

Раздел 3. Инженерное обеспечение

УДК: 621.311.25:532.59 DOI: 10.37279/2413-1873-2021-21-91-96

КОЛЕБАНИЕ ПОПЛАВКА ЭНЕРГОАГРЕГАТА НА ПОВЕРХНОСТИ ВОЛН

Бекиров Э. А.¹, Каркач Д. В.² Мургазаев Э. Р.³

Физико-технический институт КФУ им. В. И. Вернадского,
295007, Республика Крым, г. Симферополь, просп. Академика Вернадского, д. 4.
E-mail: ¹bekirov.e.a@cfuv.ru, ²karkach.d.v@cfuv.ru, ³ennan_sam@mail.ru

Аннотация. Одной из актуальных задач использования ВИЭ является использование энергоагрегата для преобразования энергии морских волн в электрическую энергию. Важным элементом процесса проектирования волновой электростанции является проведение математического моделирования ее работы при различных условиях ее работы для определения выходной мощности и проведения технико-экономического анализа. В основе процесса преобразования энергии морских волн в электрическую энергию для предложенного типа волновой электростанции лежат вынужденные вертикальные колебания поплавка энергоагрегата, вызванные морским волнением. Математическая модель поведения поплавка, соединенного с генератором, основывается на интегро-дифференциальном уравнении вынужденных колебаний и дает возможность определить динамику его колебаний и сделать вывод о мощности, снимаемой с подключенного к поплавку генератора. В статье приводятся расчеты динамики поплавка, соединенного с генератором, уравнение волны, интегро-дифференциальное уравнение колебаний поплавка, проведено моделирование набегающей волны и поплавкового энергоагрегата. Данные о длине, периоде и высоте волн в Черном море у побережья Крыма использованы по данным официальных прогнозов и наблюдений.

Ключевые слова: поплавок; длина волны; скорость волны; высота волны; вынужденные колебания поплавка.

ВВЕДЕНИЕ

Потребление электроэнергии во многих странах растет с каждым годом и ввиду обеспечения экологической безопасности всех стран актуальным является использование энергоагрегатов возобновляемой энергетики. Одним из перспективных энергоагрегатов являются энергоагрегаты преобразования энергии морских волн в электрическую энергию. Потенциал энергии морских волн очень высок и по оценкам, приводимым в источниках может составлять до 146 ТВт·ч/год [1].

Математическое описание движения поплавка энергоагрегата на поверхности моря при различных параметрах морских волн представляет собой сложный процесс, связанный с взаимодействием образующего волны ветра с поверхностью воды, изменением периодичности, скорости и амплитуды волны, движением волны не в одной плоскости, не по синусоидальному закону и не по трохоиде. Изменение частоты и фазы волн может привести к модулированным волнам, параметры которых могут значительно отличаться. Такие выводы сделаны на основании данных о батиметрии Крыма скорости и направлении ветра и морских волн. Можно проанализировать эффективность применения данного вида возобновляемых источников энергии и сравнить с другими вариантами [2].

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

На настоящий момент существуют различные методы и устройства для преобразования энергии морских волн [3-11]. Одним из таких методов является использование поплавков – элементов,

совершающих колебательные движения в вертикальном или горизонтальном направлении в зависимости от конструкции. Различают конструкции, когда применяются поплавки в виде уток Солтера, волнового плота Коккереля. Существует разновидность устройств, в которых для генерации электроэнергии используется движение воды, перемещающейся внутри камеры. Часто применяются турбины Уэллса [14].

Метод получения электроэнергии характерен для электростанций с осциллирующим водяным столбом [12] и пульсирующим водяным столбом Массуды. В различных исследованиях предлагаются варианты размещения [13] и конструкции [14] турбин Уэллса для увеличения эффективности их работы [15].

Для устройств преобразования энергии морских волн, необходимо провести оценку технического потенциала и экономической целесообразности сооружения [16-19]. При оценивании эффективности работы энергоагрегата учитываются параметры поплавка и исходные данные, так аппроксимации численной волновой модели [20].

Акуленко и Байдулов в [21] рассмотрели характеристики динамики поплавка эллиптической формы с помощью интегро-дифференциального уравнения для случая колебаний на границе двух несжимаемых жидкостей и определили характеристики затухания и изменения частоты.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью исследования является анализ динамики поплавка, соединенного с генератором, составленного дифференциального уравнения

вынужденных колебаний поплавок и моделирование работы энергоагрегата при различных параметрах морских волн. На основе полученных результатов можно делать выводы по использованию конструкций энергоагрегатов.

Проведем анализ колебаний поплавок, соединенного с генератором. Примем, что поплавок имеет форму куба с длиной и шириной, равной L и высотой h (рис.1). За исходные данные возьмем $L = 1\text{ м}$, $h = 1\text{ м}$. Приняв, что поплавок в виде полого куба изготовлен из листовой стали с толщиной стенок,

равной 5 мм получим массу 234 кг. Глубина погружения в спокойной воде определяется равенством сил тяжести и Архимеда и определяется по формуле

$$a = \frac{m}{\rho L^2}, \quad (1)$$

Которая после подстановки данных дает $a=0,234\text{ м}$.

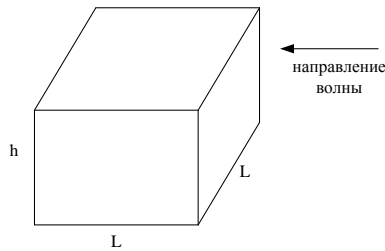


Рис.1. Геометрия поплавок
Fig. 1. Float geometry

Высота центра поплавок y_0 над уровнем спокойной воды $y_0 = \frac{h}{2} - a = 0.266\text{ м}$

Для целей численного моделирования принимаем параметры всех морских волн одинаковыми и равными: длина волны $\lambda = 20\text{ м}$, скорость волны $\mathcal{G} = 4\text{ м/с}$, амплитуда волны (высота) $H=1\text{ м}$, период волны тогда составит $T = \frac{\lambda}{\mathcal{G}} = 5\text{ с}$.

Профиль волны считаем синусоидальным, соответствующее уравнение будет иметь вид:

$$y_e(x,t) = H \left| \sin \left(\omega \left(t + \frac{x}{\mathcal{G}} \right) \right) \right|, \quad (2)$$

где y_e – высота волны в точке с координатой x .

На поплавок, погруженный в воду, при набегании волны действует переменная сила Архимеда. На рисунке 2 показан поплавок, погруженный в воду и находящийся под действием волны. Набегающая волна закрывает часть боковой поверхности поплавок, показанную на рисунке 2 штриховкой.

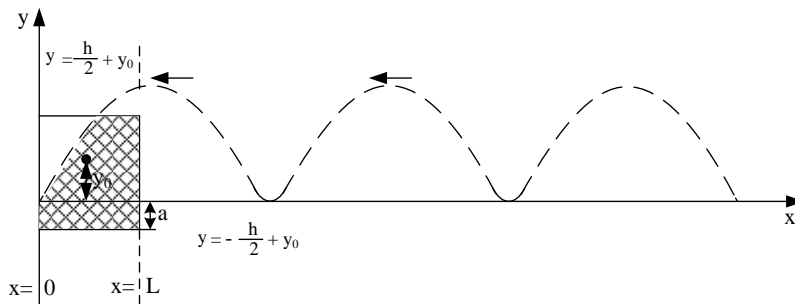


Рис.2. Поплавок, находящийся под воздействием набегающих морских волн
Fig. 2. Float under the influence of incoming sea waves

Произведем расчет переменной силы Архимеда, действующей на поплавок. Расчет высоты $l(x)$ боковой части поверхности поплавок, находящейся под водой, проводится через кусочно-заданную функцию:

$$l(x,y,t) = \begin{cases} y_e(x,t) + \frac{h}{2} - y, & \text{при } \frac{h}{2} + y \geq y_e(x,t) \\ h, & \text{при } \frac{h}{2} + y < y_e(x,t) \end{cases}, \quad (3)$$

где y – координата центра масс поплавок.

Площадь боковой поверхности поплавок, погруженной в воду, определяется по формуле:

$$S(y,t) = \int_0^L l(x,y,t) dx. \quad (4)$$

Объем части поплавок, погруженной в воду

$$V_{II}(y,t) = S(y,t) \cdot L. \quad (5)$$

Тогда переменная сила Архимеда, действующая на поплавок

$$F_A(y, t) = \rho g V_{\Pi}(y, t), \quad (6)$$

где $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды, $g = 10 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Интегро-дифференциальное уравнение вынужденных колебаний поплавок представляет собой второй закон Ньютона. На поплавок действуют:

1. Сила Архимеда, $F_A(y, t)$;
2. Сила тяжести, $F_T = mg$;
3. Сила сопротивления со стороны воды, пропорциональная вертикальной относительной скорости поплавок относительно воды

$$F_C = -h \mathcal{G}_{\text{отн}} = -h \left(\frac{dy}{dt} - \frac{dy_{\text{в}}}{dt} \right);$$

4. Сила сопротивления, связанная с подключенным к поплавок механизмом генератора электрического тока F_g .

Результирующая сила, действующая на поплавок, определяется выражением:

$$F = F_A(y, t) - mg - h \left(\frac{dy}{dt} - \frac{dy_{\text{в}}}{dt} \right) - F_g. \quad (7)$$

Так как, согласно второму закону Ньютона,

$$F = m \frac{d^2 y}{dt^2}, \text{ то получим:}$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_A(y, t) - mg - h \left(\frac{dy}{dt} - \frac{dy_{\text{в}}}{dt} \right) - F_g. \quad (8)$$

Таким образом, вынужденные колебания поплавок описываются интегро-дифференциальным уравнением, в котором $F_A(y, t)$ определяется функцией, заданной кусочно. Решение этого уравнения было построено в программе MathCad.

Так как относительная скорость колебаний поплавок $\mathcal{G}_{\text{отн}} = \frac{dy}{dt} - \frac{dy_{\text{в}}}{dt}$ относительно воды невелика, то сила сопротивления будет пропорциональна относительной скорости и ее можно определить по формуле Стокса:

$$F_C = 6\pi r \eta \mathcal{G}_{\text{отн}}, \quad (9)$$

где r – линейный размер поплавок, η – динамическая вязкость воды.

Таким образом, коэффициент пропорциональности $h = 6\pi r \eta$.

Согласно принятой кинематической модели, мощность генератора, подключенного к рассматриваемому поплавок, составит 100 Вт. Так как вертикальные скорости, развиваемые при колебаниях, составляют порядка 1 м/с, то для снятия такой мощности необходимо нагрузить поплавок силой сопротивления $F_g = 100 \text{ Н}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Решение итегро-дифференциального уравнения математической модели проводилось в программе MathCad. Промежуток времени интегрирования составлял 30 с. Для проверки модели был проведен расчёт динамики поплавок, выведенного из равновесного положения в спокойной воде. Результаты расчетов представлены на рис 3. Из графика видно, что поплавок совершает затухающие колебания со средним логарифмическим декрементом 0,5.

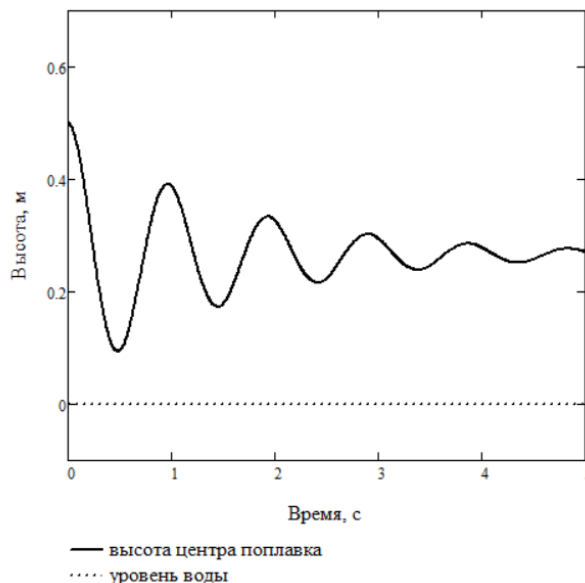


Рис. 3. Динамика колебаний поплавок в спокойной воде.
Fig. 3. Dynamics of float oscillations in calm water.

Динамика вынужденных колебаний поплавок при наличии набегающих волн приведена на рис. 4. Из рисунка видно, что колебания поплавок складываются из колебаний, связанных с

набегающими волнами и из малоамплитудных колебаний меньшего периода, связанных с инертностью самого поплавок.

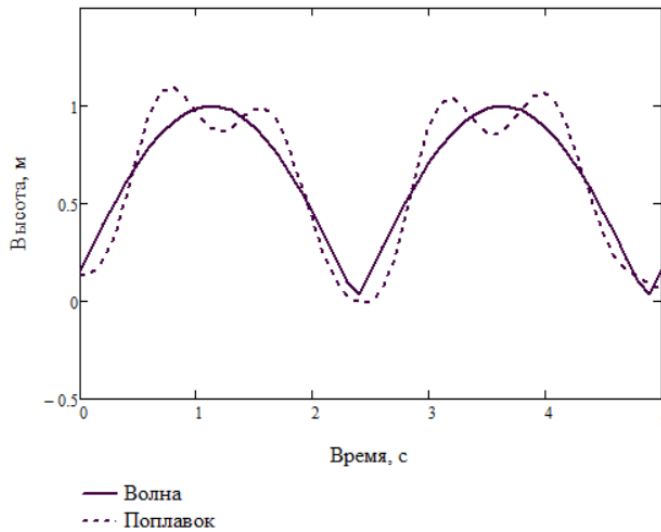


Рис. 4. Динамика вынужденных колебаний поплавок
Fig. 4. Dynamics of forced oscillations of the float

Так как мощность $P = \frac{dA}{dt}$, то работа $dA = P \cdot dt$. Тогда работа, выполненная генератором за период волны:

$$A = \int_0^T P \cdot dt.$$

Мощность, снимаемая с поплавок прямо пропорциональна его вертикальной скорости в соответствии с выражением $P = F_g \cdot \dot{y} = F_g \dot{y}$, тогда механическая работа за один период составит:

$$A = \int_0^T F_g \dot{y} \cdot dt.$$

Тогда средняя механическая мощность

$$P_c = \frac{1}{T} \int_0^T F_g \dot{y} \cdot dt.$$

Согласно расчетам в программе MathCad средняя механическая мощность за один период составляет $P_c = 96.5$ Вт.

ВЫВОДЫ

Согласно построенной математической модели вынужденных колебаний поплавок кубической формы установлено, что при типичных параметрах морских волн в Черном море энергоагрегат с рассмотренными параметрами способен генерировать мощность до 96,5 Вт. Это делает его применение рентабельным, учитывая тот факт, что волны с рассмотренными параметрами встречаются

в Черном море повсеместно в течение большей части года, а зачастую и превосходят их, что позволяет применять энергоагрегаты большей мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шулейкин, В. Ш. Физика моря. М.: Наука, 1968. – 1090 с.
2. Sami Salama Hussen Hajjaj, A.F.B.A. Nazri. Simulated analysis and review of ocean wave power generators. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (4.35) (2018) 1-4.
3. Tianyu Zhang, Xinyu You. Application of wave power generation technology. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 242 (2019) 022006.
4. Per Holmberg, Magnus Andersson, Bjorn Bolund, Kerstin Strandanger. *Wave Power. Surveillance study of the development*, Elforsk, 2011. P. 47.
5. James R Joubert, Johannes L van Niekerk, Josh Reinecke, Imke Meyer. *Wave Energy Converters (WECs)*. Centre for Renewable and Sustainable Energy Studies, 2013. P. 95.
6. Rafael Waters, 2008. *Energy from Ocean Waves. Full Scale Experimental Verification of a Wave Energy Converter*. Acta Universitatis Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 580. 130 pp. Uppsala.
7. Peter Meisen, Alexandre Loiseau, 2009. *Ocean Energy Technologies For Renewable Energy Generation*. Global Energy Network Institute. 27 p.

8. António F. O. Falcão, 2014. Modelling of Wave Energy Conversion. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. 38 p.
9. Markel Penalba and John V. Ringwood, 2016. A Review of Wave-to-Wire Models for Wave Energy Converters. *Energies*. doi:10.3390/en9070506.
10. B. Drew, A.R. Plummer, and M.N. Sahinkaya (2016) "A review of wave energy converter technologies" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. Vol 223, Issue 8, pp. 887-902.
11. Lafsah M, Ibrahim M, & Albani A, "The Development of Wave Energy Conversion Device to Generate Electricity", *AMM*, Vol.773-774, (2015), pp:460-464.
12. Muetze, J.G. Vining. *Ocean Wave Energy Conversion – A Survey*. IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), 2006. Vol. 3: 1410 – 1417.
13. Shun Okamoto, Toshiaki Kanemoto, Bin Huang, Toshihiko Umekage. Counter-Rotating Type Wells Runners for Floating Wave Power Station. Conference: AFORE 2014, At Yeosu, 2014.
14. Rahmat Saptono. Selection of Materials for the Aerofoil Blades of a Wells Turbine Operated in an Oscillating Water Column (OWC) Wave Power Station. The 7th International Conference Quality in Research (QIR) 2004, At Depok
15. Shun Okamoto, Tatsuya Kinoshita, Toshiaki Kanemoto. Floating Type Ocean Wave Power Station at Various Wave Circumstances. The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, 17-22 June, Rhodes, Greece, 2012.
16. Janis Berins. Technical analysis of the economic viability of sea wave power stations. 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2016.
17. Kanchana Amarasekara, Gayan Abeynayake, Manjula Fernando, Atputharajah Arulampalam. A prefeasibility study on ocean wave power generation for the southern coast of Sri Lanka: Electrical feasibility. *International Journal of Distributed Energy Resources and Smart Grids*. Volume 10 Number 2 (2014). Pages 79 – 93.
18. Md. Mahbubur Rahman, Nirupom Paul, Md. Saiful Islam, Md. Sa fi Rashed, Shahr ior Ahmed, 2013. Power Generation from Sea Wave: An Approach to Create Renewable Energy. *Global Journal of Researches in Engineering*. General Engineering, Volume 13 Issue 1. P. 12-17.
19. F. Danang Wijaya and B. Azhari, "Analytical design and optimization of flat-quasi linear generator for sea wave power plant in South Java Ocean," 2016 8th Int. Conf. on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Yogyakarta, 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICITEED.2016.7863276
20. John Kaldellis, Theodoris Chrysikos. Wave energy exploitation in the Ionian Sea Hellenic coasts: spatial planning of potential wave power stations. *International Journal of Sustainable Energy*, 2018. 38(4):1-21.
21. Акуленко Л.Д., Байдулов В.Г. Экстремальные свойства колебаний поплавок эллиптической формы // Доклады Академии наук. – 2019. – Т.487. – №2. – С. 140-143. doi: 10.31857/S0869-56524872140-143

REFERENCES

1. Shuleikin, V. Sh. *Physics of the Sea*. Moscow: Nauka, 1968. – 1090 p.
2. Sami Salama Hussen Hajjaj, A.F.B.A. Nazri. Simulated analysis and review of ocean wave power generators. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (4.35) (2018) 1-4.
3. Tianyu Zhang, Xinyu You. Application of wave power generation technology. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 242 (2019) 022006.
4. Per Holmberg, Magnus Andersson, Bjorn Bolund, Kerstin Strandanger. *Wave Power. Surveillance study of the development*, Elforsk, 2011. P. 47.
5. James R Joubert, Johannes L van Niekerk, Josh Reinecke, Imke Meyer. *Wave Energy Converters (WECs)*. Centre for Renewable and Sustainable Energy Studies, 2013. P. 95.
6. Rafael Waters, 2008. Energy from Ocean Waves. Full Scale Experimental Verification of a Wave Energy Converter. *Acta Universitatis Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology* 580. 130 pp. Uppsala.
7. Peter Meisen, Alexandre Loiseau, 2009. *Ocean Energy Technologies for Renewable Energy Generation*. Global Energy Network Institute. 27 p.
8. António F. O. Falcão, 2014. Modelling of Wave Energy Conversion. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. 38 p.
9. Markel Penalba and John V. Ringwood, 2016. A Review of Wave-to-Wire Models for Wave Energy Converters. *Energies*. doi:10.3390/en9070506.
10. B. Drew, A.R. Plummer, and M.N. Sahinkaya (2016) "A review of wave energy converter technologies" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. Vol 223, Issue 8, pp. 887-902.
11. Lafsah M, Ibrahim M, & Albani A, "The Development of Wave Energy Conversion Device to Generate Electricity", *AMM*, Vol.773-774, (2015), pp:460-464.
12. Muetze, J.G. Vining. *Ocean Wave Energy Conversion – A Survey*. IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), 2006. Vol. 3: 1410 – 1417.
13. Shun Okamoto, Toshiaki Kanemoto, Bin Huang, Toshihiko Umekage. Counter-Rotating Type Wells Runners for Floating Wave Power Station. Conference: AFORE 2014, At Yeosu, 2014.
14. Rahmat Saptono. Selection of Materials for the Aerofoil Blades of a Wells Turbine Operated in an Oscillating Water Column (OWC) Wave Power Station. The 7th International Conference Quality in Research (QIR) 2004, At Depok

15. Shun Okamoto, Tatsuya Kinoshita, Toshiaki Kanemoto. Floating Type Ocean Wave Power Station at Various Wave Circumstances. The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, 17-22 June, Rhodes, Greece, 2012.

16. Janis Berins. Technical analysis of the economic viability of sea wave power stations. 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2016.

17. Kanchana Amarasekara, Gayan Abeynayake, Manjula Fernando, Atputharajah Arulampalam. A prefeasibility study on ocean wave power generation for the southern coast of Sri Lanka: Electrical feasibility. International Journal of Distributed Energy Resources and Smart Grids. Volume 10 Number 2 (2014). Pages 79 – 93.

18. Md. Mahbubur Rahman, Nirupom Paul, Md. Saiful Islam, Md. Sa fi Rashed, Shahr ior Ahmed, 2013. Power Generation from Sea Wave: An Approach to

Create Renewable Energy. Global Journal of Researches in Engineering. General Engineering, Volume 13 Issue 1. P. 12-17.

19. F. Danang Wijaya and B. Azhari, "Analytical design and optimization of flat-quasi linear generator for sea wave power plant in South Java Ocean," 2016 8th Int. Conf. on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Yogyakarta, 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICITEED.2016.7863276

20. John Kaldellis, Theodoris Chrysikos. Wave energy exploitation in the Ionian Sea Hellenic coasts: spatial planning of potential wave power stations. International Journal of Sustainable Energy, 2018. 38(4):1-21.

21. Akulenko L.D., Baydulov V.G. Extreme properties of oscillations of an elliptical float // Doklady Akademii Nauk. – 2019. – T.487. – No. 2. – P. 140-143. doi: 10.31857/S0869-56524872140-143

POWER UNIT FLOAT OSCILLATION ON THE SURFACE OF THE WAVES

Bekirov E.A., Karkach D.V., Murtazaev E.R.

Physics and Technology Institute V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
295007, Republic of Crimea, Simferopol, p. Vernadsky, 4.

Abstract. One of the urgent tasks of using renewable energy sources is the use of a power unit for converting the energy of sea waves into electrical energy. An important element of the design process of a wave power plant is to carry out mathematical modeling of its operation under various operating conditions to determine the output power and conduct a feasibility study. The process of converting the energy of sea waves into electrical energy for the proposed type of wave power plant is based on forced vertical oscillations of the power unit's float caused by sea waves. The mathematical model of the behavior of the float connected to the generator is based on the integro-differential equation of forced oscillations and makes it possible to determine the dynamics of its oscillations and draw a conclusion about the power taken from the generator connected to the float. The article presents the calculations of the dynamics of the float connected to the generator, the wave equation, the integro-differential equation of the float oscillations, the modeling of the incident wave and the float power unit is carried out. Data on the length, period and height of waves in the Black Sea off the coast of Crimea are used according to official forecasts and observations.

Key words: float; wavelength; wave speed; wave height; forced vibrations of the float.