P = \rho gz + \rho g r \gamma_m \cos \omega t, \quad (2)$$

где ρ — плотность воды; g — ускорение свободного падения; r — амплитуда поверхностной волны; ω — угловая частота; Z — глубина погружения носителя.

Отметим, что скорости движения частиц воды V_C также затухают с глубиной по экспоненциальному закону [2].

$$V_C = r \omega e^{-KZ}. \quad (3)$$

Кроме того, на объект, находящийся во взволнованной среде, будет действовать давле-

ние, вызванное групповой скоростью волн, и возможное подводное течение. Длина развитых волн на открытых акваториях лежит в пределах до нескольких сотен метров, что приводит к ощутимой качке подводных объектов на глубинах до 50 м, а в условиях шторма даже на больших глубинах.

Указанная энергия подповерхностных волн, обусловленная скоростью потока воды (3), пропорциональной второму члену уравнения (2), может быть использована генераторами электроэнергии, расположенными как на стационарно установленных на глубине подводных объектах, так и на движущихся подводных аппаратах. Эти генераторы будут воспринимать также давление, вызванное подводным течением. Для сбора такой энергии может быть использована крыльчатка, например, представленная на рис. 1, сопряженная с ротором электрической машины, ориентированная по направлению бега волн или направлению течения.

Сила, вызывающая ее вращение, обусловленное скоростью движения частиц воды, определяется выражением

$$F = K_C \rho \frac{V^2}{2},$$

где K_C — гидродинамический коэффициент, зависящий от особенностей вертушки и скорости потока; V — скорость потока.

Установка нескольких подобных устройств, ориентированных во взаимно перпендикулярных направлениях, позволит преобразовывать энергию, возникающую и от поступательного движения глайдера. Подобные крыльчатки, оснащенные электрическими машинами, могли бы выполнять роль не только генераторов энергии, но и движительного комплекса автономного аппарата, возможно использование

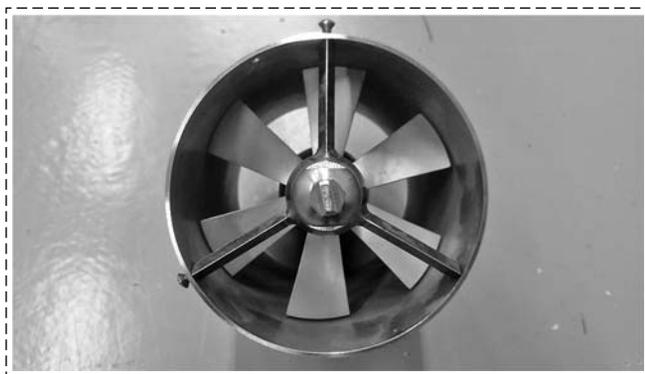


Рис. 1. Крыльчатка в обечайке

их и как запасного движительного комплекса. Работа такой крыльчатки по сбору волновой энергии была проверена в опытовом волновом бассейне Крыловского государственного научного центра.

Использование энергии качки объекта

Идея использования энергии качки судна для ее преобразования в электрическую является очень привлекательной. Над ней до сих пор трудятся последователи известного заслуженного ученого кораблестроителя проф. Н. Б. Севастьянова [9]. Для сбора энергии от качки плавающих объектов обычно предлагается использовать маятниковую систему, представляющую собой обращенный осевой или угловой акселерометр разомкнутого типа [5, 6, 9 и др]. Такие генераторы вырабатывают электроэнергию с помощью электромагнитной системы, имеющей в своем составе постоянный магнит, или управляют поршнем, который способствует аккумуляции энергии, преобразуемой в итоге в электрическую. Следует отметить, что подобные системы являются колебательными, а для повышения их КПД может быть использован принцип настройки в резонанс колебательных систем. В случае использования колебательной системы для преобразователя энергии качки в электрическую такая система должна быть настроена в резонанс с преобладающей частотой качки. Этот принцип может быть реализован в технических схемах, построенных по различным кинематическим схемам. Например, для осевой маятниковой системы, имеющей пружину, например, осевого акселерометра, уравнение второго порядка будет иметь хорошо известный вид:

$$m\ddot{\alpha} + K\dot{\alpha} + c_{\text{ж}}\alpha = -Q\ddot{x},$$

где m — масса инерционного тела; α — его отклонение; $c_{\text{ж}}$ — жесткость упругого элемента; Q — закон изменения действующего ускорения \ddot{x} .

Очевидно, что выражение для частоты собственных колебаний механической системы ω_c имеет вид

$$\omega_c = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2},$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{c_{\text{ж}}}{m}}$ — частота свободных, недемпфированных колебаний системы; $\xi = \frac{K_{\text{Д}}}{2\sqrt{mc_{\text{ж}}}}$ —

степень успокоения системы; K_d — коэффициент демпфирования.

Из приведенных выражений видно, что изменение частоты собственных колебаний механической системы эффективнее всего достигается за счет изменения коэффициента демпфирования.

Кинематическая схема устройства, реализующего этот принцип [3], представлена на рис. 2.

Генератор состоит из подвижной массы 1, перемещающейся вертикально и кинематически связанной с демпфером 2. Указанная масса подвешена в направляющих на пружине 3 через блоки с использованием гибких тяг. Один из роликов блока установлен на роторе генератора переменного тока 4. Таким образом, на качке за счет колебаний подвижной массы приводится во вращение ротор генератора. Для настройки в резонанс с качкой механической системы служит демпфер, воздушное отверстие которого для изменения площади сечения перекрывается диском, управляемым шаговым двигателем 5. Управление элементами генератора осуществляется от контроллера 8, который определяет среднюю частоту качки и управляет демпфером, кроме того, он управляет подключением обмоток трансформатора 6 для предотвращения перезаряда аккумуляторной батареи 7.

Предложенный принцип может быть реализован и на основе генератора без преобразова-

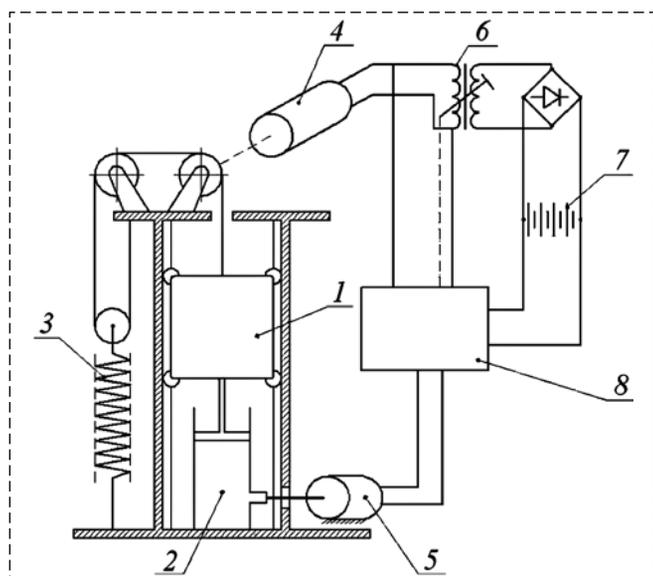


Рис. 2. Генератор для восполнения энергии аккумуляторов, использующий качку объекта

ния линейного перемещения подвижной массы в угловое, а для регулировки силы демпфирования можно использовать и иные схемные решения. Очевидно, что указанные методы восполнения энергии будут наиболее актуальными в аппаратах и буях малого водоизмещения, однако они могут найти применение и при пополнении энергии батарей автономных приборов связи и сигнализации, служащих для контроля местоположения транспортных контейнеров, систем автономной сигнализации транспортных объектов и др.

Таким образом, путями решения проблемы восполнения энергии аккумуляторных батарей подвижных морских подводных автономных роботизированных комплексов может быть использование энергии качки таких аппаратов или энергии от морских подповерхностных волн и течений. Технические средства для сбора такой энергии могут иметь различные кинематические схемы и исполнения, однако для их реализации целесообразно использовать генераторы, сопряженные с крыльчатками, или индукционные преобразователи колебаний.

Оценка мощности преобразователей

Детальный расчет мощности предложенных преобразователей при заданных условиях эксплуатации, является предметом отдельного исследования, однако оценить порядок вырабатываемой мощности несложно.

Мощность, вырабатываемая преобразователем на основе крыльчатки, будет зависеть от набегающего потока воды. Представим себе, что крыльчатка стационарно закреплена на некоторой глубине Z и ориентирована по направлению распространения волн с помощью конструкции ее обтекателя. Очевидно, что на нее будет действовать поток частиц воды, и тогда скорость движения частиц воды будет равна

$$V_B = V_C + V_T + V_T,$$

где V_T — групповая скорость волн; V_T — скорость течения.

Значимое значение скорости V_C , определяемой выражением (3), будет достигаться при условии установки вертушки на глубину менее четверти длины волны, что позволит не оголять преобразователь при прохождении подошвы волны. В то же время установка пре-

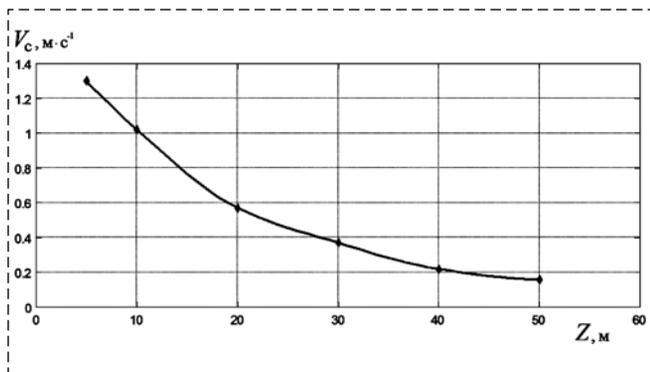


Рис. 3. Зависимость фазовой скорости движения частиц воды от глубины для шестибалльного волнения

образователя на большую глубину приведет к значительному уменьшению скорости потока воды от волнового движения. На рис. 3 представлены результаты расчета зависимости фазовой скорости движения частиц воды V_c от заглубления крыльчатки Z на волнении интенсивностью 6 баллов с высотой волн 5 м, периодом 9 с и длиной 126 м [10]. Для расчета использовались выражения (1).

Из рис. 3 видно, что для эффективной работы преобразователя его следует устанавливать на глубину не более 10 м.

В настоящее время на морских яхтах активно используются источники подзарядки батарей на основе вертушечных генераторов. Такие генераторы имеют конструкцию в виде пилона с вертушкой и просто закрепляются на корме яхты аналогично подвесному мотору [11, 12 и др.]. При этом диаметр их винта составляет примерно 200 мм. Конструкция некоторых из них предполагает простую буксировку вслед за яхтой на кабель-тросе. На рынке представлены генераторы с разным числом лопастей и даже с винтом регулируемого шага. Анализ предложенных в интернете характеристик показывает, что при скорости 1 м/с такой генератор способен выработать несколько ватт энергии. Учитывая, что в расчетах скорости потока воды, набегающей на вертушку, использовалось значение амплитуды волны, отсутствовал учет групповой скорости волн и возможного течения, можно сделать вывод о том, что с помощью предложенного вертушечного преобразователя энергии подповерхностных волн и течений можно получить энергию значением от нескольких ватт до нескольких десятков ватт.

Индукционные преобразователи скорости на основе линейно перемещающейся массы

также присутствуют на рынке. Одним из таких образцов является генератор для подзарядки аккумуляторных батарей мобильных телефонов nPower PEG, работающий при ходьбе пешехода. Генератор имеет массу 255 г, длину 230 мм. При энергичной ходьбе он вырабатывает энергию до 4 Вт [13]. Очевидно, что указанный преобразователь при работе в условиях качки носителя, сможет выработать энергию мощностью несколько десятков ватт, а в случае увеличения размеров его электромагнитной системы — еще больше.

Заключение

Таким образом, путями решения проблемы восполнения энергии аккумуляторных батарей подвижных морских подводных автономных роботизированных комплексов может стать использование энергии качки таких аппаратов или энергии от морских подповерхностных волн и течений. Технические средства для сбора такой энергии могут иметь различные кинематические схемы и исполнения, однако для их реализации целесообразно использовать генераторы, сопряженные с крыльчатками или индукционные преобразователи колебаний. Возможно использование комбинированных преобразователей, каждый из которых способен вырабатывать энергию в несколько десятков ватт. Следует отметить и то, что выработка энергии такими преобразователями возможна лишь при условии плавания на малых глубинах — там, где объекты испытывают воздействие подповерхностных волн. С точки зрения эффективности решения целевых задач автономным аппаратом это не всегда оправданно, однако периодическое всплытие аппаратов возможно и связано с требованиями выхода на связь и измерениями гидрофизических характеристик на подповерхностных горизонтах. Очевидно, что применение таких преобразователей на поверхностно плавающих морских буях значительно увеличит их автономность, особенно при работе в условиях полярной ночи.

Список литературы

1. Лакомб А. Физическая океанография. М.: Мир, 1974.
2. Луговский В. В. Динамика моря. Л.: Судостроение, 1976.

3. **Грязин Д. Г., Величко О. О.** Установка для восполнения энергии морских буев. Патент на изобретение № 2577924 опубликован 20.03.2016 бюл. № 8.

4. **Мак-Кормик М.** Преобразование энергии волн. М.: Энергоатомиздат, 1985.

5. **Поплавковая** волновая электростанция. Патент на изобретение, автор Темеев А. А. F03B 13/20 № 2016227 C1, опубликован 15.07.94.

6. **Поплавковая** волновая электростанция. Патент на изобретение, автор Темеев А. А. F03B 13/16 № 2037642 C1, опубликован 19.06.95.

7. **Бородин В.** Электростанция — Океан // Изобретатель и рационализатор. 2014. № 3.

8. URL: <http://wavestarenergy.com/>

9. **Жуков В. А., Паллаг С. П.** Альтернативные источники энергии: некоторые результаты исследований преобразователей энергии морских волн // Известия Калининградского государственного технического университета. 2015. № 38.

10. **Бородай И. К., Невцветаев Ю. А.** Мореходность судов. Л.: Судостроение, 1982.

11. URL: <http://pdf.nauticexfo.com/pdf/cristec/cristec-hydro-generator/22250-52533.html>

12. URL: <https://www.wattandsea.com/fr>

13. URL: <http://www.macdigger.ru>

The Issues of Development of Renewable Energy Sources for Marine Autonomous Underwater Robotic Complexes

D. G. Gryazin, gdg@mt.IFMO.ru,

The State Research Center of The Russian Federation — Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint-Petersburg, 197046, Russian Federation

Corresponding authors: **Gryazin Dmitry G.**, D. Sc., Associate Professor, The State Research Center of The Russian Federation — Concern CSRI Elektropribor, JSC, 197046, Saint-Petersburg, Russian Federation.

Accepted on March 04, 2018

The paper considers the options of renewable power sources development for marine objects operated in absence of solar energy. Operation of many undersea vehicles is evidently limited by their battery charge. When operating at shallow depths, such vehicles experience pitch and roll in the wave-perturbed environment. Buoys floating on the water surface are also disturbed by sea waves. Moreover, when they are operated during polar night, solar energy cannot be used for charging their batteries. To solve this problem, it is proposed to use the energy of surface waves or the vehicle pitch and roll. It is quite possible to transform the energy of wave current and the orbital velocity of water particles motion into propeller rotation. Basic theory of using such devices for energy accumulation and their capabilities are studied. It is stated that several such devices installed in orthogonal directions relative to each other will transform the energy that is also generated by the undersea vehicle's propulsion when its depth is changing. Furthermore, the vehicle pitch/roll energy transformation into electric power is discussed. This idea is extremely attractive, so it is not new. However, generators of this type have never been used on undersea robotic vehicles. The paper presents an induction generator designed and patented by the author. It is shown that its operation is described by a differential equation of the 2nd order. It is proposed to adjust the electromechanical system of such transformers to be resonant with the dominant pitch/roll oscillations. This can be done by varying the degree of the oscillating system damping. Potential engineering solutions and physical principles of their operation are discussed. The proposed small-size transformers are estimated in terms of power capacity and compared to the existing similar devices. It is demonstrated that the proposed generators are able to generate power of a few dozens Watt.

Keywords: renewal of energy, marine autonomous devices, buoys, pitching, wind waves

Acknowledgements: This article was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research (17-08-00010).

For citation:

Gryazin D. G. The Issues of Development of Renewable Energy Sources for Marine Autonomous Underwater Robotic Complexes, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 7, pp. 474—479.

DOI: 10.17587/mau.19.474-479

References

1. **Lacombe A.** *Fizicheskaya okeanografiya* (Physical Oceanography), Moscow, Mir, 1974 (in Russian).

2. **Lugovsky V. V.** *Dinamika morya* (Dynamics of the sea), Leningrad, Shipbuilding, 1976 (in Russian).

3. **Gryazin D. G., Velichko O. O.** *Ustanovka dlya vospolneniya energii morskikh buev* (Installation for replenishing the energy of sea buoys), The patent for invention № 2577924 was published on 03/20/2016. № 8 (in Russian).

4. **McCormick M.** *Preobrazovanie energii voln* (Transformation of wave energy), Moscow, Energoatomizdat, 1985 (in Russian).

5. **Poplavkovaya volnovaya elektrostantsiya** (Float wave power station), Patent for invention, author — Temeyev A. A. F03B 13/20 No. 2016227 C1, was published on July 15, 1994 (in Russian).

6. **Poplavkovaya volnovaya elektrostantsiya** (Float wave power station), Patent for invention, author — Temeyev A. A. F03B 13/16 No. 2037642 C1, was published on June 19, 1995 (in Russian).

7. **Borodin V.** *Elektrostantsiya — Okean* (Power station — Ocean), *Inventor and Rationalizer*, 2014, no. 3 (in Russian).

8. Available at: <http://wavestarenergy.com/>

9. **Zhukov V. A., Pallag S. P.** *Al'ternativnye istochniki energii: nekotorye rezul'taty issledovaniy preobrazovatelei energii morskikh voln* (Alternative energy sources: some results of studies of sea-wave energy converters), *Izvestiya Kaliningrad State Technical University*, 2015, no. 38 (in Russian).

10. **Borodai I. K., Netsvetaev Yu. A.** *Morekhodnost' sudov* (Seaworthiness of ships), Leningrad, Shipbuilding, 1982 (in Russian).

11. Available at: <http://pdf.nauticexfo.com/pdf/cristec/cristec-hydro-generator/22250-52533.html>

12. Available at: <https://www.wattandsea.com/fr>

13. Available at: <http://www.macdigger.ru>