

Использование цифровых технологий при обосновании энергетических и конструктивных параметров арктической ВЭУ

Рецензия эксперта на статью получена 11.06.2024 [The expert review of the article was received on June 11, 2024]

Введение

Одной из основных проблем энергоснабжения на территории Российской Федерации является неэффективная автономная энергетика, особенно в удалённых и труднодоступных регионах, включая северные области. В настоящее время эти регионы в основном обеспечиваются электрической энергией от автономных или находящихся в составе локальной энергосистемы дизельных электростанций (ДЭС), работающих на дорогостоящем привозном топливе. Ежегодные поставки топлива для автономных ДЭС в рамках «северного завоза» составляют около 1 млн тонн без учёта потребностей объектов Министерства обороны. В северных районах эксплуатируется более 900 ДЭС мощностью около 1,2 ГВт с производством энергии около 2,5 млн кВт·ч.

Учитывая, что северные и прибрежные районы данных территорий находятся в зоне особо высокого ветроэнергетического потенциала, альтернативой электроснабжению на базе ДЭС может стать внедрение ветроэлектрических установок (ВЭУ) и создание модульных ветродизельных энергокомплексов (ВДЭС) вида «дизель-генераторная установка (ДГУ) + ВЭУ» мощностью ДГУ около 250 кВт и ВЭУ до 100 кВт, адаптированных к арктическим климатическим условиям (низкие температуры до -50°C , ураганные ветра до 60 м/с, обледенение, основания на вечномёрзлых грунтах и другие экстремальные условия) [1–4].

При этом в современной практике проектирования, в том числе объектов ветроэнергетики [5–7], сформировался принцип цифрового подхода к проектированию и управлению объектами на всей стадии их жизненного цикла. Так, в [3] предложен и реализован принцип внедрения цифрового проектирования ВЭУ

Поскольку северные и прибрежные районы данных территорий находятся в зоне особо высокого ветроэнергетического потенциала, альтернативой электроснабжению на базе ДЭС может стать внедрение ветроэлектрических установок (ВЭУ)

и их элементов для реальных природно-климатических условий территории Арктической зоны России с использованием современных программных средств расчёта и моделирования.

Для решения научно-технологических и технико-экономических задач разработки арктических конкурентоспособных ВДЭС в НОЦ «Возобновляемые виды энергии и установки на их основе» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ) разработаны принципы создания [16] модульной ветроэнергетической установки.

ВЭУ состоит из изготавливаемых в заводских условиях элементов и частей, которые учитывают условия доставки на Крайний Север в короткий навигационный период, имеет систему самоподъёма для монтажа без использования тяжёлой подъёмно-транспортной техники и оригинальную опорную конструкцию башни с модульным фундаментом. На предлагаемую конструкцию башни и модульного фундамента получены патенты РФ [17–19], а также предложен принцип модульности и быстровозводимости опорных конструкций ВЭУ [20].

Объектом данного исследования являются энергетические и конструктивные параметры ВЭУ, обеспечивающие устойчивость конструкции, надёжность эксплуатации и высокие энергетические характеристики установки.

УДК 621.311.24:621.548. Научная специальность 2.4.5.

Использование цифровых технологий при обосновании энергетических и конструктивных параметров арктической ветроэнергетической установки

В. В. Елистратов, д.т.н., профессор; **А. А. Панфилов**, к.т.н., доцент, Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства (ВШГЭС), Инженерно-строительный институт (ИСИ), Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); **С. Г. Петров**, аспирант, СПбПУ

Предметом исследования являются конструктивные параметры ВЭУ. Предложен модульный принцип создания фундамента ВЭУ. Модули изготавливаются на заводе, транспортируются в стандартном контейнере, монтаж возможен без применения сложной техники. Выполнено CAD-моделирование, с передачей в программный комплекс CAE ANSYS. Цифровая технология создания модульной ВЭУ может быть использована для проектирования в сложных условиях Арктики.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, арктическое строительство, ветродизельные энергокомплексы, модульный фундамент, вечная мерзлота, труднодоступность, Арктика.

UDC 621.311.24:621.548. The number of scientific specialty: 2.4.5.

The use of digital technologies in substantiating the energy and design parameters of the Arctic wind power plant

V. V. Elistratov, Doctor of Technical Sciences, Professor; **A. A. Panfilov**, PhD, Associate Professor, Higher School of Hydraulic Engineering and Energy Construction (HSHEEC), Institute of Civil Engineering (ICI), Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); **S. G. Petrov**, graduate student, SPbPU

The subject of the study is the design parameters of wind turbines. A modular principle for creating a wind turbine foundation is proposed. The modules are manufactured at the factory, transported in a standard container, and installation is possible without the use of complex equipment. CAD modeling was completed and transferred to the CAE software package ANSYS. Digital technology for creating a modular wind turbine can be used for design in difficult Arctic conditions.

Keywords: energy, Arctic construction, wind-diesel energy complexes, modular foundation, permafrost, inaccessibility.

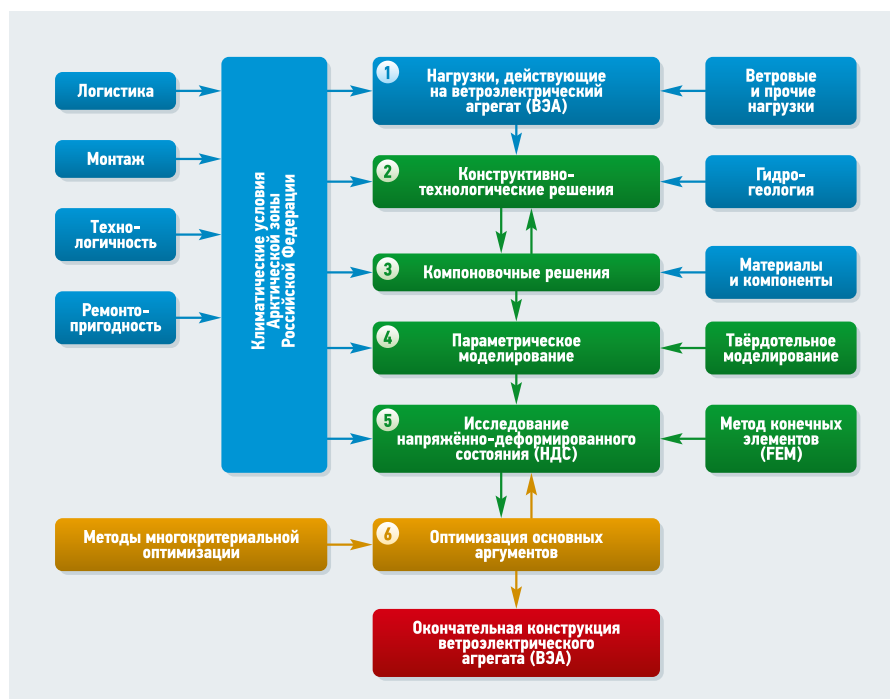


Рис. 1. Блок-схема этапов выбора основных параметров цифровой модульной ВЭУ

Цель исследования — разработка методики цифрового обоснования энергетических, конструктивно-технологических и компоновочных решений модульной ВЭУ арктического исполнения и расчёт её элементов. Задачи исследования:

1. Разработать методические принципы проектирования параметров инженерно-строительной конструкции ВЭУ с учётом влияния экстремальных природно-климатических характеристик арктических территорий на энергетические параметры, нагрузки и воздействия.
2. Обосновать конструктивно-технологические и компоновочные решения модульного фундамента ветроэлектрической установки с применением методов многокритериальной оптимизации.
3. Произвести расчёт напряжённо-деформированного состояния (НДС) элементов модульного фундамента с применением программного комплекса ANSYS.

ПО ANSYS представляет собой многоцелевой пакет программ для численного моделирования физических процессов и явлений в области прочности, динамики жидкостей и газов, теплофизики, электромагнетизма, акустики и многих других, а также активно используется для решения междисциплинарных задач.

Основной раздел

Для цифрового проектирования модульной ВЭУ предложена методология последовательной реализации взаимосвязанных этапов, начиная с этапа ресурсных оценок и определения энергетических характеристик ветроэлектрических устано-

вок с использованием данных ветровых, природно-климатических условий и конструктивных решений (диаметра ветроколеса, высота башни и др.) [22].

Этапы цифрового проектирования модульной ВЭУ для суровых климатических условий Арктической зоны Российской Федерации представлены на рис. 1 в виде комплексной блок-схемы, включающей конструирование ВЭУ из модульных унифицированных элементов и материалов, адаптированных к арктическим климатическим условиям (низким температурам до -50°C , ураганным ветрам до 60 м/с, обледенению, вечномёрзлым грунтам и др. экстремальным условиям), сложным логистическим условиям доставки оборудования и монтажа элементов на площадке.

Блоки внешних исходных данных и условий для определения нагрузок на ВЭУ на рис. 1 выделены синим цветом. Блоки моделирования и расчёта конструкции модульного фундамента выделены на рис. 1 зелёным цветом. Блоки оптимизации параметров опорных конструкций и модульного фундамента выделены на рис. 1 оранжевым цветом.

В блоке 1 «Нагрузки, действующие на ветроэлектрический агрегат (ВЭА)» учитывается изменение плотности тёплого и холодного воздуха, изменение (увеличение) массы элементов ВЭУ из-за обледенения её основных элементов. Особое внимание уделяется учёту дисбалансов нагрузок, действующих со стороны ветрового колеса от вращения покрытых изморозью лопастей.

В блоках 2–5 решаются задачи конструирования элементов ВЭУ с учётом слаборазвитой транспортной инфраструктуры доставки и возведения, геокриологических особенностей грунтов и оснований. Конструктивно-технологические и компоновочные решения принимаются на основании многокритериальной оптимизации (блок 6).

Критериями выбора параметров башни являются обеспечение передачи нагрузок от ветроэлектрического агрегата на фундамент и секционность, обеспечивающая транспортировку в телескопическом виде (секции вложены одна в другую). Критериями выбора параметров фундамента являются прочность, низкая материалоемкость, возможность транспортировки отдельных модулей. В результате реализации решений в соответствии с последовательностью, приведённой на рис. 1, определяются и оптимизируются параметры фундамента, которые бы удовлетворяли этим критериям.

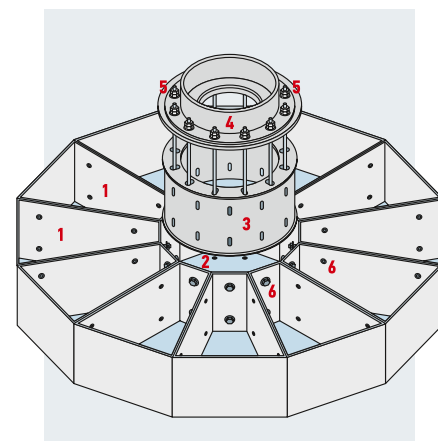


Рис. 2. Схема модульного фундамента ВЭУ (1 — внешние модули; 2 — центральный модуль; 3 — внутренний модуль; 4 — опорный фланец башни ВЭУ; 5 — анкерные болты; 6 — болтовые соединения)

Конструктивно модульный фундамент [19] (рис. 2) состоит из пустотелых внешних модулей 1 и центрального модуля 2, в который помещается опорный внутренний модуль 3, служащий для крепления нижней секции башни 4 с фундаментом и жёсткой связи всех конструктивных элементов фундамента 1 и 2 с помощью анкерных болтов 5 и болтовых соединений 6. Конструкция крепления этих элементов обеспечивает их жёсткость, что позволяет модульному фундаменту работать как единое целое.

Чтобы фундамент работал как монолитный гравитационный объект, применяется балластная нагрузка из местных сыпучих материалов, изъятых при организации котлована.

Для определения прочности основания и устойчивости конструкции рассмотрена контактная задача по определению нормального давления $p(x, y)$ на грунт и подошву фундамента в любой произвольной точке пятна контакта с использованием формулы внецентренного сжатия:

$$p(x, y) = \frac{N}{A_{\phi}} \pm \frac{M_x}{I_x} y \pm \frac{M_y}{I_y} x, \quad (1)$$

где N , M_x и M_y — вертикальное усилие и моменты, приложенные к геометрическому центру подошвы фундамента вдоль и вокруг осей z , x и y , соответственно; A_{ϕ} — площадь контакта подошвы фундамента с грунтом основания; I_x и I_y — моменты инерции площади контакта относительно осей x и y .

Максимальное возможное давление на грунт основания фундамента должно удовлетворять условию $p_{\max} \leq 1,2R$, где R — расчётное сопротивление основания для второго предельного состояния (по деформациям) для круглого фундамента.

Чтобы минимизировать массу конструктивных материалов, предложено использовать коэффициент перегрузки:

$$K_{\text{пер}} = \frac{N_{\text{тр}}}{N}, \quad (2)$$

где $N_{\text{тр}}$ — суммарный вес ВЭУ и фундамента, требуемый для выполнения условия $p_{\min} \geq 0$ (с учётом принятия худшего, наиболее лёгкого варианта балластной нагрузки плотностью 1500 кг/м^3), зависящий от заданных геометрических размеров и собранных нагрузок:

$$N_{\text{тр}} = \frac{M_{\text{ВЭУ}}}{r} - N_{\text{ВЭУ}}, \quad (3)$$

где $M_{\text{ВЭУ}}$ — опрокидывающий момент от ВЭУ; $N_{\text{ВЭУ}}$ — вес ВЭУ; r — радиус внешней (описанной) окружности фундамента.

Необходимо обеспечить минимальное превышение усилия от веса фундамента над усилием, приложенным к геометрическому центру подошвы, то есть обеспечения $K_{\text{пер}} \approx 1,0$.

Оптимизация размеров фундамента проведена на основании критерия прочности (1) и коэффициента перегрузки (2).

В результате проведённых исследований обоснованы параметры модульного фундамента для ВЭУ 100 кВт.

Оптимальный вариант конструкции фундамента должен обладать достаточной прочностью, то есть способностью выдерживать возникающие нагрузки, и при этом иметь наименьшую материалоемкость. В то же время габариты отдельных модулей должны позволить разместить в контейнере их максимальное число. Для данного фундамента с использованием

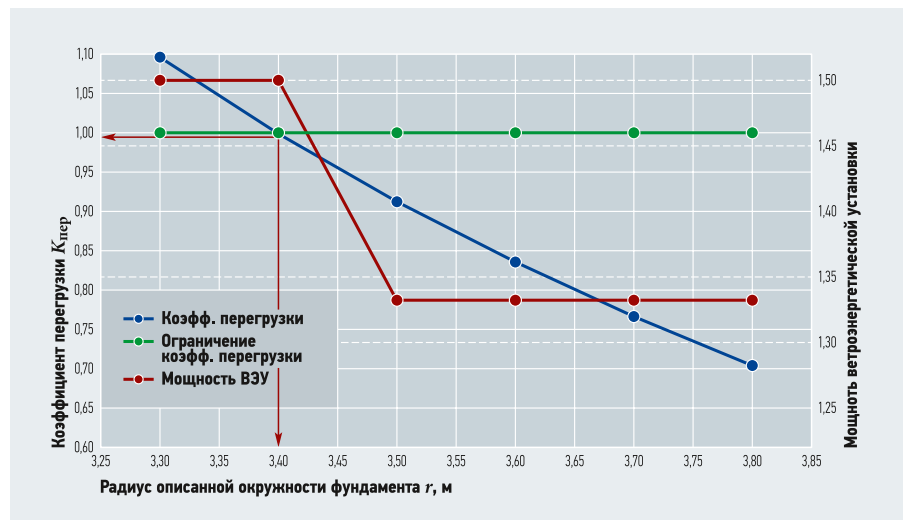


Рис. 3. Подбор параметров фундамента ВЭУ (12 модулей)

показателя вместимости рассчитаны геометрические размеры внешних модулей для размещения в стандартном 40-футовом контейнере [21]. Вместимость оценивалась как отношение количества модулей, помещающихся в контейнер, к количеству боковых модулей, необходимых для создания прочного и устойчивого фундамента установки.

Высота фундамента принята равной 1,1 м, что позволило разместить в контейнере два ряда модулей, а радиус центрального и внутреннего модулей подбирался исходя из значения нижнего радиуса башни (для ВЭУ мощностью 100 кВт радиус нижней части башни составляет примерно 0,75 м).

Подбор параметров внешних модулей осуществлялся итерационным способом. Результат подбора иллюстрирует

диаграмма, приведённая на рис. 3. При 12 модулях вместимость контейнера максимальна при коэффициенте перегрузки, равном 0,99, и при радиусе фундамента, равном 3,4 м, то есть 12-модульный фундамент оказался наиболее экономичным.

Для природно-климатических и ветровых условий Ямало-Ненецкого автономного округа (посёлок Яр-Сале) использована адаптированная к арктическим условиям ВЭУ, имеющая следующие характеристики: установочная мощность — 100 кВт; высота башни — 30 м; выработка энергии с учётом простоев, связанных с обледенением, — 319 МВт·ч; радиус привалочной плоскости башни — 0,75 м; вес ВЭУ $N_{\text{ВЭУ}} = 190 \text{ кН}$; момент от вращения ветроколеса $M_x = 2500 \text{ кН·м}$; опрокидывающий момент $M_y = 400 \text{ кН·м}$.

На основе выполненных итерационных расчётов получены значения параметров модульного фундамента: число модулей — 12 шт., толщина стенки модуля — 20 мм, высота фундамента — 1,1 м, радиус описанной окружности опорного модуля — 1,1 м, радиус описанной окружности фундамента — 3,4 м; коэффициент перегрузки $K_{\text{пер}} = 0,99$.

Масса стального фундамента равна 22,7 т, масса балластной нагрузки — 52 т (грунт обратной засыпки взят с минимальной плотностью 1500 кг/м^3).

На следующем этапе цифрового проектирования арктической ветроэлектрической установки на основе полученных характеристик в программе Inventor была создана параметрическая 3D-модель CAD (рис. 4), позволяющая осуществлять экспорт конструкции в программные комплексы Computer-Aided Engineering (CAE).

В качестве программного комплекса CAE для проверки прочности и работоспособности фундамента было выбрано ANSYS. В данном ПО выполнен расчёт напряжённо-деформированного состояния (НДС) фундамента при помощи расчётного модуля Static Structural, который



Рис. 4. Расчётная параметрическая 3D-модель ВЭУ 100 кВт для CAD

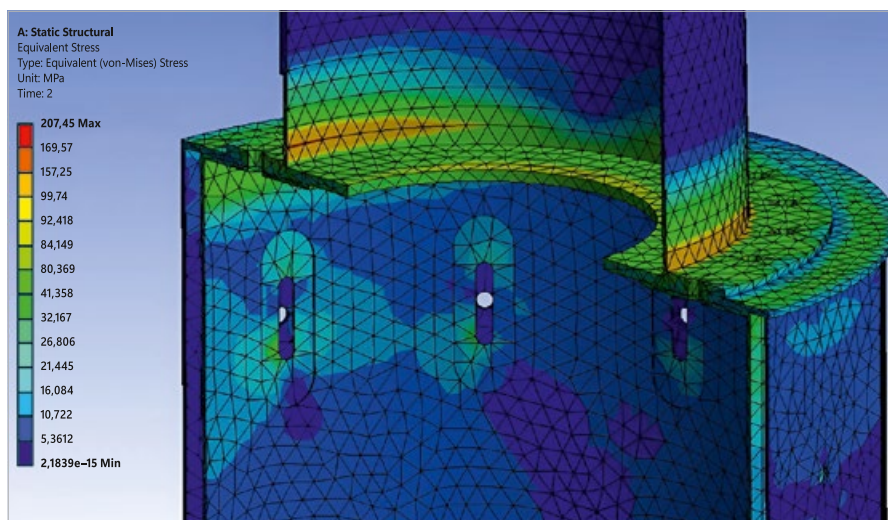


Рис. 5. Напряжения, возникающие в фундаменте и месте крепления башни (МПа)

предназначен для решения задач механики деформируемого твёрдого тела в статической постановке. Материал фундамента — конструкционная сталь с повышенными показателями прочности для установок, эксплуатируемых в холодном климате. Из библиотеки ANSYS принят аналог российской стали 16Г2АФ со схожими характеристиками. Все нагрузки приложены к нижнему фланцу башни ветроэлектрической установки.

Цифровое моделирование НДС для различных расчётных случаев показало, что наибольшие напряжения возникают в местах крепления фланца башни с фундаментом (рис. 5), однако и в этом месте напряжения не превышают допустимых.

Анализ выполненных расчётов НДС показал, что элементы спроектированного модульного фундамента выдерживают

возникающие в процессе эксплуатации нагрузки и конструкция в целом является работоспособной.

Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработана методология цифрового проектирования модульной ВЭУ в виде последовательной реализации взаимосвязанных этапов от ресурсных оценок и определения энергетических характеристик ВЭУ до этапа проектирования инженерно-строительных конструкций ВЭУ для суровых климатических условий.
2. Предложены конструктивно-технологические решения ВЭУ модульного исполнения, включая фундамент, состоящий из элементов (модулей) высокой степени заводского исполнения.

3. Подобраны основные характеристики модульного фундамента для ВЭУ мощностью 100 кВт: радиус внешней (описанной) окружности фундамента составляет 3,4 м; высота фундамента — 1,1 м, число внешних модулей — 12 шт., толщина стенки модуля — 20 мм, радиус внешней (описанной) окружности центрального модуля — 1,1 м. Масса металлических конструкций фундамента составила 22,7 т.

4. Для природно-климатических и ветровых условий Ямало-Ненецкого автономного округа (посёлок Яр-Сале) рассчитаны энергетические и силовые характеристики адаптированной к арктическим условиям ВЭУ, на основе которых сформированы исходные данные для расчёта НДС.

5. Выполнен расчёт напряжённо-деформированного состояния фундамента, который показал, что конструкция модульного фундамента с подобранными параметрами выдерживает возникающие нагрузки и является работоспособной.

6. Разработанная методика проектирования и цифровая модель модульной ВЭУ с возможностью учёта влияния метеорологических и природно-климатических характеристик арктических территорий на энергетические параметры, нагрузки и воздействия может быть использована при создании эффективных ВДЭС с модульными ВЭУ для удалённых регионов Арктической зоны России в условиях неразвитой дорожной инфраструктуры и отсутствия мощной подъёмно-транспортной техники. ●

1. Елистратов В.В. Оптимальные решения системы автоматического управления энергокомплексов средней мощности на основе возобновляемых источников энергии // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы, 2019. №2. С. 69–85.
2. Hall L.M.H., Buckley A.R. A review of energy systems models in the UK: Prevalent usage and categorization. Applied Energy. 2016. Vol. 169. Pp. 607–628.
3. Елистратов В.В., Панфилов А.А. Особенности проектирования фундаментов ветроэнергетических установок в условиях вечной мерзлоты / Полярная механика — 2016: Материалы III международной конференции (г. Владивосток, 27–30.09.2016). — Владивосток: ДФУ, 2016. С. 599–609.
4. Елистратов В.В. Энергоснабжение объектов в Арктике с использованием возобновляемых источников энергии // Журнал «Neftegaz.Ru», 2023. №1. С. 74–79.
5. A breakdown of the digital wind farm. The energy to change the world. GE Vernova. Web-source: [gevernova.com](https://www.gevernova.com). Access date: August 27, 2023.
6. LIFESPAN: A digital suite optimizing operations proven to meet evolving. GE Vernova. Web-source: [ge.com](https://www.ge.com). Access date: August 27, 2023.
7. De Kooning J.D.M., Stockman K., De Maeyer J., Laguna A.J., Vandevelde L. Digital twins for wind energy conversion systems: A literature review of potential modeling techniques focused on model fidelity and computational load. Processes. 2021. Vol. 9. Issue 12.
8. Elistratov V.V., Panfilov A.A., Konyshev M.A., Denisov R.S. The application of adapted materials and technologies to create energy systems based on renewable energy sources under harsh climatic conditions. Applied Solar Energy. 2018. Vol. 54. Issue 6. Pp. 472–476.
9. Chade D., Miklis T., Dvorak D. Feasibility study of wind-to-hydrogen system for Arctic remote locations — Grimsey Island case study. Renewable Energy. 2015. Vol. 76. Pp. 204–211.
10. Sinha S., Chandel S.S. Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic — wind based hybrid energy systems. 2015. Vol. 50. Pp. 755–769.
11. Ringkjøb H.-K., Haugan P.M., Solbrekke I.M. A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 96. Pp. 440–459.
12. Liu Y., Yu S., Zhu Y., Wang D., Liu J. Modeling, planning, application and management of energy systems for isolated areas: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. Pp. 460–470.
13. Lambert T., Gilman P., Lilienthal P. Micropower system modelling with HOMER. In: Integration of alternative sources of energy (Chapter 15). Edited by M.G. Simoes, F.A. Farret. Wiley-IEEE Press. 2006. Pp. 379–418.
14. Rud J.N., Hörmann M., Hammervold V., Ásmundsson R., Georgiev I., Dyer G., Andersen S.B., Jessen J.E., Kvorning P., Brødsted M.R. Energy in the West Nordics and the Arctic: Scenario analysis. Nordic Council of Ministers. Copenhagen, Denmark. 2018. 109 p.
15. Elistratov V.V., Denisov R.S. Justification of wind turbine operation and management modes for Russian Arctic conditions. Proc. of 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM-2017). St. Petersburg, Russia. May 16–19, 2017.
16. Елистратов В.В., Конищев М.А., Денисов Р.С., Богун И.В. Арктическая ветродизельная электростанция с интеллектуальной системой управления // Электричество, 2022. №2. С. 29–37.
17. Патент RU 157615 U1. МПК E04N 12/18. Телескопическая ветробашня / В.В. Елистратов, А.А. Панфилов, М.А. Конищев, Р.С. Денисов. Патентобл.: ФГАУ ВО «СПбПУ»; заявл.: 13.07.2015; опубл.: 10.12.2015.
18. Патент RU 167022 U1. МПК E02D 27/42. Модульный фундамент ветроэлектрической установки / В.В. Елистратов, А.А. Панфилов, Р.С. Денисов, М.А. Конищев. Патентобл.: ФГАУ ВО «СПбПУ»; заявл.: 02.06.2016; опубл.: 20.12.2016.
19. Патент RU 207608 U1. МПК E02D 27/42. Универсальный модульный фундамент арктической ветроэлектрической установки / В.В. Елистратов, А.А. Панфилов, С.Г. Петров. Патентобл.: ФГАУ ВО «СПбПУ»; заявл.: 30.07.2021; опубл.: 03.11.2021.
20. Петров С.Г., Панфилов А.А. Конструктивно-технологические особенности строительства модульных ветроэнергетических установок арктического исполнения / В сб.: Неделя науки СПбПУ: Мат. науч. конф. с межд. участием. Лучшие доклады (г. Санкт-Петербург, 18–23.11.2019). — СПб.: Изд-во СПбПУ, 2019. С. 36–41.
21. Размеры и характеристики контейнеров для перевозки грузов [Электр. текст]. ООО «Контмастер». Режим доступа: contmaster.ru. Дата обраб.: 27.08.2023.
22. Елистратов В.В. Научно-техническое обоснование и проектирование энергокомплексов на основе ВИЭ для сложных природно-климатических условий // Электричество, 2023. №10. С. 4–21.

References — see page 80.

The use of digital technologies in substantiating the energy and design parameters of the Arctic wind power plant. Pp. 56–59.

Victor V. Elistratov, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Alexander A. Panfilov**, PhD, Associate Professor, Higher School of Hydraulic Engineering and Energy Construction (HSHEEC), Institute of Civil Engineering (ICI), Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); **Stanislav G. Petrov**, graduate student, SPbPU

1. V.V. Elistratov. *Optimal'nye reshenija sistemy avtomaticheskogo upravlenija jenergo kompleksov srednej moshnosti na osnove vozobnovljaemykh istochnikov jenerгии* [Optimal solutions for the automatic control system of medium-power energy complexes based on renewable energy sources]. *Silovoe i jenergeticheskoe oborudovanie. Avtonomnye sistemy* [Power and energy equipment. Autonomous systems]. 2019. No. 2. Pp. 69–85. [In Russian]
2. L.M.H. Hall, A.R. Buckley. A review of energy systems models in the UK: Prevalent usage and categorization. *Applied Energy*. 2016. Vol. 169. Pp. 607–628.
3. V.V. Elistratov, A.A. Panfilov. *Osobennosti proektirovaniya fundamentov vetrojenergeticheskikh ustanovok v usloviyakh vechnoj merzloty* [Features of designing foundations of wind power plants in permafrost conditions]. *Poljarnaja mekhanika — 2016: Mat. III mezhd. konf.* [Polar Mechanics — 2016: Proc. of the III International Conference]. September 27–30, 2016. Vladivostok. *Izd-vo DVFU* [Publishing House of Far Eastern Federal University]. 2016. Pp. 599–609. [In Russian]
4. V.V. Elistratov. *Jenergosnabzhenie ob'ektov v Arktike s ispol'zovaniem vozobnovljaemykh istochnikov jenerгии* [Energy supply to facilities in the Arctic using renewable energy sources]. *Zhurnal "Neftegaz.ru"* ["Neftegaz.ru" Magazine]. 2023. No. 1. Pp. 74–79. [In Russian]
5. A breakdown of the digital wind farm. GE Vernova. Web-source: ge.com. Access date: 27.08.2023.
6. LIFESPAN: A digital suite optimizing operations proven to meet evolving. GE Vernova. Web-source: ge.com. Access date: 27.08.2023.
7. J.D.M. De Kooning, K. Stockman, J. De Maeyer, A.J. Laguna, L. Vandeveld. Digital twins for wind energy conversion systems: A literature review of potential modelling techniques focused on model fidelity and computational load. *Processes*. 2021. Vol. 9. Issue 12.
8. V.V. Elistratov, A.A. Panfilov, M.A. Konyshev, R.S. Denisov. The application of adapted materials and technologies to create energy systems based on renewable energy sources under harsh climatic conditions. *Applied Solar Energy*. 2018. Vol. 54. Issue 6. Pp. 472–476.
9. D. Chade, T. Miklis, D. Dvorak. Feasibility study of wind-to-hydrogen system for Arctic remote locations — Grimsey Island case study. *Renewable Energy*. 2015. Vol. 76. Pp. 204–211.
10. S. Sinha, S.S. Chandel. Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems. 2015. Vol. 50. Pp. 755–769.
11. H.-K. Ringkjøb, P.M. Haugan, I.M. Solbrekke. A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 96. Pp. 440–459.
12. Y. Liu, S. Yu, Y. Zhu, D. Wang, J. Liu. Modeling, planning, application and management of energy systems for isolated areas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. Pp. 460–470.
13. T. Lambert, P. Gilman, P. Lilienthal. Micropower system modelling with HOMER. In: *Integration of alternative sources of energy* (Chapter 15). Edited by M.G. Simoes, F.A. Farret. Wiley-IEEE Press. 2006. Pp. 379–418.
14. J.N. Rud, M. Hormann, V. Hammervold, R. Ásmundsson, I. Georgiev, G. Dyer, S.B. Andersen, J.E. Jessen, P. Kvorning, M.R. Brødsted. Energy in the West Nordics and the Arctic: Scenario analysis. Nordic Council of Ministers. Copenhagen, Denmark. 2018. 109 p.
15. V.V. Elistratov, R.S. Denisov. Justification of wind turbine operation and management modes for Russian Arctic conditions. *Proc. of 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM-2017)*. St. Petersburg, Russia. May 16–19, 2017.
16. V.V. Elistratov, M.A. Konishev, R.S. Denisov, I.V. Bogun. *Arkticheskaja vetrodizel'naja jelektrstantsija s intellektual'noj sistemoj upravlenija* [Arctic wind-diesel power plant with an intelligent control system]. *Jelektrichestvo* ["Electricity" Magazine]. 2022. No. 2. Pp. 29–37. [In Russian]
17. *Patent RU 157615 U1. IPC E04H 12/18. Teleskopicheskaja vetrobashnja* [Telescopic wind tower]. V.V. Elistratov, A.A. Panfilov, M.A. Konishev, R.S. Denisov. *Patent holder: FGAOU VO "SPbPU"* [Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]. Appl.: July 13, 2015. Publ.: December 10, 2015. [In Russian]
18. *Patent RU 167022 U1. IPC E02D 27/42. Modul'nyj fundament vetrojelektricheskij ustanovki* [Modular foundation of a wind power plant]. V.V. Elistratov, A.A. Panfilov, R.S. Denisov, M.A. Konishev. *Patent holder: FGAOU VO "SPbPU"* [Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]. Appl.: June 2, 2016; Publ.: December 20, 2016. [In Russian]
19. *Patent RU 207608 U1. IPC E02D 27/42. Universal'nyj modul'nyj fundament arkticheskij vetrojelektricheskij ustanovki* [Universal modular foundation of an Arctic wind power plant]. V.V. Elistratov, A.A. Panfilov, S.G. Petrov. *Patent holder: FGAOU VO "SPbPU"* [Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]. Appl.: July 30, 2021. Publ.: November 3, 2021. [In Russian]
20. S.G. Petrov, A.A. Panfilov. *Konstruktivno-tekhnologicheskie osobennosti stroitel'stva modul'nykh vetrojenergeticheskikh ustanovok arkticheskogo ispolnenija* [Structural and technological features of the construction of modular wind power plants of arctic design]. *V sb.: Nedelja nauki SPbPU: Mat. nauch. konf. s mezhd. uchastiem. Luchshie doklady* [In the coll.: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University's Science Week: Proc. of the Scientific Conference with International Participation. Best reports]. November 18–23, 2019. St. Petersburg. *Izd-vo SPbPU* [Publishing House of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]. 2019. Pp. 36–41. [In Russian]
21. *Razmery i kharakteristiki kontejnerov dlja perevozki tovarov* [Dimensions and characteristics of containers for the transportation of goods]. OOO "Kontmaster" ["Kontmaster", LLC]. Web-source: kontmaster.su. Access date: August 27, 2023. [In Russian]
22. V.V. Elistratov. *Nauchno-tekhnicheskoe obosnovanie i proektirovanie jenergo kompleksov na osnove VIJe dlja slozhnykh prirodno-klimaticheskikh uslovij* [Scientific and technical justification and design of energy complexes based on renewable energy sources for difficult natural and climatic conditions]. *Jelektrichestvo* ["Electricity" Magazine]. 2023. No. 10. Pp. 4–21. [In Russian]