

Научная статья

УДК 62-521+523:621.311.24

EDN: QKYNRW

Перспективный генератор электрической энергии для автономных морских станций

Д. Г. Грязин^{1, 2} ✉, К. А. Глеб³

¹ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

² ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург, Россия

³ ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, Россия

✉ volnagd@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.02.2024; одобрена после рецензирования 11.04.2024;
принята к публикации 16.05.2024.

Аннотация

Цель. Обоснована конструкция плавучих морских станций с волновым генератором энергии, обладающая большей эффективностью по сравнению с известными конструкциями за счет использования бортовой качки и резонансного режима работы.

Методы и результаты. Изложен резонансный метод преобразования энергии волн в электрическую и описана конструкция автономной станции на основе резонансного преобразования бортовой качки корпуса станции в электрическую энергию. Метод предполагает подстройку частоты собственных угловых колебаний корпуса плавучей станции к преобладающей частоте набегающих волн. В статье теоретически доказано, что преобразование энергии бортовой качки эффективнее, чем преобразование энергии вертикальных колебаний. Это связано с тем, что величина демпфирования при вертикальных колебаниях тела судовой или цилиндрической формы в воде больше величины демпфирования при угловых колебаниях такого тела. Кроме того, показано, что метод преобразования эффективен для применения при разработке измерительных систем и накопительных устройств. Для реализации резонансного метода преобразования энергии волн предложена конструкция плавучей станции. Показано, что подстройка частоты собственных бортовых колебаний корпуса станции к преобладающей частоте набегающих волн может производиться с помощью дополнительных наполняемых цистерн. Описан алгоритм настройки бортовых колебаний корпуса в резонанс с преобладающей частотой волн. Предложена кинематическая схема механического преобразователя энергии качки в электрическую энергию.

Выводы. Результаты теоретических исследований подтверждены экспериментальным исследованием модели устройства в волновом опытовом бассейне, которое показало, что гидродинамическая эффективность предложенного волнового преобразователя возрастает при уменьшении высот волн.

Ключевые слова: энергия, волны, преобразование, механическая, электрическая энергия, плавучие станции, бортовая качка

Благодарности: авторы выражают благодарность сотруднику ФГУП «Крыловский государственный научный центр» к. т. н. С. Г. Живице за оказанную помощь при выполнении исследований и формировании материалов статьи.

Для цитирования: Грязин Д. Г., Глеб К. А. Перспективный генератор электрической энергии для автономных морских станций // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 4. С. 588–610. EDN QKYNRW.

© Грязин Д. Г., Глеб К. А., 2024

An Advanced Electric Power Generator for Offshore Autonomous Stations

D. G. Gryazin^{1, 2, ✉}, K. A. Gleb³

¹ “Concern “SCRI “Elektropribor”, JSC, Saint Petersburg, Russia

² FSAEI HE “National Research University ITMO”, Saint Petersburg, Russia

³ PJSC «Gazprom», Saint Petersburg, Russia

✉ volnagd@yandex.ru

Abstract

Purpose. The research is purposed at substantiation of the design of floating marine stations with a wave energy generator. The proposed construction is of higher efficiency as compared to the known designs due to the application of roll and resonant operating mode.

Methods and Results. The resonant method of converting wave energy into electrical energy, as well as the design of an autonomous station based on the resonant conversion of the station’s body roll into the electrical energy are described. The method implies adjusting the frequency of natural angular oscillations of the floating station’s body to the significant wave frequency. It has been theoretically proved that the conversion of roll energy is more effective than the conversion of vertical oscillations. This is due to the fact that the amount of damping during vertical vibrations of a cylindrical body in water exceeds the amount of damping during angular oscillations of such a body. Besides, the proposed method is shown to be effective for applications in the development of measurement systems and storage devices. The design of a floating station is proposed for implementing the resonant method for converting wave energy. It is shown that adjusting the frequency of natural onboard oscillations of the station body to the significant wave frequency can be done using the additional filled tanks. The algorithm for adjusting the body roll oscillations to the resonance with significant wave frequency is described. The kinematic scheme for a mechanical converter of rolling energy into electrical one is proposed.

Conclusions. The results of theoretical studies were validated experimentally using the device test model in a wave experimental basin. They show that the hydrodynamic efficiency of the proposed wave converter increases as the wave heights decrease.

Keywords: energy, waves, conversion, mechanical, electrical energy, floating stations, roll oscillations

Acknowledgements: The authors are grateful to Sergei G. Zhivitsa, PhD, a specialist of Krylov State Research Center, for his valuable assistance in conducting the studies and preparing the materials for the paper.

For citation: Gryazin, D.G. and Gleb, K.A., 2024. An Advanced Electric Power Generator for Offshore Autonomous Stations. *Physical Oceanography*, 31(4), pp. 539-561.

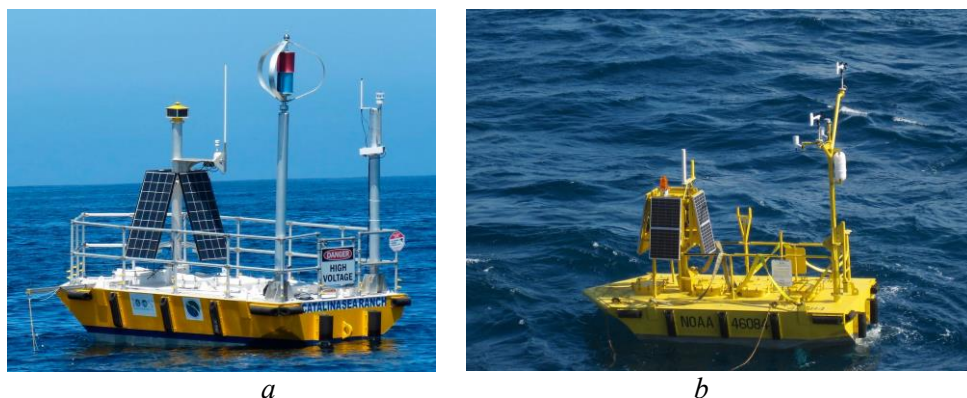
Введение

Динамичное развитие морской техники привело на современном этапе к появлению класса морских автономных станций, используемых для сбора гидрофизической информации на шельфе морей и Мирового океана в интересах оперативной океанологии, а также для зарядки аккумуляторных батарей автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Эти станции представляют собой плавучие конструкции судовой формы длиной до 10 м, водоизмещением до 50 т, оснащенные гидрофизической^{1, 2} [1, p. 151–152] или

¹ Coast Guard, NOAA return weather buoy to service in Southeast Alaska // Defense Visual Information Distribution service : [site]. 2013. URL: <https://www.dvidshub.net/image/1000279/coast-guard-noaa-return-weather-buoy-service-southeast-alaska> (date of access: 21.04.2024).

² Ocean Sentinel NOMAD™ MetOcean Buoy // AXYS Technologies Inc. : [site]. 2024. URL: <https://axys.com/ocean-sentinel-nomad-metoccean-buoy> (date of access: 21.04.2024).

иной аппаратурой для решения целевых задач, а также источниками питания, объем которых определяет автономность их работы. Разрабатываются и производятся такие станции в основном в США, где эти работы, как и другие оборонные проекты, финансирует агентство *DARPA* и Министерство энергетики. Для подзарядки аккумуляторных батарей с целью увеличения автономности работы аппаратуры станции оснащаются источниками возобновляемой энергии, – как правило, солнечными батареями и ветрогенераторами (рис. 1).



Р и с. 1. Морские плавучие станции для решения задач оперативной океанологии компании *Catalina Sea Ranch* (a); береговой охраны США (b)

F i g. 1. Offshore floating stations for real-time ocean monitoring owned by the *Catalina Sea Ranch* company (a) and the US Coast Guard (b)

Отметим, что в последние годы активно развиваются АНПА, используемые для решения оборонных задач, картографирования дна, подводных наблюдений³ [2], геологоразведки⁴. Они обеспечивают распределенные наблюдения за гидрологическими параметрами среды на акватории⁵. Подзарядка батарей АНПА обеспечивается специализированными морскими автономными станциями. Значительных успехов в разработке таких систем достигла английская *ASV Global*, использовавшая результаты своих исследований [3] для создания нескольких надводных аппаратов и систем обеспечения их работы. По этому же пути идут и отечественные разработчики⁶, однако не менее эффективным является использование энергии волн в качестве источника возобновляемой энергии. В связи с тем, что в процессе генерирования энергии участвует непосредственно корпус плавучей станции, она становится волновым плавающим генератором (ВПГ), который часто называют волновым

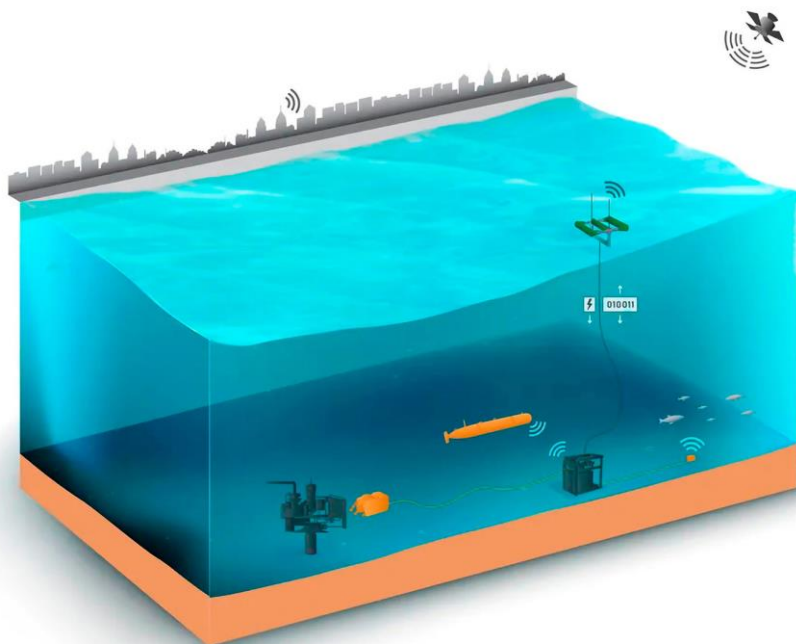
³ Морской беспилотник для гидрографических исследований // NauticExpo.ru : [сайт]. 2024. URL: <https://www.nauticexpo.ru/proizvoditel-sudno/morskoj-bespilotnik-gidrograficeskih-issledovanij-42947.html> (date of access: 21.04.2024).

⁴ Применение подводных глайдеров для геологоразведки // Korabel.ru : [сайт]. 2018. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/primenenie_podvodnyh_glyayderov_dlya_geologorazvedki.html (дата обращения: 31.01.2024).

⁵ Бойко А. Каталог подводных роботов // Robotrends.ru : [сайт]. 2021. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/katalog-podvodnyh-robotov> (дата обращения: 21.04.2024).

⁶ Бойко А. Каталог надводных роботов на солнечных батареях // Robotrends.ru : [сайт]. 2022. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/katalog-nadvodnyh-robotov-na-solnechnyh-batareyah> (дата обращения: 31.01.2024).

абсорбером. Такой генератор реализован в системе *SeaRAY*, разработанной *Columbia Power Technologies*⁷ (рис. 2, 3).



Р и с. 2. Станция подзарядки аккумуляторных батарей АНПА, *SeaRAY*, компании *Columbia Power Technologies*

Fig. 2. AUV battery recharge station *SeaRAY* desined by the *Columbia Power Technologies* company



Р и с. 3. Волновой абсорбер системы *SeaRAY*

Fig. 3. Wave absorber within the *SeaRAY* system

⁷ *Garanovic A.* SeaRAY autonomous offshore power system set for sea trials. 2020. URL: <https://www.offshore-energy.biz/searay-autonomous-offshore-power-system-set-for-sea-trials> (date of access: 21.04.2024).

Сбор энергии волн в открытом море значительно сложнее, чем в прибрежной зоне. Это связано с необходимостью обеспечения высокой надежности работы ВПП в широком диапазоне возмущающих воздействий без дополнительных регламентных работ и требует использования проверенных технических решений. Их конструкции должны быть простыми и ремонтнопригодными. Хорошо известны конструкции буя с ВПП, использующие вертикальные колебания буя компании *Ocean Power Technologies*⁸, однако эффективность сбора волновой энергии таких преобразователей существенно зависит от амплитудно-частотной характеристики их вертикальной качки.

Отметим, что на коэффициент динамичности амплитудно-частотной характеристики качки плавающих объектов в значительной степени влияют силы демпфирования. В связи с тем, что значения этих сил при бортовых колебаниях меньше, чем при вертикальных, целесообразно использовать для сбора волновой энергии именно бортовую качку морских станций. Указанная особенность связана с тем, что при вертикальной качке плавающего объекта силы демпфирования главным образом определяются интенсивностью расходящихся от качающегося объекта волн и пропорциональны площади его ватерлинии. Остальные составляющие, такие как вихревое демпфирование и демпфирование трения обшивки, определяемые формой и шероховатостью подводной части, как правило, существенно меньше. При бортовых колебаниях объекта с судовыми обводами в отсутствие развитых выступающих частей уровень демпфирования в первую очередь определяется вихревой составляющей, а волновое демпфирование и демпфирование трения играют вспомогательную роль. Повышение энергоэффективности ВПП, очевидно, является актуальной задачей. Представляется, что для обеспечения максимального КПД станция с ВПП должна работать в режиме управляемого резонанса, т. е. подстраивать частоту собственных колебаний к частоте морского волнения.

Цель предлагаемых исследований – обосновать для использования в открытом море конструкцию станции с ВПП, обладающую большей эффективностью по сравнению с известными конструкциями благодаря использованию бортовой качки и резонансному режиму работы.

Резонансный метод преобразования энергии волн плавучими станциями

Преобразование энергии волн в электрическую энергию, необходимую для восполнения заряда аккумуляторных батарей плавучих станций, может выполняться путем преобразования энергии качки станции с ВПП в электрическую энергию с помощью генераторов, использующих форму поплавковой части. Колебание поплавка на волне для преобразования энергии используют такие ВПП, как *SEAREV*⁷ [4, 5] и *PeWEC* [6]. Например, *Searay* конструктивно состоит из блока, включающего нескольких цилиндрических поплавков, установленных параллельно друг к другу и имеющих отдельные оси разворота относительно силовой рамы (рис. 3). Внутри каждого цилиндрического поплавка установлено маятниковое тело. Разворот маятника при угловом от-

⁸ Ocean Power Technologies : Company presentation. 2011. 36 p. URL: <https://oceanpowertechologies.gcs-web.com/static-files/212d7a27-1fee-40cc-92e2-ca600045c8a0> (date of access: 03.08.2024).

клонении каждого поплавка вырабатывает механическую энергию при совершении цилиндрическим телом угловых колебаний под воздействием волн. Наибольшая эффективность работы подобных преобразователей достигается в случае их работы в режиме управляемого резонанса, для чего необходимо обеспечить управление системой преобразования механической энергии в электрическую [7]. Исследование работы бортовых резонансных преобразователей энергии качки буя в электрическую энергию привело к регистрации патентов^{9, 10}.

Сложность создания станции с ВПП, использующей управляемый резонанс, связана с тем, что частота спектрального максимума ординат волнения существенно зависит от интенсивности волнения. Более того, в зависимости от времени действия ветра волнение может быть развивающимся, развитым или затухающим. Для развивающегося волнения характерны более короткие волны, т. е. имеющие меньший период, а для затухающего – более длинные волны, имеющие больший период. Кроме того, волнение малой интенсивности может иметь и двухмодальный спектр. Эти особенности требуют перестройки характеристик станции с ВПП для работы в резонансном режиме на волнении, имеющем разные средние периоды.

Одним из примеров подобной системы является система *Aqua Harmonics* [8], состоящая из заякоренного плавающего буя, генератор энергии которого установлен в якоре. Ротор электрической машины через якорный трос связан с бумом и имеет пружинный механизм. Буй совершает орбитальные колебания, находясь на переднем и заднем склоне волн, при этом трос имеет слабину, достаточную для удаления буя от якоря. Горизонтальные составляющие этих колебаний используются для выработки энергии. Причем при приближении буя к якору слабина троса компенсируется его намоткой на шкив с помощью пружинного механизма, а при отклонении буя в обратную сторону шкив раскручивает ротор электрической машины. Управление собственной частотой системы генератор – трос – буй производится путем демпфирования разнонаправленного вращения ротора. Указанная система может работать только на мелководье и не предназначена для размещения океанографической измерительной аппаратуры. Известны и другие конструкции буюв с ВПП, работающих в режиме управляемого резонанса и собирающих энергию вертикальных колебаний буя¹¹.

Энергию фронта волны для ее преобразования в энергию качки следует максимально использовать путем совмещения периода собственных бортовых колебаний станции с преобладающим периодом волн. Это связано с тем, что силы демпфирования, определяемые коэффициентами сопротивления, при угловых колебаниях плавающих тел значительно меньше сил демпфиро-

⁹ Установка для восполнения энергии морских буюв : пат. 2577924 Рос. Федерация : МПК F03B 13/16 / Грязин Д. Г., Величко О. О. ; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор». № 2015101953/06 ; заявл. 22.01.2015 ; опубл. 20.03.2016, бюл. № 8. 7 с.

¹⁰ Установка для восполнения энергии аккумуляторов малых морских автономных аппаратов и буюв : пат. 2658713 Рос. Федерация : МПК F03B 13/20 / Грязин Д. Г., Елифанов О. К. ; заявитель и патентообладатель Акционерное № 2017127435 ; заявл. 31.07.2017 ; опубл. 22.06.2018, бюл. № 18. 11 с.

¹¹ Коробков В. А. Преобразование энергии океана. Ленинград : Судостроение, 1986. 280 с. МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 40 № 4 2024 593

вания (коэффициентов сопротивления) при их вертикальных колебаниях. Коэффициенты сопротивления не постоянны. Они являются функциями от скорости и имеют нелинейную зависимость, определяются экспериментально для массогабаритных характеристик плавающих тел. Например, коэффициент сопротивления при его линейной аппроксимации для вертикальных колебаний плавающего тела можно найти из выражения ¹²

$$W_{\text{верт}} = \frac{4}{3\pi} \rho C_K S r \omega_B, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды; C_K – квадратичный коэффициент сопротивления, определяемый экспериментально; r – амплитуда волны; S – площадь ватерлинии; ω_B – частота ее вертикальных колебаний. Выражение удобно для практического определения коэффициента (функции) сопротивления, который зависит, как видно, от переменных $r\omega$, т. е. от скорости.

Коэффициент сопротивления при угловых колебаниях плавающего тела может быть получен по методике, предложенной в работе ¹³, из выражения

$$W_{\text{угл}} = 0,85 \omega_C r_y K_W, \quad (2)$$

где ω_C – частота собственных угловых колебаний плавающего тела; r_y – амплитуда угловых колебаний; $K_W = C_W (J_B - J_{\text{пр}})$, C_W – квадратичный коэффициент сопротивления, зависящий от скорости, J_B – момент инерции тела в воздухе, $J_{\text{пр}}$ – присоединенный момент инерции.

Анализ выражений (1) и (2) показывает, что коэффициент сопротивления при вертикальных колебаниях плавающего тела зависит от площади ватерлинии плавающего тела, а при угловых колебаниях – лишь от его момента инерции и присоединенного момента инерции. Таким образом, сопротивление при бортовых колебаниях меньше, чем при вертикальных. Наиболее ярко это проявляется на плавающих объектах шарообразной или цилиндрической формы, которые имеют наименьшее сопротивление бортовой качке.

Для настройки режима бортовой качки станции с ВПГ на резонансный режим, при котором амплитуды ее бортовых колебаний будут максимальны, собственная частота бортовой качки должна соответствовать частоте максимума спектральной плотности набегающих волн. При этом изменение собственной частоты бортовых колебаний станции с ВПГ ω_R достигается путем соответствующего изменения поперечной метацентрической высоты h , т. е. запаса ее остойчивости в соответствии с известной формулой ¹⁴

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{Dh}}, \quad (3)$$

¹² Берто Г. О. Океанографические буи. Ленинград : Судостроение, 1979. 215 с.

¹³ Благовещенский С. Н., Холодильник А. Н. Справочник по статике и динамике корабля : в двух томах. Т. 2 : Динамика (качка) корабля. Ленинград : Судостроение, 1976. 176 с.

¹⁴ Ногид Л. М. Проектирование морских судов. Ч. 2 : Остойчивость судна и его поведение на взволнованном море. Ленинград : Судостроение, 1967. С. 72.

где T – период собственных колебаний станции при угловой качке; I – момент инерции массы станции (относительно продольной оси, проходящей через центр тяжести), вычисленный с учетом присоединенного момента инерции; D – водоизмещение станции; h – поперечная метацентрическая высота, т. е. возвышение поперечного метacentра над центром тяжести.

Известно, что в отсутствие развитых кормовых или носовых надстроек судно в свободном дрейфе разворачивается в положение, близкое к положению бортом к волне, и испытывает главным образом вертикальную и бортовую качку. Это позволяет использовать преобразование бортовой качки, применительно к которой наиболее эффективной будет цилиндрическая форма корпуса ВПГ, что позволит практически исключить волновую и вихревую компоненту демпфирования, обеспечивая минимальное сопротивление бортовой качке и добиваясь таким образом при резонансе значительных амплитуд, многократно превышающих амплитуду угла волнового склона. Как следствие, используя энергию бортовой качки, даже при незначительном водоизмещении станции с ВПГ можно ожидать существенного повышения эффективности сбора волновой энергии. При практической реализации, конечно, следует предпринять соответствующие проектные меры, направленные на предотвращение заливания палубы и опрокидывания ВПГ при резонансной качке на штормовом волнении.

Для преобразования энергии качки в электрическую целесообразно использовать накопители механической энергии, которые обеспечили бы вращение ротора генератора электрической машины с одинаковой угловой скоростью аналогично решению, представленному в патенте ¹⁵. При этом вращение ротора электрической машины должно быть односторонним, а не знакопеременным, при котором выделяется значительная реактивная мощность [9]. Именно эту последовательность технических решений и следует реализовывать в конструкции станции с ВПГ.

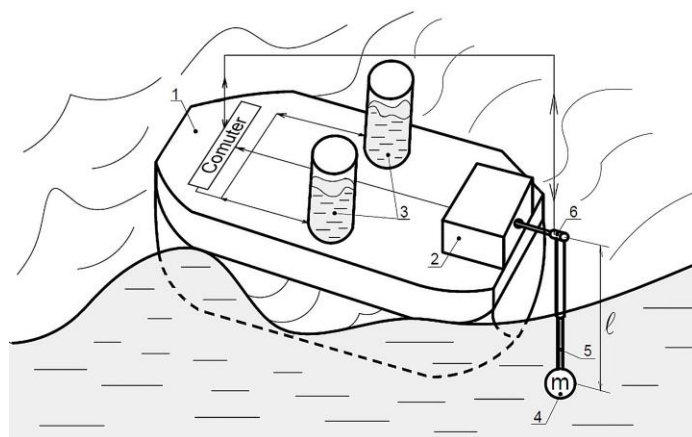
Отметим, что максимальное использование энергии качки достигается совмещением периода собственных колебаний чувствительной подвижной массы генератора с периодом качки ВПГ (рис. 4). В этом случае при достижении резонанса маятник будет отклоняться от вертикали в противоположную сторону, т. е. со сдвигом фазы на 90° , относительно бортовых колебаний. К преимуществу предложенного способа следует отнести и то, что такой генератор будет собирать энергию волн в широком диапазоне их периодов.

Конструкция перспективной плавучей станции

Станция с ВПГ (рис. 4) состоит из корпуса 1 с положительной плавучестью, механизма преобразования энергии 2 , балластных цистерн 3 , маятника с чувствительной массой 4 и вычислителя. Корпус станции должен иметь форму, приближенную к цилиндрической, в связи с тем, что эта форма имеет наименьшее сопротивление при бортовой качке. Маятник может изменять длину подвеса за счет изменения длины l телескопической штанги 5 с помощью привода телескопической штанги 6 . Балластные цистерны 3 должны

¹⁵ Поплавковая волновая электростанция : пат. 2037642 Рос. Федерация : МПК F 03 B 13/16 / Темеев А. А. ; заявитель и патентообладатель Темеев А. А. № 93043446/29 ; заявл. 31.08.1993 ; опубл. 19.06.1995. 12 с.

быть оснащены уровнемерами, а подача воды и ее слив из цистерн должны производиться с помощью насоса и сливных клапанов, которые на рис. 4 не показаны.

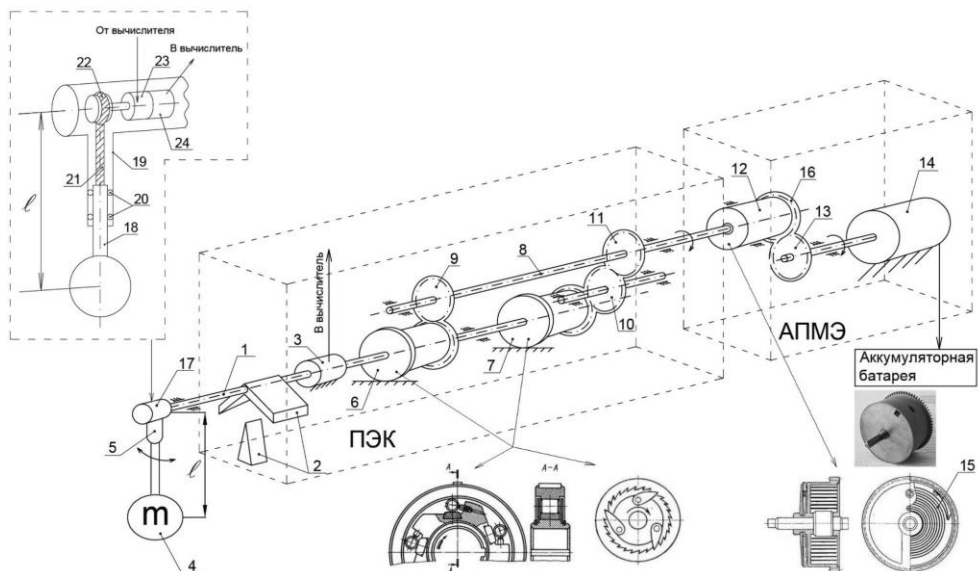


Р и с. 4. Конструкция корпуса станций с ВПГ: 1 – плавающий корпус; 2 – механизм преобразования энергии; 3 – балластные цистерны; 4 – маятник с чувствительной массой; 5 – телескопическая штанга; 6 – привод телескопической штанги

F i g. 4. Design of the station hull with WFG: 1 – floating hull; 2 – energy conversion mechanism; 3 – ballast tanks; 4 – pendulum proof mass; 5 – extendable rod; 6 – extendable rod drive

Механизм преобразования энергии (рис. 5) состоит из двух частей: преобразователя энергии качки и аккумулятора – преобразователя механической энергии. Вычислитель (см. рис. 4) имеет в своем составе микропроцессорный блок, вырабатывающий команды управления, память с записанным алгоритмом управления, аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи, а также усилители аналоговых сигналов для управления насосом и клапанами балластных цистерн, а также приводом телескопической штанги 17 (рис. 5). Вычислитель получает и обрабатывает измерительную информацию, получаемую от датчика 3 угла разворота входного вала 1 (рис. 5), уровнемера балластных цистерн 3 (см. рис. 4), многооборотного датчика угла 24 (рис. 5).

Станция с ВПГ работает следующим образом. Плавающий корпус 1 станции (см. рис. 4) совершает вынужденные бортовые колебания под воздействием волн относительно положения маятника 4, близкого к вертикальному. При этом маятник демпфирован водой и имеет массу m , соизмеримую с водоизмещением бую. С целью максимального использования энергии фронта волны для ее преобразования в кинетическую энергию качки путем совмещения периода собственных бортовых колебаний плавающего бую с преобладающим периодом волн производится изменение периода собственных бортовых колебаний плавающего корпуса станции с использованием выражения (3) путем изменения метацентрической высоты бую. Ее изменение производится путем заполнения или осушения балластных цистерн 3 (см. рис. 4). Амплитуда и период качки определяются с помощью датчика угла, разворота 3 (рис. 5). При этом вычислитель (см. рис. 4) выполняет расчет вынужденных колебаний корпуса станции с ВПГ.



Р и с. 5. Механизм преобразования энергии качки в электрическую энергию: 1 – входной вал; 2 – ограничитель разворота; 3 – датчик угла; 4 – маятник; 5 – телескопическая штанга; 6 и 7 – муфты свободного хода одностороннего вращения, например храповые или обгонные муфты, с зубчатыми венцами; 8 – выходной вал; 9, 10 и 11 – зубчатые колеса; 12 – пружинный барабан; 13 – зубчатое колесо электрической машины; 14 – электрическая машина; 15 – плоская спиральная пружина; 16 – зубчатый венец; 17 – механизм телескопической штанги; 18 – выдвижная штанга; 19 – труба корпуса привода; 20 – подшипники телескопической штанги; 21 – трос; 22 – шкив; 23 – двигатель с редуктором; 24 – многооборотный датчик угла

F i g. 5. Mechanism for converting roll energy into electrical power: 1 – input shaft; 2 – twist stop; 3 – angle sensor; 4 – pendulum; 5 – extendable rod; 6 and 7 – unidirectional rotation freewheel couplings, e.g., ratchet or freewheel clutches, with tooth rims; 8 – output shaft; 9, 10 and 11 – gear wheels; 12 – spring drum; 13 – gear wheel of electrical machine; 14 – electrical machine; 15 – flat spiral spring; 16 – tooth rim; 17 – extendable rod mechanism; 18 – extendable rod; 19 – drive housing pipe; 20 – extendable rod bearings; 21 – rope; 22 – pulley; 23 – motor with gearbox; 24 – multi-turn angle sensor

Алгоритм настройки бортовых колебаний корпуса в резонанс с преобладающей частотой волн после их произвольного заполнения включает:

- 1) запись реализации колебаний за интервал 900 с, в течение которого процесс качки считается стационарным;
- 2) определение максимального размаха колебаний Θ_{\max} ;
- 3) определения зоны вторичных колебаний $\Theta_{\text{н}}$, составляющей 20 % от максимального размаха;
- 4) определение размахов колебаний, вызванных преобладающими вол-

нами $\Theta_{\text{П}i} > \Theta_{\text{н}}$, их числа N и среднего значения $\bar{\theta}_{\text{П}} = \frac{\sum_{i=1}^N \theta_{\text{П}i}}{N}$;

- 5) вычисление периода преобладающих волн $T_{\text{П}i} = 900/2N$;
- 6) заполнение балластных цистерн на 10 % объема;
- 7) выполнение операций с п. 1 по 5;

8) анализ значений $\bar{\theta}_{\Pi}$, полученных до и после заполнения балластных цистерн;

9) в том случае, если значение $\bar{\theta}_{\Pi}$, полученное после заполнения, имеет значение большее, чем то, которое получено до заполнения балластных цистерн, то следует заполнить цистерны согласно п. 6, если меньшее, то следует начать уменьшение уровня воды в балластных цистернах в первом случае на 20 %, а далее на 10 %;

10) после уменьшения последующего значения $\bar{\theta}_{\Pi}$ по сравнению с предыдущим следует восстановить уровень воды в балластных цистернах в соответствии с предыдущим значением.

Выполнение настройки балластных цистерн производится в соответствии с алгоритмом в зависимости от того, является ли волнение затухающим, развивающимся или стационарным программно, через интервал времени от 1 до 12 ч. Расчет всех значений качки в соответствии с алгоритмом производится с помощью вычислителя (см. рис. 4).

Установленный в нижней части корпуса станции с ВПГ и демпфированный водой, маятник будет иметь период собственных колебаний меньше периода Шулера, равного 84,4 мин, в связи с этим он будет совершать колебания, вызванные ускорением качки корпуса ВПГ, кроме того его возмущения будут зависеть и от орбитального смещения корпуса ВПГ при колебаниях на волнах. Таким образом, маятник будет совершать некоторые вынужденные колебания относительно вертикального положения с частотой этой вынуждающей силы. С целью максимального использования кинетической энергии качки для ее преобразования в электрическую энергию период собственных колебаний чувствительной подвижной массы совмещается с периодом качки буя. Для этого производится выбор длины l маятника 4 и ее установка с помощью телескопической штанги (5 на рис. 5). При этом резонансная частота колебаний маятника определяется из выражения ¹⁶

$$\omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2K_d^2},$$

где $\omega_0^2 = \frac{mgl}{J}$ – собственная частота колебаний маятника; $K_d = \frac{Wl_{\text{и}}}{J}$ – коэффициент демпфирования. Здесь m – масса маятника; l – длина его подвеса; J – момент инерции системы; $l_{\text{и}}$ – плечо интегральной силы сопротивления, учитывающей сопротивление как самой чувствительной массы, так штанги ее подвеса; W – квадратичный коэффициент сопротивления движению маятника и его подвеса в воде, зависящий от скорости движения маятника и поперечного сечения маятника и штанги-подвеса, определяемый экспериментально. А период колебаний определится по известной формуле $T_p = \frac{2\pi}{\omega_p}$. Расчет длины l производится с помощью вычислителя (см. рис. 4).

¹⁶ Кухлинг Х. Справочник по физике. Москва : Мир, 198285. 519 С. 230.

Отметим, что в связи с изменением фазы колебаний в области резонанса маятник при периодах качки корпуса станции, близких к периодам его собственных колебаний, будет отклоняться на малый угол в сторону, противоположную углу наклона корпуса буя, и развернет вал 1 (рис. 5) механизма преобразователя энергии на дополнительный угол. С целью предотвращения опрокидывания корпуса при потере устойчивости, вызванной резонансными явлениями, этот входной вал механизма преобразователя энергии оснащен ограничителями разворота 2 (рис. 5), которые не позволят ему развернуться на угол, больший заданного значения, и предотвратят опрокидывание буя. Конструкция механизма запатентована¹⁷.

Механизм преобразования энергии (рис. 5) работает следующим образом. При возникновении крена производится разворот корпуса станции относительно вертикального положения маятника 4 с телескопической штангой 5, при этом разворачивается входной вал 1. Разворот вала преобразуется в выходной сигнал датчика угла 3, передаваемый в вычислитель.

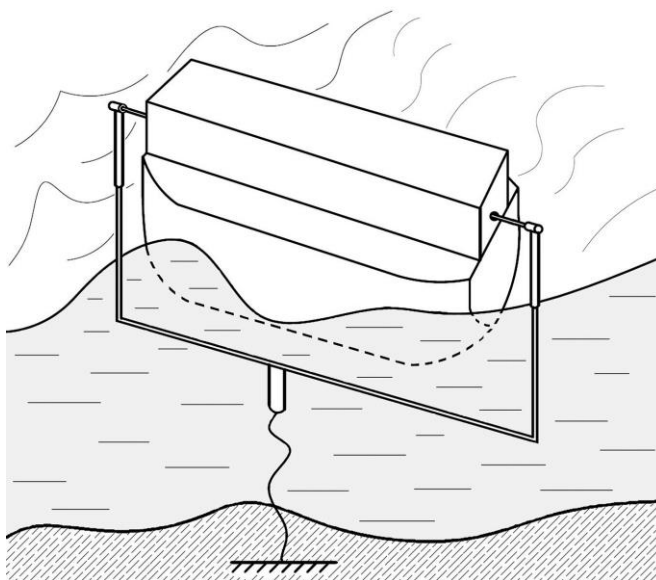
При развороте корпуса станции относительно подвижной массы 4 со штангой 5 против часовой стрелки момент от вала 1 передает муфта свободного хода одностороннего вращения 6, которая может иметь различные конструкции, например храповая или обгонная муфта, указанные на рис. 5 (в дальнейшем муфта), а при противоположном развороте – муфта 7. Муфта 6 преобразует разворот вала 1 в разворот сопряженного зубчатого колеса против часовой стрелки, а муфта 7 – по часовой стрелке, эти муфты подключены встречно. Благодаря зубчатому колесу 9 промежуточный вал 8 разворачивается по часовой стрелке. Благодаря паре зубчатых колес 10 и 11, разворот сопряженного зубчатого колеса муфты 7 также разворачивает вал 8 по часовой стрелке. Передаточное отношение зубчатых колес, сопряженных с муфтами 6 и 7, к валу 8 повышающее и одинаковое. Таким образом, преобразователь энергии качки преобразует знакопеременный разворот корпуса станции относительно маятника в разворот вала 8 по часовой стрелке. Разворот вала 8 приводит к закручиванию плоской спиральной пружины аккумулятора – преобразователя механической энергии, расположенной в барабане 12. Момент закручивания пружины меньше момента восстанавливающих сил при бортовой качке корпуса станции, что сохраняет его устойчивость. Зубчатый венец 16 барабана 12 разворачивает колесо 13 при раскручивании плоской спиральной пружины. Колесо 13 передает момент на ротор электрической машины 14, выполняющей роль генератора постоянного тока. Спиральная пружина имеет нормальную характеристику и почти постоянный момент при ее раскручивании, что обеспечивает малое изменение числа оборотов ротора электрической машины¹⁸. Вырабатываемый генератором 14 ток подается для пополнения заряда аккумуляторной батареи. Настройка в резонанс механиче-

¹⁷ Мобильная распределенная система подводного наблюдения : пат. 2767384 Рос. Федерация : МПК G 01 S 3/80 / Грязин Д. Г., Машошин А. И., Пашкевич И. В. ; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор». № 2021127083 ; заявл. 15.09.2021 ; опубл. 17.03.2022, бюл. № 8. 21 с.

¹⁸ Пономарёв С. Д., Андреева Л. Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. М. : Машиностроение, 1980. С. 64–66.

ской части генератора с частотой собственных колебаний корпуса станции производится за счет изменения длины подвеса маятника l путем выдвижения штанги 18 с грузом 4 из трубы 19. Установка штанги 18 в заданное положение производится с помощью ее вертикального перемещения. Для этого трос, закрепленный в верхней части штанги и намотанный на шкиве 22, приводится в движение двигателем 23. Для позиционирования штанги в заданном положении многооборотный датчик угла 24, связанный с вычислителем, откалиброван в зависимости от разворота шкива 22 и намотанной на нем длины троса 22. Изменение длины маятника производится в соответствии с функциональной зависимостью длины маятника от собственной частоты бортовой качки корпуса станции и выполняется по команде от вычислителя. Указанная зависимость определяется экспериментально на основании записи свободных колебаний корпуса станции с цистернами, заполненными до различного уровня, и с маятником разной длины по критерию достижения собственными колебаниями корпуса станции наибольшего размаха. Определение указанной функциональной зависимости выполняется экспериментально на тихой воде при отсутствии внешних возмущающих сил.

Следует отметить, что при современных достижениях механики конструкция механизма преобразования энергии может быть построена и на других элементах, однако их назначение останется прежним.



Р и с. 6. Конструкция станции с ВПГ для установки на якорь
F i g. 6. Design of a station with WFG for installation at an anchor

Отметим, что в случае необходимости постановки на якорь станции с ВПГ может быть применена схема устройства, представленная на рис. 6. В этой схеме предлагается установить встречно два механизма преобразования энергии (см. рис. 5), соединить между собой выдвижные стержни дополнительной горизонтальной штангой, к центру которой подсоединить якорную

связь. В этом случае положение штанги 5 (рис. 5) будет определяться якорной связью и может отличаться от вертикального, однако это никак не повлияет на вырабатываемую мощность электрической машины 14. Такая конструкция позволит устанавливать корпус станции с ВПГ бортом к направлению движения волн.

Валидация предложенного метода

Валидация предложенного метода производилась путем проведения экспериментальных исследований схематизированной модели станции с ВПГ (рис. 7) в волновом опытовом бассейне Крыловского государственного научного центра.



Р и с. 7. Модель, испытанная в волновом опытовом бассейне
F i g. 7. Model tested in a wave experimental basin

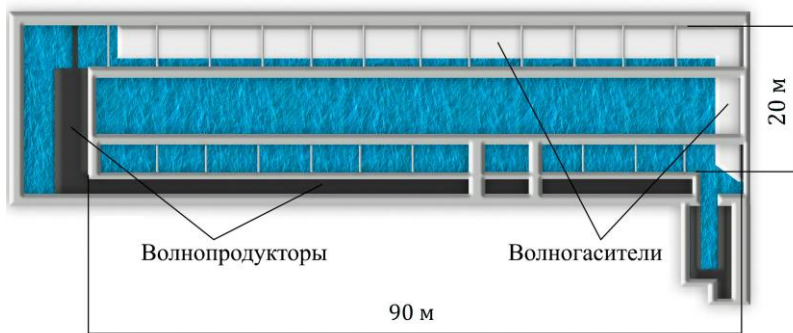
Модель цилиндрической формы имела длину 1650 мм, диаметр корпуса 640 мм и массу 172 кг. Борта модели были сделаны высокими, чтобы при больших угловых наклонах площадь ватерлинии оставалась неизменной. К обеим торцевым пластинам корпуса модели на уровне ее центра тяжести на шарикоподшипниках были установлены две маятниковые системы (рис. 8), которые представляли собой штанги 1 длиной 0,9 м, закрепленные на осях поворота 2 с торцов модели на оси центра масс, положение которой было определено в процессе подготовки модели. Маятниковые системы были выполнены в виде штанг, на каждом подвесе размещался груз 3, который можно было перемещать вдоль штанги, меняя при этом длину маятника. Груз фиксировался на штанге винтовым прижимом.



Р и с. 8. Одна из двух маятниковых систем, закрепленных по бокам модели: 1 – штанга; 2 – ось поворота штанги; закрепленной на оси центра масс модели; 3 – перемещаемый вдоль штанги груз с винтовым прижимом

Fig. 8. One of two pendulum systems fixed on the model sides: 1 – rod; 2 – rod rotation shaft fixed on the axis of the models' center of mass; 3 – load with a screw stop moving along the rod

Модель испытывалась в волновом бассейне (рис. 9) длиной 90 м, шириной 20 м, глубиной 4 м. Волнение создавалось волнопродуктором, расположенным в торцевой части бассейна, позволяющим воспроизводить как регулярные (гармонические) волны с длиной в диапазоне от 0,6 до 12,0 м и высотой от 20 до 240 мм, так и волнение в заданном спектре частот.

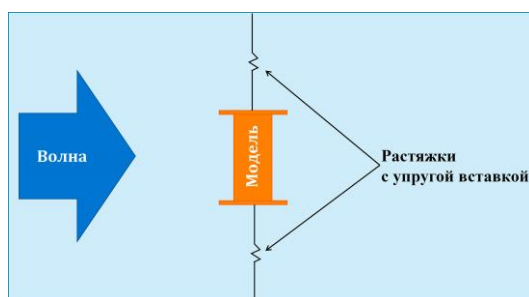


Р и с. 9. Схема опытового волнового бассейна ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Fig. 9. Scheme of the experimental wave basin in Krylov State Research Center

Регистрация углового положения модели и штанг маятниковой системы производилась с помощью бесконтактной оптической системы *Optotrak Certus HD*¹⁹, причем бортовые наклоны корпуса модели и штанг измерялись независимо друг от друга. Для этого на самой модели и на площадках, прикрепленных к штангам, располагались треугольные рамки с тремя светодиодами, при помощи которых оптическая система измеряла углы крена относительно горизонтальной плоскости. Ординаты волнения регистрировались электролитическим волнографом. В ходе эксперимента измеряемые процессы регистрировались с интервалом дискретизации 0,01 с.

Во время эксперимента модель располагалась поперек бассейна, моделируя положение бортом к набегающим волнам. Модель удерживалась на курсе с помощью системы удержания (рис. 10), представляющей собой два тонких капроновых троса с упругими элементами, прикрепленными с одной стороны к оконечностям модели на высоте ее центра тяжести, а с другой – к конструкциям бассейна. Жесткость упругих элементов системы удержания модели определялась требованием достаточной удаленности собственного периода поперечно-горизонтальных колебаний модели, прикрепленной к системе удержания, как от собственного периода бортовых колебаний, так и от среднего периода набегающего волнения. Такой подход позволил минимизировать влияние системы удержания на качку модели.



Р и с. 10. Схема удержания модели в точке подбора волн в опытном бассейне

F i g. 10. Scheme of the system for model retention at the wave selection point in the experimental basin

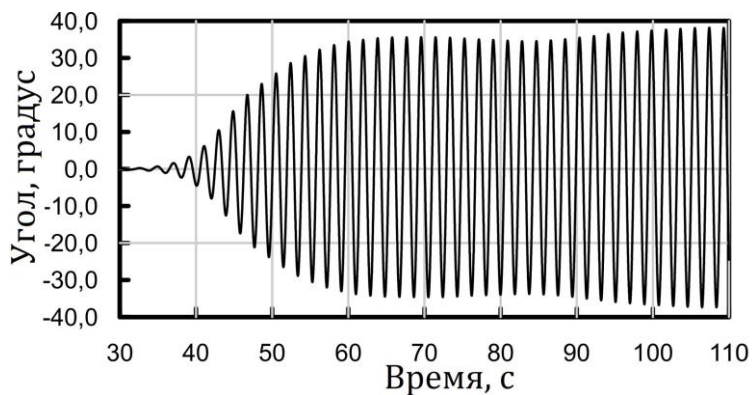
Перед проведением экспериментальных исследований были определены период собственных бортовых колебаний модели, который составил 1,89 с, и момент инерции с присоединенным моментом инерции, который составил 10,7 кг·м². В соответствии с найденным периодом были подобраны регулярные волны и спектры нерегулярных волн.

Регулярные волны подбирались до установки модели судна в бассейне с периодом, равным 1,89 с, высотой 60 мм и углом волнового склона, равным 1,9°. Бортовая качка модели в условиях такого волнения составила около 35°. На рис. 11 представлен фрагмент видеозаписи бортовых колебаний модели, а на рис. 12 – реализация бортовых колебаний, измеренных оптической системой.

¹⁹ Legacy Products: NDI's 40-year history and transition // NDI : [site]. 2022. URL: <https://www.ndigital.com/products/legacy-products> (date of access: 21.04.2024).



Р и с. 11. Испытание модели в опытовом волновом бассейне под воздействием волн
Fig. 11. Model during wave tests in the experimental wave basin



Р и с. 12. Фрагмент записанной реализации бортовых колебаний (крена) модели в реальном времени на регулярной волне высотой 0,06 м с периодом 1,89 с
Fig. 12. Fragment of recorded realization of model rolling oscillations on regular waves of 0.06 m high with the period 1.89 s in real time

Из записи крена модели (рис. 12) виден нарастающий эффект резонанса, который заключается в увеличении амплитуды колебаний при совпадении частот волн и частоты собственных колебаний модели. В данном случае модель совершила около 15 колебаний перед тем, как амплитуда стала более 30° . Максимальная амплитуда установившихся колебаний модели составила 38° , при том, что угол волнового склона был всего $1,9^\circ$, что в 20 раз меньше. Очевидно, что при изменении высоты волны и сохранении ее периода, т. е. изменении крутизны волны будет меняться и максимальная амплитуда качки модели и скорость достижения значительных амплитуд колебаний. Чем больше крутизна волны, тем больше амплитуда качки по крену и быстрее достигаются значительные амплитуды. Это обусловлено тем, что энергия волны E_B (Дж) зависит от ее амплитуды²⁰:

²⁰ Луговский В. В. Динамика моря. Ленинград : Судостроение, 1976. 200 с.
 604 МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 40 № 4 2024

$$E_B = \frac{1}{2} \rho g a^2,$$

где ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; a – амплитуда волны.

На следующем этапе экспериментальных исследований были измерены угловые колебания маятниковой системы. Для чего был подобран груз и его положение на штанге, при котором разность фаз составила 135° . Полученные результаты позволили произвести расчет гидродинамической эффективности подобного объекта. Под гидродинамической эффективностью понимается отношение мощности угловой качки модели к мощности волны, взятое в процентах [10]. В соответствии с работой²¹, средняя мощность N_B (Вт), приведенная к длине N_B гребня регулярной волны, равной длине исследуемого объекта (модели), может быть рассчитана по формуле

$$N_B = \frac{\rho g^2 h^2 \tau l}{32\pi},$$

где h – высота волны; τ – период волны; l – длина гребня волны, равная длине модели.

Для задаваемой в бассейне волны, подобранной в эксперименте с параметрами $h = 0,06$ м, $\tau = 1,89$ с, $l = 1,65$ м, средняя приведенная мощность за один период на 1 м длины гребня составила 6,26 Вт/м.

Мощность энергии угловых колебаний модели N_M можно найти через кинетическую энергию углового движения, которую приобретает модель в процессе угловых колебаний. Мощность углового движения равна количеству работы, совершенной моделью за единицу времени $\left(\frac{Дж}{с} = Вт \right)$:

$$N_M = \frac{A_M}{\Delta t}, \quad (5)$$

где A_M – работа совершаемая моделью; Δt – шаг опроса.

Работа A_M (Дж), совершенная моделью за единицу времени Δt , равна изменению кинетической энергии модели за эту единицу времени Δt :

$$A_M = \Delta E_{км},$$

где $E_{км}$ – кинетическая энергия углового движения модели, Дж, которая равна

$$E_{км} = \frac{1}{2} (J + \Delta J) \dot{\theta}^2,$$

где J – момент инерции модели; ΔJ – присоединенный момент инерции; $\dot{\theta}$ – угловая скорость бортовых колебаний модели.

²¹ Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. Часть первая. Издание шестое. М. : Физматгиз, 1963. 584 с.

Тогда, зная кинетическую энергию модели в каждый момент времени, найдем мощность угловых колебаний модели N_M (Вт):

$$N_M = \frac{\Delta E_{\text{км}}}{\Delta t}.$$

Второй способ расчета мощности угловых колебаний – через момент, создаваемый угловым колебанием модели, который равен произведению момента инерции и присоединенного момента инерции на угловое ускорение:

$$M = (J + \Delta J)\ddot{\theta},$$

где M – момент, $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м} = \text{Нм}$; $\ddot{\theta}$ – угловое ускорение.

Работу найдем из выражения

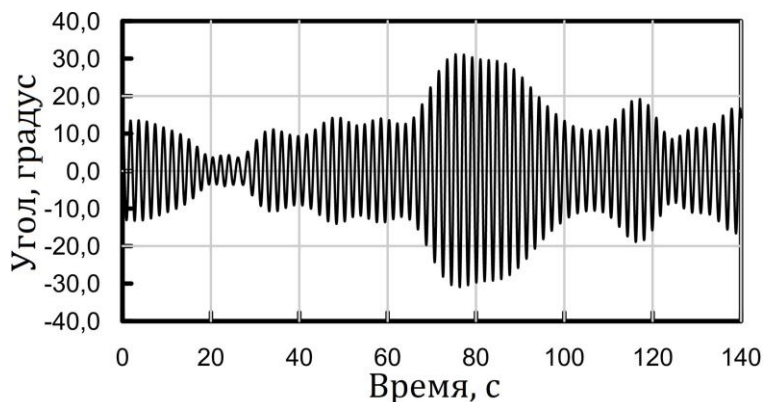
$$A_M = M\Delta\alpha,$$

где A_M – работа, $\text{Нм} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2} = \text{Дж}$; $\Delta\alpha$ – изменение углового положения модели в радианах за интервал опроса dt .

Затем мощность энергии колебаний определяется по выражению (5).

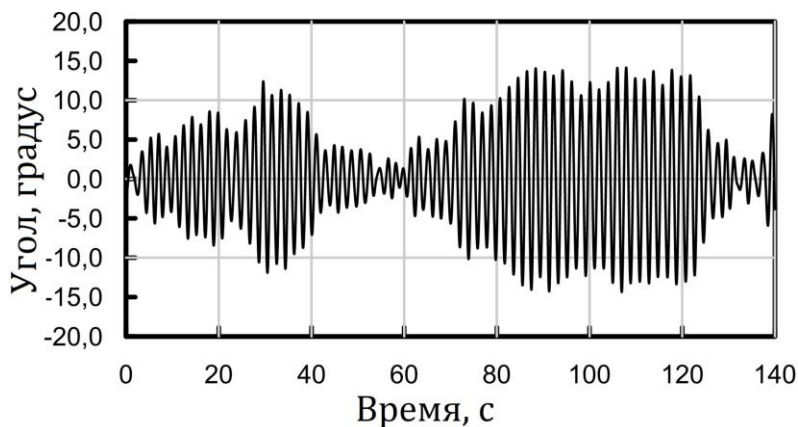
С использованием предложенного способа по зарегистрированным реализациям крена модели с шагом опроса 0,01 с была рассчитана средняя мощность качки модели за один период, которая составила 54,98 Вт. Значение мощности, приведенное к метру длины модели, составило 33,32 Вт/м. С учетом приведенной мощности подобранной волны, равной 6,26 Вт/м, гидродинамическая эффективность, рассчитанная в соответствии с определением, предложенным С. Солтером [10], составила 532 %. Такое большое значение гидродинамической эффективности объясняется несколькими факторами. Во-первых, амплитуда крена модели превышает амплитуду угла волнового склона в 20 раз. Во-вторых, мощность энергии угловой качки модели рассматривается на установившемся режиме резонансных колебаний. Таким образом, в расчетах не учитывается количество энергии, потребовавшееся на раскачку модели до максимальных углов крена. Более того, если рассмотреть только первые колебания модели, угловое отклонение которых не превышает угол волнового склона, то приведенная мощность, развиваемая моделью в таких условиях, составит всего 0,08 Вт/м, а гидродинамическая эффективность составит всего 1,33 %.

Кроме исследований на регулярном волнении, исследования гидродинамической эффективности были проведены в условиях нерегулярных волн. Для этого были подобраны два спектра Пирсона – Московича с одинаковым периодом спектрального максимума τ_p , равным 1,89 с, и значительными высотами волн h_s , равными 87,71 и 44,69 мм. Записи временной реализации бортовой качки модели на подобранных спектрах нерегулярного волнения, сделанные с шагом опроса 0,01 с, представлены на рис. 13 и 14.



Р и с. 13. Фрагмент записанной реализации бортовой качки модели в реальном времени при воспроизведении в бассейне нерегулярных волн со спектром № 1, имеющим $\tau_p = 1,89$ с, $h_s = 87,71$ мм

F i g. 13. Fragment of recorded realization of the model rolling in real time on irregular waves generated in the wave basin with spectrum No. 1 ($\tau_p = 1.89$ s, $h_s = 87.71$ mm)



Р и с. 14. Фрагмент записанной реализации бортовой качки модели в реальном времени при воспроизведении в бассейне нерегулярных волн со спектром № 2, имеющим $\tau_p = 1,89$ с, $h_s = 44,69$ мм

F i g. 14. Fragment of recorded realization of the model rolling in real time on irregular waves generated in the wave basin with spectrum No. 2 ($\tau_p = 1.89$ s, $h_s = 44.69$ mm)

Поскольку в спектре волн присутствует набор гармоник, то расчет мощности по выражению (4) представляется затруднительным, так как это выражение выведено для одной гармонике. Поэтому для оценки гидродинамической эффективности модели в условиях нерегулярного спектра волнения мощность волн рассчитывалась как средняя спектральная мощность волн $N_{\text{ср}}$ (Вт/м) на единицу длины волнового профиля по формуле [11]

$$N_{\text{ср}} = 490\tau_E h_s^2,$$

где τ_E – энергетический период волн, равный для спектра *JONSWAP* $0,9\tau_p$, для спектра Пирсона – Московича $0,86\tau_p$.

Для спектров № 1 и 2 нерегулярных волн в соответствии с реализациями рис. 13 и 14 мощность, приведенная к единице длины гребня волны, составила соответственно 4,90 и 1,30 Вт/м. Приведенная мощность энергии угловых колебаний модели составила 5,81 Вт/м для спектра № 1 и 1,91 Вт/м для спектра № 2. Гидродинамическая эффективность составила 119 и 148 % соответственно. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что гидродинамическая эффективность возрастает при уменьшении высот волн и сохранении периода пика спектрального максимума.

Полученные значения гидродинамической эффективности в условиях нерегулярного волнения ожидаемо оказались ниже значений, полученных на регулярных волнах, но все же составили более 100 %. Это объясняется тем, что период спектрального максимума обоих спектров подобранного волнения соответствовал периоду собственных колебаний модели. Это означает, что в спектрах присутствовало значительное количество волн, периоды которых были близки или соответствовали периоду собственным колебаниям модели. Эти волны и вызывали большую бортовую качку, поскольку проявлялся эффект резонанса, который хорошо виден на рис. 13 в районе 80-й секунды (качка в этот момент достигала 30°).

Следует отметить, что в условиях нерегулярных волн с периодами спектрального максимума, отличными от периода собственных колебаний модели, гидродинамическая эффективность резонансного ВПГ будет падать еще больше, поскольку эффект резонанса будет минимальным или отсутствовать вовсе. Угловая качка модели значительно уменьшится, поскольку модель будет стремиться совершать угловые колебания в соответствии с углами склонов набегающих волн. Гидродинамическая эффективность на волнах с периодами, отличными от периода собственных колебаний модели, будет зависеть от добротности колебаний модели, т. е. от высоты пика и ширины полосы резонанса.

Полученные экспериментальные результаты гидродинамической эффективности позволяют сравнить ВПГ, работающий на резонансном принципе работы с известной уткой Солтера [10], которая считается одной из наиболее эффективных конструкций преобразователя энергии волн. Преимущество утки Солтера заключается в том, что она имеет цилиндрическую форму с выступающей частью, которая имеет большой коэффициент демпфирования, что позволяет совершать угловые колебания под воздействием волны и создавать при этом большой крутящий момент между ее секциями для передачи его генератору. При этом оставшаяся цилиндрическая часть имеет минимальное сопротивление в воде и не препятствует угловому повороту утки под воздействием волн. Это позволяет ей собирать максимум энергии набегающих волн. Однако такая конструкция является и ее недостатком, поскольку утка повторяет угол волнового склона и эффект резонанса в такой конструкции практически не проявляется. Поэтому ее эффективность, определяемая по методике, предложенной в работе [10], не может превышать 100 %, в то время как эффективность резонансного ВПГ может быть выше.

Заключение

Из предложенных рассуждений видно, что энергия волн даже при волнении малой интенсивности очень значительна. Она существенно зависит от длины волны, а низкочастотные волны вносят основной вклад в суммарную энергию волн. С учетом того что первичным преобразователем энергии волн является корпус станции с ВПГ, его линейные размеры будут определять мощность собираемой энергии, которая зависит от длины волнового профиля. Качка станции с ВПГ преобразуется в электрическую энергию, и для увеличения КПД такого преобразования целесообразно использовать резонансные преобразователи энергии.

Использование бортовых колебаний волновых буев и плавучих станций для сбора волновой энергии в условиях резонансной качки эффективнее, чем использование их вертикальных колебаний, поскольку при резонансе угловые колебания могут существенно превышать угол волнового склона набегающих волн. Применение принципа управляемого резонанса в волновых абсорберах позволяет существенно увеличить эффективность их работы. Гидродинамическая эффективность предложенного устройства возрастает при уменьшении высот и периодов волн, что чрезвычайно важно для сбора энергии в условиях малого волнения.

Повышение КПД выработки энергии станцией с ВПГ на волнах большой интенсивности неминуемо приведет к необходимости увеличения прочности ее корпуса, так как увеличатся и нагрузки на него от набегающих волн. Увеличение прочности, в свою очередь, приведет к увеличению массы станции. Кроме этого, для определения КПД ВПГ необходимо учитывать влияние нагрузки электрического генератора, который может вносить значительное демпфирование и уменьшать бортовую качку.

Таким образом, для обеспечения максимальной эффективности выработки энергии необходимо подбирать параметры станций с ВПГ для каждого района эксплуатации с учетом среднестатистических параметров волнения. А подстройка частоты собственных колебаний станции позволит расширить диапазон величин КПД преобразования волновой энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Applied Soft Computing and Embedded System Applications in Solar Energy / R. K. Pachauri [et al.]. Boca Raton, USA : CRC Press, 2021. 254 p.
2. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для гидрографических исследований в Охотском море / Д. Н. Михайлов [и др.] // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 2. С. 4–13. EDN YLFSVL.
3. Modelling dynamic photovoltaic arrays for marine applications / J. Storey [et al.] // 2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). Trondheim, Norway, 2016. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/COMPEL.2016.7556720>
4. Design methodology for a SEAREV wave energy converter / M. Ruellan [et al.] // IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 25, iss. 3, P. 760–767. <http://doi.org/10.1109/TEC.2010.2046808>
5. Scaled development of a novel Wave Energy Converter through wave tank to utility-scale laboratory testing / K. Rhinefrank [et al.] // 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, CO, USA, 2015. P. 1–5. <http://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286008>

6. Wave tank testing of a pendulum wave energy converter 1:12 scale model / N. Pozzi [et al.] // International Journal of Applied Mechanics. 2017. Vol. 9, no. 2. 1750024. <http://doi.org/10.1142/S1758825117500247>
7. Clément A. H., Babarit A. Discrete control of resonant wave energy devices // Philosophical transactions of the Royal Society A. Mathematical, physical and engineering sciences. 2012. Vol. 370, iss. 1959. P. 288–314. <http://doi.org/10.1098/rsta.2011.0132>
8. Application of a simulation model for a heave type wave energy converter / S. Saeidtehrani [et al.] // Proceedings of the 12th European Wave and Tidal Energy Conference, 27th Aug –1st Sept 2017, Cork, Ireland. Cork (Ireland), 2017. 948. P. 1–8.
9. Линейные электрические машины возвратно-поступательного действия – типы и конструкции электрических машин / В. Б. Баль [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2015. Т. 148, № 5. С. 3–13.
10. Salter S. Wave energy: Nostalgic ramblings, future hopes and heretical suggestions // Journal of Ocean Engineering and Marine Energy. 2016. Vol. 2, iss. 4. P. 399–428. <https://doi.org/10.1007/s40722-016-0057-3>
11. Pastor J., Dou Y.-Q., Liu Y. Wave energy resource analysis for use in wave energy conversion // Proceedings of the 36th Industrial Energy Technology Conference (IETC 2014). New Orleans, USA, 2014.

Об авторах:

Грязин Дмитрий Геннадиевич, главный метролог АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30), профессор факультета систем управления и робототехники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО» (197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А), доктор технических наук, **SPIN-код: 3914-7387, ORCID ID: 0000-0003-3562-6815, Scopus Author ID: 25638150600, volnagd@yandex.ru**

Глеб Константин Андреевич, главный технолог ПАО «Газпром» (197229, Санкт-Петербург, Лахтинский проспект, д. 2, корп. 3, стр. 1), кандидат технических наук, **SPIN-код: 5681-0690, ORCID ID: 0000-0003-4914-3603, Scopus Author ID: 57214354068**