

Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

УДК 626/627:621.22:542.45

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-55-63>



ТЕХНОЛОГИЯ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ МОРСКИХ ВОЛН В ВИДЕ ЖИДКОГО ВОЗДУХА, ЛЬДА И ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ

В.В. Миронов¹, Ю.А. Иванюшин²✉, И.Ю. Шалагин³, А.А. Кадысева⁴

^{1,2,3} Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет»; г. Тюмень, Российская Федерация

⁴ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; г. Москва, Российская Федерация

¹ vvmironov@list.ru; ORCID: 0000-0001-8939-850X

² ivanjushinja@tyuiu.ru; ORCID: 0000-0002-4470-6967

³ shalaginij@tyuiu.ru

⁴ kadyseva@mail.ru; ORCID: 0000-0001-8703-5684

Аннотация. Цель исследований – разработка технологии аккумулирования возобновляемой энергии морских волн в виде сжиженного воздуха, льда и горячей воды. Тип исследований – теоретико-прикладной; использовались аналитические зависимости и численное моделирование предложенной схемы преобразования энергии. Предлагается модульная система на основе сильфонного насоса-компрессора, который приводится в действие бум с полиспастом (позволяет удвоить ход рабочего органа), реагирующим на движение волн. Полученная пневматическая энергия последовательно преобразуется в тепло (горячая вода), холод (лед) и механическую работу для сжижения воздуха. Выполнен гипотетический расчет по аналитическим зависимостям для высоты волн от 0,2 до 1,0 м при глубине погружения компрессора 30 м и периоде волны 4 с. Результаты исследований свидетельствуют о том, что модульная установка способна генерировать до 80 л/ч горячей воды, 14 кг/ч льда и около 7,5 кг/ч сжиженного воздуха (при высоте морской волны, равной 1 м). Одними из преимуществ являются его модульность, экологичность и возможность тригенерации. В результате исследований сделан вывод о том, что технология позволяет в локальном масштабе обеспечивать объекты некапитального строительства коммунальными и энергетическими ресурсами: тепловой энергией (горячая вода), холодом (лед), а также получать сжиженный воздух для хранения энергии. Механическая мощность второго детандера может быть преобразована в электричество. Решение является эффективным в зонах с неразвитой инфраструктурой (удаленных или изолированных территорий) при высоте волн от 0,2 м.

Ключевые слова: насос-компрессор, энергия морских волн, генерация, электрогенератор, возобновляемая энергия, сжатый воздух, системы жизнеобеспечения

Формат цитирования: Миронов В.В., Иванюшин Ю.А., Шалагин И.Ю., Кадысева А.А. Технология аккумулирования энергии морских волн в виде жидкого воздуха, льда и горячей воды. Природообустройство. 2026;Т.19(2):55-63. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-55-63>

Original article

TECHNOLOGY FOR ACCUMULATING THE ENERGY OF SEA WAVES IN THE FORM OF LIQUID AIR, ICE AND HOT WATER

V.V. Mironov¹, Yu.A. Ivanyushin^{2✉}, I.Yu. Shalagin³, A.A. Kadyseva⁴^{1,2,3}“Tyumen Industrial University”; Tyumen, Russian Federation⁴Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev”; Russian Federation¹vvmironov@list.ru; ORCID: 0000-0001-8939-850X²ivanjushinja@tyuiu.ru; ORCID: 0000-0002-4470-6967³shalaginij@tyuiu.ru⁴kadyseva@mail.ru; ORCID: 0000-0001-8703-5684

Abstract. The aim of the research is to develop a technology for accumulating renewable energy from sea waves in the form of liquefied air, ice and hot water. **Methodology.** The type of research is theoretical and applied. Analytical dependencies and numerical simulation of the proposed energy conversion scheme were used. A modular system is proposed, based on a bellows pump-compressor driven by a buoy with a pulley system (which doubles the stroke of the working element) that responds to wave motion. The resulting pneumatic energy is successively converted into: heat (hot water), cold (ice), mechanical work for air liquefaction. A hypothetical calculation was performed using analytical dependencies for wave heights ranging from 0,2 to 1,0 m, with a compressor submersion depth of 30 m and a wave period of 4 sec. **Results.** The modular unit is capable of generating up to 80 l/h of hot water, 14 kg/h of ice, and approximately 7,5 kg/h of liquefied air (at a sea wave height of 1 m). One of the key advantages is its modularity, environmental friendliness, and the ability to perform trigeneration. **Conclusion.** The technology enables the local provision of utility and energy resources for non-capital construction facilities: thermal energy (hot water), cold (ice), as well as the production of liquefied air for energy storage. The mechanical power of the second expander can be converted into electricity. This solution is effective in areas with underdeveloped infrastructure (remote or isolated territories) at wave heights of 2 m and above.

Keywords: pump-compressor, wave energy, generation, electric generator, renewable energy, compressed air, life support systems

Format of citation: Mironov V.V., Ivanyushin Yu.A., Shalagin I.Yu., Kadyseva A.A. Technology for accumulating the energy of sea waves in the form of liquid air, ice and hot water. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(2):55-63. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-55-63>

Введение. В мировом энергетическом балансе имеется тенденция к увеличению доли возобновляемых источников (ВИЭ). При этом для обеспечения беспрепятственного освоения ВИЭ требуются не только повышение конкурентоспособности, но и обеспечение надежности систем, и создание защитных систем охраны окружающей среды. Серьезным препятствием для большего применения различных видов ВИЭ являются высокие начальные инвестиционные затраты. Кроме того, до сих пор имеет место низкий начальный уровень доверия со стороны инвесторов, правительств и потребителей. Применение технологий на основе ВИЭ становится обоснованным в локальном масштабе, там, где нет возможностей для расширения зон централизованного энергоснабжения, поскольку имеют место удаленность и малые нагрузки населенных пунктов. В существующих условиях можно наблюдать мировой тренд относительно децентрализации энергетики [1-4]. Например, все большее количество потребителей заинтересованы

в установке оборудования для нужд теплоснабжения в границах рассматриваемых объектов [5].

Кроме того, наметилась тенденция при формировании локальных энергосистем их создания на основе модульных компонентов. Это дает возможность относительно легкого наращивания мощностей систем и повышения их производительности [4, 6].

По различным оценкам, глобальный энергетический потенциал морских волн может достигать 32 тыс. ТВт·ч/год (до 16 тыс. ТВт·ч/год с учетом направления волн) [7, 8]. Суммарная протяженность мировой береговой линии составляет около 800 тыс. км. При этом в 2% этой протяженности плотность волнового течения составляет более 30 кВт/м, что дает предполагаемый глобальный технический потенциал волнового течения около 500 ГВт электроэнергии (с эффективностью преобразования 40%).

Эффективные с точки зрения технико-экономических параметров места размещения объектов преобразования волновой энергии можно

найти по всему миру [7, 9]. В то же время фактические волновые режимы значительно различаются в разных регионах мира [8, 9].

С другой стороны, проблема аккумуляции энергии сейчас является одной из ключевых для всей мировой энергетики. Ведется поиск решений по хранению энергии малых мощностей и простых с инженерной точки зрения. Например, в строительстве новых гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) ежегодно вкладывается около 7...10 млрд долл. США [10].

В противовес ГАЭС в мире ведутся разработки и строительство накопителей энергии на сжатом воздухе [11, 12]. Так, сегодня Китайская Народная Республика ускоряет разработку проектов по хранению энергии на сжатом воздухе (CAES). В конце сентября 2022 г. уже запущена система хранения энергии на сжатом воздухе. К 2030 г. КНР планирует хранить до 1/4 избыточной энергии в виде сжатого воздуха [13].

С использованием различных инновационных технологий из энергии морских волн можно получить электрическую, тепловую, механическую энергию [14] для перекрытия потребностей различных отраслей народного хозяйства. Внедрение схем тригенерации энергии [15-17] из различных возобновляемых источников является распространенным способом повышения эффективности разрабатываемых технологий.

В статье предлагается использовать возобновляемую энергию морских волн высокой обеспеченности и повторяемости для автономного жизнеобеспечения объектов капитального и некапитального строительства – в частности, для получения горячей воды и льда (как источника холода), а также для хранения энергии в виде сжатого сжиженного воздуха.

Цель исследований: разработка технологии аккумуляции возобновляемой энергии морских волн в виде сжиженного воздуха, льда и горячей воды.

Материалы и методы исследований. Технические решения, разработанные коллективом авторов (Тюменский индустриальный университет, ООО «ЭЛЕКТРОРАМ»), позволяют преобразовывать энергию морских волн в пневматическую мощность. Из полученной пневматической мощности с использованием известных технологий можно генерировать тепло, холод или электрическую энергию для жизнеобеспечения объектов капитального и некапитального строительства в прибрежной зоне морских акваторий, в том числе сельскохозяйственных сооружений. Одно из разработанных авторами технических решений представляет собой сальфонный

насос-компрессор (патент РФ № 2817577) [14], приводимый в работу бумом с положительной плавучестью, способным подстраиваться под изменяющийся уровень морской акватории под действием приливно-отливных или нагонных ветровых явлений. Схема насоса-компрессора представлена на рисунке 1.

Сальфонный насос-компрессор содержит всасывающий и нагнетательный клапаны, рабочую камеру, образованную соединенными между собой сальфонными элементами, закрытыми с одной стороны подвижной стенкой, а с другой стороны – неподвижным днищем. Сальфонные элементы снабжены кольцами жесткости для предотвращения их деформации под действием гидростатического давления воды на глубине установки рабочей камеры. К неподвижному днищу внутри рабочей камеры крепится твердый цилиндр. Цилиндр является поршнем воздушного компрессора. К неподвижному днищу рабочей камеры крепится плунжер водяного насоса высокого давления, входящий в корпус водяного насоса, прикрепленный к подвижной стенке рабочей камеры. Всасывающий и нагнетательный клапаны воздушного компрессора размещены на подвижной стенке рабочей камеры. Водяной насос позволяет получать гидравлическую энергию высокого давления – например, для питания обратноточеских установок для опреснения морской воды или питания систем капельного орошения сельскохозяйственных предприятий. Принцип действия сальфонного насоса-компрессора изложен в работах [14, 18].

Техническое решение способствует использованию возобновляемой энергии морских волн для параллельной генерации гидравлической и пневматической энергии, что позволяет исключить загрязнение окружающей среды парниковыми газами. Полученную гидравлическую энергию морской воды с высоким давлением можно использовать в обратноточеских установках для опреснения морской воды, преобразовывать в тепловую энергию и энергию холода в теплообменниках и детандерных установках.

Привод насоса-компрессора от энергии морских волн осуществляется согласно другому техническому решению (патент РФ № 2813520). Подробное описание работы изобретения представлено в описании патента [19].

При волнении поверхности акватории буй совершает возвратно-поступательные движения вверх и вниз. При движении буя вверх происходит перемещение вверх намотанных на барабан тросов на высоту морской волны. За счет блока, жестко связанного с донным фиксатором,

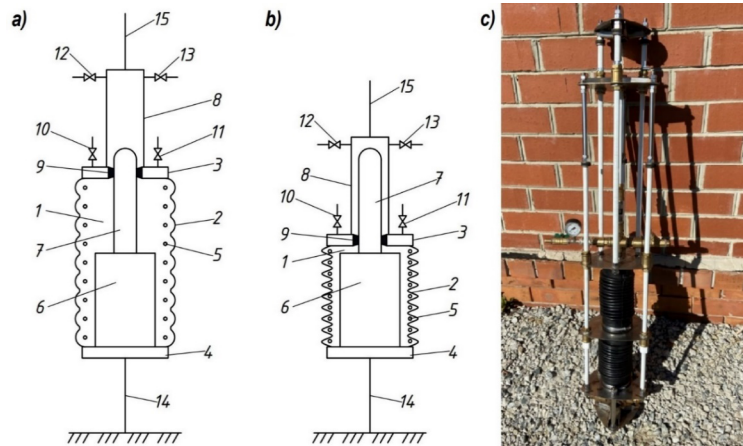


Рис. 1. Схема сифонного насоса-компрессора и общий вид прототипа:

а) положение на гребне волны; б) положение во впадине волны; в) общий вид прототипа сифонного насоса-компрессора (1 – рабочая камера; 2 – сифонные элементы из эластичного теплоизоляционного материала с низкой теплопроводностью; 3 – подвижная стенка рабочей камеры; 4 – неподвижное днище рабочей камеры; 5 – кольца жесткости; 6 – твердый или жидкий цилиндр, являющийся поршнем воздушного компрессора и уменьшающий образование мертвого объема в рабочей камере компрессора; 7 – плунжер водяного насоса; 8 – корпус водяного насоса; 9 – уплотнение плунжера водяного насоса; 10 – всасывающий клапан воздушного компрессора; 11 – нагнетательный клапан воздушного компрессора; 12 – всасывающий клапан водяного насоса; 13 – нагнетательный клапан водяного насоса; 14 – трос, соединяющий неподвижное днище рабочей камеры с дном акватории моря; 15 – трос, соединяющий корпус водяного насоса с плавучим буюм, снимающим энергию морских волн)

Fig. 1. Scheme of the nickname-compressor pump and the general type of prototype

а) position on the crest of the wave; б) the situation in the hollow of the wave; в) the general view of the prototype of the bellows-compressor pump: 1 – working chamber; 2 – bellows elements made of elastic heat-insulating material with low thermal conductivity; 3 – mobile wall of the working chamber; 4 – a fixed bottom of the working chamber; 5 – stiffeners; 6 – a solid or liquid cylinder, which is a piston of the air compressor and reducing the formation of a dead volume in the compressor working chamber; 7 – water pump plunger; 8 – water pump body; 9 – compaction of the plunger of the water pump; 10 – absorption valve of the air compressor; 11 – the injection valve of the air compressor; 12 – absorption valve of the water pump; 13 – the injection valve of the water pump; 14 – cable connecting the motionless bottom of the working chamber with the bottom of the sea; 15 – cable connecting the body of a water pump to a floating buoy that relieves the energy of sea waves

вертикальное перемещение рабочего органа насоса-компрессора будет в 2 раза больше высоты морской волны, что обеспечивает повышение производительности насоса-компрессора.

Представленное решение способно работать при малой высоте волны – от 0,2 м. Принципиальная схема преобразования и аккумуляции возобновляемой энергии морских волн в полезную мощность представлена на рисунке 2.

Рассмотрим работу энергетической станции, состоящей из плавучих модулей, работающих на энергии морских волн высокой обеспеченности и повторяемости на примере одного плавучего модуля. Генератор пневматической энергии (сифонный компрессор) погружен на глубину H , м, ниже поверхности морской акватории. Тогда избыточное давление p , Па, на глубине H составит:

$$p = \rho g H, \quad (1)$$

где ρ – плотность морской воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Сила гидростатического давления, F , Н, на верхнюю стенку воздушной камеры сифонного компрессора –

$$F = p\omega = p \frac{\pi D^2}{4}, \quad (2)$$

где ω – площадь, м², сечения круглой верхней стенки рабочей камеры диаметром D , м.

Погружение бую под уровень моря, компенсирующее его вес h_1 , м, –

$$h_1 = \frac{G}{\rho g \omega_1}, \quad (3)$$

где G – вес бую, Н; ω_1 – площадь поверхности бую, м².

Выталкивающая сила F_1 , Н, действующая на буй, при его погружении под уровень акватории –

$$F_1 = \rho g \omega_1 h_b, \quad (4)$$

где h_b – заданное рабочее погружение бую, м.

При работе полиспаста выталкивающая сила, действующая на буй, должна быть в 2 раза

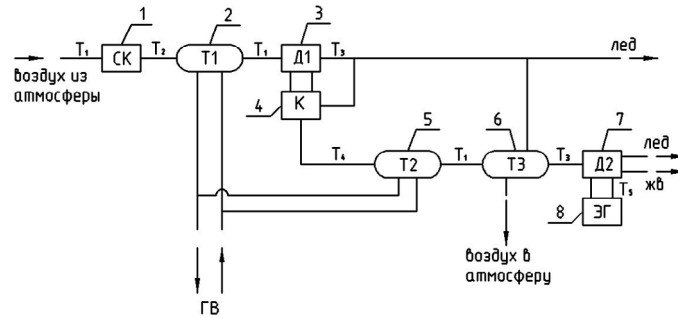


Рис. 2. Схема аккумуляции энергии морских волн в виде сжиженного воздуха, льда и горячей воды:

1 – сифонный компрессор; 2 – первый теплообменник для получения горячей воды; 3 – первый детандер для получения льда; 4 – компрессор с приводом от первого детандера; 5 – второй теплообменник для получения горячей воды; 6 – третий теплообменник для охлаждения воздуха перед сжижением; 7 – второй детандер для сжижения воздуха; 8 – электрогенератор с приводом от второго детандера

Fig. 2. Scheme of energy storage of sea waves in the form of liquefied air, ice and hot water

1 – bellows compressor; 2 – the first heat exchanger for hot water production; 3 – the first expander for ice production; 4 – compressor driven by the first expander; 5 – the second heat exchanger for hot water production; 6 – a third heat exchanger for cooling the air before liquefaction; 7 – a second expander for air liquefaction; 8 – an electric generator driven by a second expander

больше силы гидростатического давления на верхнюю стенку воздушной камеры сифонного компрессора. Тогда полная высота буя h_p , м, составит:

$$h_p = h_1 + h_b + h_3, \quad (5)$$

где h_3 – высота запаса, не менее 0,05 м.

Максимальная выталкивающая сила F_2 , Н, на величину которой должно рассчитываться крепление к донной поверхности акватории (вакуумный анкер), –

$$F_2 = \rho g \omega_1 h_p. \quad (6)$$

Ход рабочего органа сифонного компрессора h_n , м, при установке его на плавучий модуль с полиспастом, зависящий от высоты волны h , –

$$h_n = 2(h - h_b). \quad (7)$$

Массовая производительность сифонного компрессора по воздуху m , кг/ч, –

$$m = \frac{\frac{p_a}{RT_1} \cdot \omega h_n \cdot 3600}{t}, \quad (8)$$

где R – газовая постоянная воздуха, Дж/(кг·°К); T_1 – абсолютная температура наружного воздуха, °К; p_a – атмосферное давление, Па; t – период морской волны, с.

Мощность адиабатного (идеального) сжатия воздуха в сифонном компрессоре N_c , Вт [20], –

$$N_c = \frac{k}{k-1} RT_1 \left(\left(\frac{p+p_a}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{m}{3600}, \quad (9)$$

где $k = 1,4$ – показатель адиабаты (показатель Пуассона).

Абсолютная температура воздуха T_2 , °К, после адиабатного сжатия в сифонном компрессоре –

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p+p_a}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (10)$$

Теоретическая массовая производительность по горячей воде m_v в первом теплообменнике после сифонного компрессора при нагреве воды T_H до 60°C (333°К) и охлаждении воздуха до температуры T_1 , кг/ч, –

$$m_v = \frac{c_p m (T_2 - T_1)}{c_v (T_1 - T_H)}, \quad (11)$$

где c_p – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°К); c_v – теплоемкость воды, Дж/(кг·°К).

Мощность адиабатного расширения воздуха N_p , Вт, в первом детандере, охлажденного в теплообменнике водой до температуры T_1 , –

$$N_p = \frac{k}{k-1} RT_1 \left(1 - \left(\frac{p_a}{p+p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) \frac{m}{3600}. \quad (12)$$

Абсолютная температура воздуха T_3 , °К, после расширения в первом детандере –

$$T_3 = T_1 \left(\frac{p_a}{p+p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (13)$$

Мощность адиабатного (идеального) сжатия воздуха N_k , Вт, в компрессоре на одном валу с первым детандером –

$$N_k = \frac{k}{k-1} RT_3 \left(\left(\frac{p_k+p_a}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{m_x}{3600}, \quad (14)$$

где p_k – избыточное давление воздуха на выходе из компрессора; m_x – массовый часовой расход отобранного после первого детандера воздуха.

Массовый часовой расход охлажденного в первом детандере воздуха выбирается таким образом, чтобы мощность сжатия воздуха в компрессоре на одном валу с детандером N_k не превышала мощности расширения воздуха N_p в первом детандере.

Абсолютная температура воздуха T_4 , °К, после адиабатного сжатия в компрессоре на одном валу с первым детандером –

$$T_4 = T_3 \left(\frac{p_k + p_a}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (15)$$

Массовая производительность первого детандера по льду m_l , кг/ч, при охлаждении льда до температуры $T_{л} = -3^{\circ}\text{C}$ (270°К) с учетом отбора части воздуха компрессором и воздушным теплообменником перед вторым детандером для охлаждения воздуха в процессе сжижения во втором детандере –

$$m_l = \frac{c_p (m - 2m_x)(T_1 - T_3)}{q + c_v (T_1 - T_0) + c_E(T_0 - T)}, \quad (16)$$

где c_l – теплоемкость льда, Дж/(кг·°К); q – скрытая теплота плавления льда, Дж/кг; $T_0 = 273^{\circ}\text{K}$ – температура смены агрегатного состояния (перехода воды из жидкого в твердое состояние).

Теоретическая массовая производительность по горячей воде m_{v2} , кг/ч, во втором теплообменнике после компрессора с приводом от первого детандера при нагреве воды до температуры $T_H = 60^{\circ}\text{C}$ (333°К) и охлаждении воздуха до температуры T_1 –

$$m_{v2} = \frac{c_p m_x (T_4 - T_1)}{c_v (T_1 - T_1)}. \quad (17)$$

В третьем теплообменнике воздух с массовым расходом m_x охлаждается до температуры T_3 для последующего сжижения во втором детандере. Температура воздуха после второго детандера T_5 , °К, ниже температуры сжижения воздуха при атмосферном давлении:

$$T_5 = T_3 \left(\frac{p_a}{p_k + p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (18)$$

Мощность расширения воздуха N_{p2} , кВт, во втором детандере может быть использована для привода электрогенератора, установленного на валу второго детандера:

$$N_k = \frac{k}{k-1} RT_3 \left(1 - \left(\frac{p_a}{p_k + p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) \frac{m_x \cdot 10^{-3}}{3600}. \quad (19)$$

Массовый расход сжиженного воздуха m_y , кг/ч, после второго детандера –

$$m_y = \frac{c_p m_x (T_3 - T_5)}{r + c_p (T_3 - T_5) + c_a (T_k - T_5)}, \quad (20)$$

где r – скрытая теплота сжижения воздуха, Дж/кг; c_a – теплоемкость сжиженного воздуха, Дж/(кг·°К); T_k – температура кипения воздуха, °К.

После второго детандера не весь массовый расход воздуха m_x превращается в сжиженный воздух m_y . Дополнительное получение льда из охлажденного воздуха после второго детандера m^2 можно рассчитать по формуле:

$$m_2 = \frac{c_p (m_x - m_y)(T_3 - T_5)}{q + c_v (T_1 - T_0) + c_E(T_0 - T)}. \quad (21)$$

Результаты и их обсуждение. По приведенным выше аналитическим зависимостям был выполнен гипотетический расчет преобразования энергии морских волн по схеме, изображенной на рисунке 3, в диапазоне изменения высоты волн h от 0,2 до 1,0 м в теоретическую полезную мощность для получения жидкого воздуха, льда и горячей воды. Сильфонный компрессор помещен на глубину $H = 30$ м под поверхность акватории моря. Период морской волны принят равным $t = 4$ сек. Площадь поверхности плавучего буя $\omega_b = 16$ м². Высота плавучего буя $h_p = 0,2$ м. Диаметр поршня сильфонного компрессора $D = 0,25$ м. Графические зависимости для мощности, полученные в результате гипотетического расчета, представлены на рисунках 3, 4.

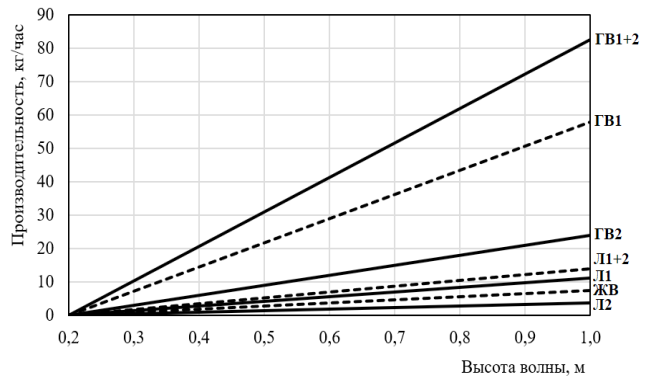


Рис. 3. Производительность по горячей воде, льду и сжиженному воздуху в зависимости от высоты волны:

- ГВ1 – горячая вода в первом теплообменнике;
- ГВ2 – горячая вода во втором теплообменнике;
- ГВ1+2 – суммарная производительность по горячей воде;
- Л1 – лед после первого детандера;
- Л2 – лед после второго детандера;
- Л1+2 – суммарная производительность по льду;
- ЖВ – производительность по жидкому воздуху

Fig. 3. Hot water, ice and liquefied air capacity depending on the wave height

- HW1 – hot water in the first heat exchanger,
- HWB2 – hot water in the second heat exchanger,
- HW1+2 – total hot water capacity;
- I – ice after the first expander,
- I2 – ice after the second expander,
- I1+2 – total ice capacity, LB – liquid air capacity

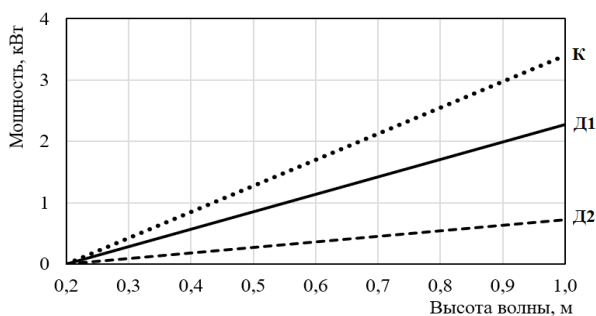


Рис. 4. Теоретическая мощность сжатия воздуха в сильфонном компрессоре и расширения в детандерах

в зависимости от высоты волны:

К – мощность адиабатного сжатия воздуха в сильфонном компрессоре;

D1 – мощность адиабатного расширения охлажденного воздуха в первом детандере;

D2 – мощность адиабатного расширения охлажденного воздуха во втором детандере

Fig. 4. Theoretical power of air compression in the bellows compressor and expansion in expanders depending on the wave height

K – is the power of adiabatic air compression in a bellows compressor; E1 – is the power of adiabatic expansion of cooled air in the first expander;

E2 – is the power of adiabatic expansion of cooled air in the second expander

Список использованных источников

1. Найденко А.А. Возобновляемая энергия океана // Технологическая независимость и конкурентоспособность Союзного государства, стран СНГ, ЕАЭС и ШОС: Сборник статей VI Международной НПК «Минские научные чтения-2023» (БГТУ, Минск, 6-8 декабря 2023 г.). Минск, 2023. Т. 3. С. 218-223.

2. Nsafon B.E.K., Owolabi A.B., Butu H.M., Roh J.W., Suh D., Huh J. Optimization and sustainability analysis of PV/wind/diesel hybrid energy system for decentralized energy generation // Energy Strategy Reviews. 2020. Vol. 32. P. 100570. DOI: 10.1016/j.esr.2020.100570. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X20301231> (дата обращения: 20.06.2025).

3. Robertson B., Bekker J., Buckham B. Renewable integration for remote communities: Comparative allowable cost analyses for hydro, solar and wave energy // Applied Energy. 2020. Vol. 264. P. 114677. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114677. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920301896> (дата обращения: 20.06.2025).

4. Львович Я.Е. Особенности использования возобновляемых источников энергии для распределенной генерации малой энергетики // Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий и сооружений: Сборник научных трудов 4-й Всероссийской НПК (ЮЗГУ, 22 ноября 2022 г.). Курск, 2022. С. 316-319.

5. Белоглазова Т.Н., Елькина А.И. Эффективность газоиспользующих теплогенераторов для индивидуального и децентрализованного теплоснабжения // Construction and Geotechnics. 2020. Т. 11, № 1. С. 80-91. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.08. URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/717/468> (дата обращения: 20.06.2025).

6. Преображенский Ю.П., Коновалов В.М. О методах создания рекомендательных систем // Вестник Воронежского

Выводы

Проведенные исследования, а также выполненный гипотетический расчет производительности модульной энергетической установки по жидкому воздуху, льду и горячей воде показали, что:

– разработанные технические решения по использованию энергии морских волн высокой обеспеченности и повторяемости могут применяться для автономного жизнеобеспечения объектов некапитального строительства в прибрежной зоне морских акваторий;

– снимаемая с вала второго детандера механическая мощность при использовании электрогенераторов позволит дополнительно к тепловой и энергии холода получать также электрическую энергию;

– данное техническое решение способно стать решением в локальном масштабе задачи обеспечения коммунальными и энергетическими ресурсами потребителей в зоне неразвитой инженерной инфраструктуры.

References

1. Naidenko A.A. Renewable Ocean Energy / A.A. Naidenko // Technological independence and competitiveness of the Union State, the CIS countries, the EAEU and the SCO: coll. art. VI VI international scientific-research conference “Minsk Scientific Readings – 2023”. (BSTU, Minsk: December 6-8, 2023). Minsk, 2023. Vol. 3. Pp. 218-223.

2. Nsafon B.E.K., Owolabi A.B., Butu H.M., Roh J.W., Suh D., Huh J. Optimization and sustainability analysis of PV/wind/diesel hybrid energy system for decentralized energy generation // Energy Strategy Reviews. 2020. Vol. 32. P. 100570. DOI: 10.1016/j.esr.2020.100570 [Electronic resource] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X20301231> (accessed 20.06.25).

3. Robertson B., Bekker J., Buckham B. Renewable integration for remote communities: Comparative allowable cost analyses for hydro, solar and wave energy // Applied Energy. 2020. Vol. 264. P. 114677. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114677 [Electronic resource] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920301896> (accessed 20.06.25).

4. Lvovich Ya.E. Features of using renewable energy sources for distributed generation of small-scale energy / Ya.E. Lvovich // Innovative methods for designing building structures of buildings and structures: collection of scientific papers of the 4th All-Russian Scientific and Practical Conference (SWSU, November 22, 2022). Kursk, 2022. З. 316-319.

5. Beloglazova T.N. Efficiency of gas-fired heat generators for individual and decentralized heat supply / T.N. Beloglazova, A.I. Elkina // Construction and Geotechnics. 2020. Vol. 11, No. 1. P. 80-91. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.08 [Electronic resource] <https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/717/468> (accessed 06.20.25).

6. Preobrazhensky Yu.P. On methods of creating recommender systems / Yu.P. Preobrazhensky, V.M. Kononov

института высоких технологий. 2019. № 4 (31). С. 75-79. EDN: ОНЕКТК

7. Guo B.A., Ringwood J.V. A review of wave energy technology from a research and commercial perspective // IET Renewable Power Generation. 2021. Vol. 15, Iss. 14. P. 3065-3090. DOI: 10.1049/rpg.12302. URL: <https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/rpg.12302> (дата обращения: 20.06.2025).

8. Khan M.Z.A., Khan H.A., Aziz M. Harvesting energy from ocean: technologies and perspectives // Energies. 2022. Vol. 15 (9). P. 3456. DOI: 10.3390/en15093456. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/9/3456> (дата обращения: 20.06.2025).

9. Satymov R., Bogdanov D., Dadashi M., Lavidas G., Breyer C. Techno-economic assessment of global and regional wave energy resource potentials and profiles in hourly resolution // Applied Energy. 2024. Vol. 364. P. 123119. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123119. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924005026> (дата обращения: 20.06.2025).

10. Технологии хранения энергии: в ожидании прорыва. URL: <https://peretok.ru/opinion/17406/> (дата обращения: 20.06.2025).

11. Bazdar E., Sameti M., Nasiri F., Haghight F. Compressed air energy storage in integrated energy systems: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 167. P. 112701. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112701. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032122005901> (дата обращения: 20.06.2025).

12. Rabi A.M., Radulovic J., Buick J.M. Comprehensive Review of Compressed Air Energy Storage (CAES) Technologies // Thermo. 2024. Vol. 3 (1). Pp. 104-126. DOI: 10.3390/thermo3010008. URL: <https://www.mdpi.com/2673-7264/3/1/8> (дата обращения: 20.06.2025).

13. Китай запускает крупнейший завод в мире по хранению энергии на сжатом воздухе. URL: <https://habr.com/ru/companies/first/articles/692740/> (дата обращения: 20.06.2025).

14. Сильфонный насос-компрессор: Патент на изобретение № 2817577 С1 Российская Федерация, МПК F04B19/06 F03B13/18. № 2023118940: заявл. 17.07.2023; Опубл. 16.04.2024 / В.В. Миронов, Ю.А. Иванюшин, Д.В. Миронов, Д.А. Суглобов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет» (ТИУ).

15. Safari M., Sohani A., Sayyaadi H. A higher performance optimum design for a tri-generation system by taking the advantage of water-energy nexus // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 284. P. 124704, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124704 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262034748X> (дата обращения: 20.06.2025).

16. Ahmad Z., Shukla A.K., Singh V., Sharma M., Kumar P. Thermodynamic analysis of solar powered trigeneration arrangement for cooling, power and drinking water generation // Songklanakarin Journal of Science & Technology. 2022. Vol. 44 (6). Pp. 1419-1426. DOI: 10.14456/sjst-psu.2022.184. URL: <https://sjst.psu.ac.th/article.php?art=2954> (дата обращения: 20.06.2025).

17. Jahangiri M., Karimi Shahmarvandi F., Alayi R. Renewable energy-based systems on a residential scale in southern coastal areas of Iran: trigeneration of heat, power, and hydrogen // Journal of Renewable Energy and Environment. 2021. Vol. 8 (4). Pp. 67-76. DOI: 10.30501/jree.2021.261980.1170. URL: https://www.jree.ir/article_135328.html (дата обращения: 20.06.2025).

18. Миронов В.В., Иванюшин Ю.А., Суглобов Д.А. и др. Получение холода с использованием гидравлической энергии // Региональная архитектура и строительство. 2024. № 1 (58). С. 157-165. DOI: 10.54734/20722958_2024_1_157.

19. Способ очистки воды от соли и загрязнений: Патент на изобретение № 2813520 С1 Российская Федерация, МПК

// Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies. 2019. No. 4 (31). P. 75-79. EDN: ОНЕКТК

7. Guo B.A., Ringwood J.V. A review of wave energy technology from a research and commercial perspective // IET Renewable Power Generation. 2021. Vol. 15, iss. 14. P. 3065-3090. DOI: 10.1049/rpg.12302 [Electronic resource] <https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/rpg.12302> (accessed 20.06.25).

8. Khan M.Z.A., Khan H.A., Aziz M. Harvesting energy from ocean: technologies and perspectives // Energies. 2022. Vol. 15 (9). P. 3456. DOI: 10.3390/en15093456 [Electronic resource] <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/9/3456> (accessed 20.06.25).

9. Satymov R., Bogdanov D., Dadashi M., Lavidas G., Breyer C. Techno-economic assessment of global and regional wave energy resource potentials and profiles in hourly resolution // Applied Energy. 2024. Vol. 364. P. 123119. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123119 [Electronic resource] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924005026> (accessed 20.06.25).

10. Energy storage technologies: waiting for a breakthrough: website [Electronic resource] <https://peretok.ru/opinion/17406/> (accessed 20.06.25).

11. Bazdar E., Sameti M., Nasiri F., Haghight F. Compressed air energy storage in integrated energy systems: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 167. P. 112701. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112701 [Electronic resource] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032122005901> (accessed 20.06.25).

12. Rabi A.M., Radulovic J., Buick J.M. Comprehensive Review of Compressed Air Energy Storage (CAES) Technologies // Thermo. 2024. Vol. 3 (1). P. 104-126. DOI: 10.3390/thermo3010008 [Electronic resource] <https://www.mdpi.com/2673-7264/3/1/8> (accessed 20.06.25).

13. China launches the world's largest compressed air energy storage plant: website [Electronic resource] <https://habr.com/ru/companies/first/articles/692740/> (accessed 06.20.25).

14. Patent for invention No. 2817577 C1 Russian Federation, IPC F04B19/06 F03B13/18. Bellows pump-compressor: No. 2023118940: appl. 17/07/2023; published 16/04/2024 / V.V. Mironov Yu.A. Ivanyushin, D.V. Mironov, D.A. Suglobov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tyumen Industrial University" (TIU).

15. Safari M., Sohani A., Sayyaadi H. A higher performance optimum design for a tri-generation system by taking the advantage of water-energy nexus // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 284. P. 124704, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124704 [Electronic resource] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262034748X> (accessed 20.06.25).

16. Ahmad Z., Shukla A.K., Singh V., Sharma M., Kumar P. Thermodynamic analysis of solar powered trigeneration arrangement for cooling, power and drinking water generation // Songklanakarin Journal of Science & Technology. 2022. Vol. 44 (6). P. 1419-1426. DOI: 10.14456/sjst-psu.2022.184 [Electronic resource] <https://sjst.psu.ac.th/article.php?art=2954> (accessed 20.06.25).

17. Jahangiri M., Karimi Shahmarvandi F., Alayi R. Renewable energy-based systems on a residential scale in southern coastal areas of Iran: trigeneration of heat, power, and hydrogen // Journal of Renewable Energy and Environment. 2021. Vol. 8 (4). P. 67-76. DOI: 10.30501/jree.2021.261980.1170 [Electronic resource] https://www.jree.ir/article_135328.html (accessed 20.06.25).

18. Mironov V.V. Getting cold using hydraulic energy / V.V. Mironov Yu.A. Ivanyushin, D.A. Suglobov [and others] // Regional architecture and engineering, 2024. No. 1 (58), P. 157-165. DOI: 10.54734/20722958_2024_1_157.

C02F 1/44, F03B13/14. № 2023113267: заявл. 22.05.2023; Опубликовано 12.02.2024 / В.В. Миронов, Ю.А. Иванюшин, Д.В. Миронов, Д.А. Суглобов; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «ЭЛЕКТРОРАМ».

20. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры: Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 416 с.

Информация об авторах

Виктор Владимирович Миронов, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры инженерных систем и сооружений; ORCID: 0000-0001-8939-850X; Scopus 57196778368; РИНЦ ID384652; WOS Research ID AAH-6967-2019; vvmironov@list.ru

Юрий Андреевич Иванюшин, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерных систем и сооружений; ORCID: 0000-0002-4470-6967; Scopus 56199460900; РИНЦ ID758082; WOS Research ID V-9425-2019; ivanjushinja@tyuiu.ru

Игорь Юрьевич Шалагин, канд. техн. наук, доцент кафедры инженерных систем и сооружений; Scopus 56951226600; РИНЦ ID758535; shalaginij@tyuiu.ru

Анастасия Александровна Кадысева, д-р биол. наук, доцент, профессор кафедры сельскохозяйственного водоснабжения, водоотведения, насосов и насосных станций; ORCID: 0000-0001-8703-5684; Scopus 57214243999; РИНЦ ID698088; WOS Research ID M-6451-2016; kadyseva@mail.ru

Критерии авторства

Все авторы совместно выполнили теоретические и численные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи.

Конфликт интересов / Criteria of authorship

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Поступила в редакцию / Received 23.06.2025

Поступила после рецензирования / Received 18.03.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 06.04.2026

19. Patent for invention No. 2813520 C1 Russian Federation, IPC C02F 1/44, F03B13/14. Method for purifying water from salt and contaminants: No. 2023113267: appl. 22/05/2023: published 12/02/2024 / V.V. Mironov Yu.A. Ivanyushin, D.V. Mironov, D.A. Suglobov; applicant Limited Liability Company "ELEKT-RORAM".

20. Cherkasskij V.M. Pumps, fans, compressors / V.M. Cherkasskij. – М.: Energoatomizdat. – 2-е ed., revised and add., 1984. – 416 p.

Information about the authors

Victor V. Mironov, DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Engineering Systems and Structures; ORCID: 0000-0001-8939-850X; Scopus 57196778368; РИНЦ ID384652; WOS Research ID AAH-6967-2019; vvmironov@list.ru

Yuriy A. Ivanyushin, CSc (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering Systems and Structures; ORCID: 0000-0002-4470-6967; Scopus 56199460900; РИНЦ ID758082; WOS Research ID V-9425-2019; ivanjushinja@tyuiu.ru

Igor Yu. Shalagin, CSc (Eng), Associate Professor of the Department of Engineering Systems and Structures; Scopus 56951226600; РИНЦ ID758535; shalaginij@tyuiu.ru

Anastasia A. Kadyseva, DSc (Biol), Associate Professor, Professor of the Department of Agricultural Water Supply, Water Disposal, Pumps and Pumping Stations; ORCID: 0000-0001-8703-5684; Scopus 57214243999; РИНЦ ID698088; WOS Research ID M-6451-2016; kadyseva@mail.ru

Authorship criteria

All authors jointly performed theoretical and numerical studies, on the basis of which they summarized and wrote a manuscript. All authors equally participated in the writing of the article.