

**Учредитель**

Белорусский национальный технический университет

Журнал включен в базы данных:  
Scopus, EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ,  
ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

**СОДЕРЖАНИЕ**

ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

- Есман А. К., Зыков Г. Л., Потачиц В. А., Кулешов В. К.** Моделирование вертикальной тонкопленочной солнечной батареи при воздействии концентрированного солнечного излучения ..... 381

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Доброго К. В., Фурсов С. А., Дубновицкий С. С., Червинский В. Л.** О методике расчета экономической эффективности применения систем накопления энергии ..... 393
- Брамм А. М., Матренин П. В., Попкова Н. А., Секацкий Д. А.** Прогнозирование коэффициента использования установленной мощности для объектов генерации на базе возобновляемых источников энергии для децентрализованных электроэнергетических систем ..... 411

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

- Кромм Г. А., Дробницкий Н. А., Волков А. В., Дружинин А. А., Ляпин В. Ю., Трулёв А. В., Качанов И. В., Бровка Г. М.** Повышение эффективности погружных многоступенчатых насосов на основе гидрофобизации поверхностей проточной части ..... 425
- Филимонова А. А., Власова А. Ю., Карницкий Н. Б., Чичирова Н. Д., Камалиева Р. Ф.** Промышленное апробирование гибридной технологии очистки воды из реки Оки методом углеродирования с порошкообразным сорбентом ..... 440

ЭКОНОМИКА ЭНЕРГЕТИКИ

- Любчик О. А., Пинаев В. Е., Ухова В. Н.** Особенности углеродного регулирования в Республике Беларусь и Российской Федерации: сравнительный анализ и тенденции ..... 452

**Главный редактор Александр Михайлович Маляревич**

**Редакционная коллегия**

- В. ВУЙЦИК* (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),  
*В. В. ГАЛАКТИОНОВ* (Русский институт управления имени В. П. Чернова, Москва, Российская Федерация),  
*М. ДАДО* (Зволенский технический университет, Зволен, Словацкая Республика),  
*К. В. ДОБРЕГО* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),  
*П. В. ЖУКОВСКИИ* (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),  
*В. В. ИВАШЕЧКИН* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
*А. С. КАЛИНИЧЕНКО* (Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь),  
*А. КОННОВ* (Университет Лунда, Швеция),  
*Х. МАХКАМОВ* (Университет Нортумбрии, Великобритания),  
*А. А. МИХАЛЕВИЧ* (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),  
*НГО ТУАН КИЕТ* (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),  
*О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ* (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),  
*Е. Н. ПИСЬМЕННЫЙ* (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),  
*Ф. А. РОМАНИЮК* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
*В. Ю. РУМЯНЦЕВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
*А.-С. С. САУХАТАС* (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),  
*В. С. СЕВЕРЯНИН* (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),  
*В. А. СЕДНИН* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
*Б. С. СОРОКА* (Институт газа НАН Украины, Киев, Украина),  
*В. А. СТРОЕВ* (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),  
*Е. В. ТОРОПОВ* (Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация),  
*Г. Н. УЗАКОВ* (Каршинский инженерно-экономический институт, Карши, Республика Узбекистан),  
*Б. М. ХРУСТАЛЕВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
*Л. В. ШЕНЕЦ* (РУП «Белинвестэнерго», Минск, Республика Беларусь)

**Ведущий научный редактор В. Н. Гурьянчик**

Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 марта 2024 г.  
Регистрационный номер 1257

---

Подписано к печати 30.09.2024. Формат бумаги 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага мелованная.  
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 11,75. Уч.-изд. л. 8,20. Тираж 35 экз.  
Дата выхода в свет . 2024. Заказ .

---

Адрес редакции: 220013, г. Минск, Республика Беларусь, пр. Независимости, 65.  
Белорусский национальный технический университет, корп. 2, комн. 327.  
Тел.: +375 17 320-65-14  
e-mail: [energy@bntu.by](mailto:energy@bntu.by); <http://energy.bntu.by>

---

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 3820000006896 от 03.03.2014.  
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2024

PROCEEDINGS OF THE CIS  
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS  
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

**ENERGETIKA**

V. 67, No 5  
2024

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL  
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

**Founder**

Belarusian National Technical University

---

The Journal is included in the following databases:  
Scopus, EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, RISC,  
Lan, CyberLeninka, Socionet

**CONTENTS**

GENERAL POWER ENGINEERING

- Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K.** Simulation of Vertical Thin-Film Solar Battery under Exposure of Concentrated Solar Radiation . . . . . 381

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

- Dobrego K. V., Fursov S. A., Dubnovitski S. S., Charvinski V. L.** On the Methodology for Calculating the Economic Efficiency of Energy Storage Systems . . . . . 393
- Bramm A. M., Matrenin P. V., Papkova N. A., Sekatski D. A.** Capacity Factor Forecasting for Generation Facilities Based on Renewable Energy Sources in Decentralized Power Systems . . . . . 411

HYDRAULIC POWER ENGINEERING

- Kromm G. A., Drobnitsky N. A., Volkov A. V., Druzhinin A. A., Lyapin V. Y., Trulev A. V., Kachanov I. V., Brovka G. M.** Improving the Efficiency of Submersible Multistage Pumps Based on the Hydrophobization of the Flow Part Surfaces . . . . . 425
- Filimonova A. A., Vlasova A. Yu., Karnitsky N. B., Chichirova N. D., Kamaliev R. F.** Industrial Testing of a Hybrid Technology for Water Purification from the Oka River Using the Method of Charcoalization with Powdered Sorbent . . . . . 440

POWER ENGINEERING ECONOMICS

- Liubchyk V. A., Pinaev V. E., Ukhova V. N.** Features of Carbon Regulation in the Republic of Belarus and the Russian Federation: Comparative Analysis and Trends . . . . . 452

**Editor-in-Chief Aliaksandr M. Maliarevich**

**Editorial Board**

- W. T. WÓJCIK* (Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland),  
*V. V. GALAKTIONOV* (Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, Moscow, Russian Federation),  
*M. DADO* (Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovak Republic),  
*K. V. DOBREGO* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),  
*P. W. ZHUKOWSKI* (Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland),  
*V. V. IVASHECHKIN* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),  
*A. S. KALINICHENKO* (Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus),  
*A. KONNOV* (Lund University, Sweden),  
*K. MAHKAMOV* (Northumbria University, United Kingdom),  
*A. A. MIKHALEVICH* (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),  
*NGO TUAN KIET* (Research Energy Institute under the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),  
*O. G. PENYAZKOV* (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),  
*E. N. PISMENNYI* (National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine),  
*F. A. ROMANIUK* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),  
*V. Yu. RUMLIANTSEV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),  
*A.-S. S. SAUHATAS* (Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia),  
*V. S. SEVERYANIN* (Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus),  
*V. A. SEDNIN* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),  
*B. S. SOROKA* (The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine),  
*V. A. STROEV* (National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation),  
*E. V. TOROPOV* (South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation),  
*G. N. UZAKOV* (Karshi Engineering Economic Institute, Karshi, Republic of Uzbekistan),  
*B. M. KHROUSTALEV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),  
*L. V. SHENETS* (RUE “Belinvestenergoberezhnie”, Minsk, Republic of Belarus)

**Lead Science Editor V. N. Guryanchyk**

**Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2024, March, 19<sup>th</sup>  
Reg. No 1257**

---

Passed for printing 30.09.2024. Dimension of paper 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Coated paper.  
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 11,75.  
An edition of 35 copies. Date of publishing 2024. Order list .

---

**ADDRESS**

Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 320-65-14  
e-mail: [energy@bntu.by](mailto:energy@bntu.by); <http://energy.bntu.by>

---

Printed in BNTU. License LP 3820000006896 from 03.03.2014.  
220013, Minsk, 65, Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2024

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-381-392>

УДК 620.91; 621.383.51

## Моделирование вертикальной тонкопленочной солнечной батареи при воздействии концентрированного солнечного излучения

А. К. Есман<sup>1)</sup>, Г. Л. Зыков<sup>1)</sup>, В. А. Потачиц<sup>1)</sup>, В. К. Кулешов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** Солнечная энергетика является одним из наиболее важных и перспективных секторов энергетики в мире. Батареи, которые преобразуют солнечный свет в электрическую энергию, могут стать заменой традиционным углеродным источникам энергии. Вертикальные тонкопленочные солнечные батареи – это один из новых подходов к генерации солнечной энергии. Вертикальное расположение солнечных панелей обеспечивает максимальное поглощение солнечного света на протяжении всего дня. Такая ориентация позволяет батареям получать солнечную энергию даже при низком угле падения солнечных лучей, что увеличивает время работы и повышает эффективность производства электроэнергии. В данной работе предложена трехмерная модель вертикально ориентированной солнечной батареи, а также выполнен расчет и произведена оценка температурных характеристик и КПД, получаемых в условиях изменения температуры окружающей среды. При этом варьировались плотности мощности концентрированного солнечного излучения с максимальными значениями от 1 до 10 кВт/м<sup>2</sup>. Изучено распределение и построены зависимости максимальных значений температуры солнечной батареи и градиента температуры внутри нее, а также зависимости минимальных и максимальных значений теплового потока с поверхности солнечной батареи от времени суток в серединах января и июля. Как показали расчеты, максимальные значения градиента температуры внутри солнечной батареи в январе на ~47–50 % выше, чем в июле. Разность потенциалов, генерируемая батареей, достигает максимальных значений с 11:00 до 16:00 как в январе, так и в июле. Использование вертикальных тонкопленочных солнечных батарей позволит повысить эффективность выработки электроэнергии и уменьшить эксплуатационные расходы за счет снижения влияния пыли, дождя и снега.

**Ключевые слова:** солнечная панель, CuInSe<sub>2</sub>, трехмерная имитационная модель, Comsol Multiphysics, теплопередача, стабилизация температуры, градиент температуры, тепловой поток, КПД

**Для цитирования:** Моделирование вертикальной тонкопленочной солнечной батареи при воздействии концентрированного солнечного излучения / А. К. Есман [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 5. С. 381–392. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-381-392>

---

### Адрес для переписки

Есман Александр Константинович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 331-00-50  
[ak\\_esman@bntu.by](mailto:ak_esman@bntu.by)

### Address for correspondence

Esman Alexander K.  
Belarusian National Technical University  
65 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 331-00-50  
[ak\\_esman@bntu.by](mailto:ak_esman@bntu.by)

---

## Simulation of Vertical Thin-Film Solar Battery under Exposure of Concentrated Solar Radiation

A. K. Esman<sup>1)</sup>, G. L. Zykov<sup>1)</sup>, V. A. Potachits<sup>1)</sup>, V. K. Kuleshov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Solar energy is one of the most important and promising energy sectors in the world. Batteries that convert sunlight into electrical energy could become a replacement for traditional carbon-based energy sources. Vertical thin-film solar batteries are one of the new approaches to solar energy generation. The vertical configuration of solar panels provides maximum absorption of sunlight throughout the day. This orientation allows the batteries to capture solar energy even at low angles of incidence of the sun's rays, which prolongs their operating time and improves the efficiency of electricity production. In this work, the authors proposed a three-dimensional model of a vertically oriented solar battery, as well as they calculated and evaluated the temperature characteristics and the efficiency obtained under conditions of changing ambient temperature. Herewith the power densities of concentrated solar radiation with maximum values from 1 to 10 kW/m<sup>2</sup> were varied. The distribution of the maximum values of the surface temperature of the solar battery has been studied. Also, the dependences of the maximum values of the solar battery temperature and the temperature gradient inside it, as well as the dependences of the minimum and maximum values of the heat flux from the solar battery surface on the time of day in the middle of January and July have been studied and plotted. As the calculations have shown, the maximum values of the temperature gradient inside the solar battery in January are ~47–50 % higher than in July. The potential difference, generated by the battery, reaches its maximum values from 11 a.m. to 4 p.m. both in January and July. The use of vertical thin-film solar batteries will improve the power generation efficiency and lower operating costs by reducing the influence of dust, rain and snow.

**Keywords:** solar panel, CuInSe<sub>2</sub>, 3D simulation model, Comsol Multiphysics, heat transfer, temperature stabilization, temperature gradient, heat flux, efficiency

**For citation:** Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. (2024) Simulation of Vertical Thin-Film Solar Battery under Exposure of Concentrated Solar Radiation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (5), 381–392. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-381-392> (in Russian)

### Введение

Отрасль солнечной энергетики постепенно расширяется, так как экологическая повестка приобретает все большую актуальность. В 2022 г. солнечная энергетика выросла на 240 ГВт, то есть достигла 1185 ГВт. Ожидается в 2024 г. прирост глобальных мощностей солнечной энергетики более чем на 350 ГВт с учетом ввода в эксплуатацию солнечных электростанций. Одним из путей увеличения генерации электричества и стабилизации его производства является выбор географического месторасположения и угла наклона солнечных панелей. Обычно эти панели располагают под углом 20–35° по отношению к земле. Однако исследования показали, что выработка энергии увеличится, если ставить панели под углом 90° [1]. Ученые подсчитали, что вертикальные панели позволят существенно повысить общее производство энергии, тем самым уменьшить число установок, работающих на ископаемом топливе, которые обычно используются при высоком спросе на электроэнергию (утро и вечер). Еще одним пре-

имуществом вертикально ориентированных солнечных батарей является возможность экономии земельных угодий. Кроме того, рассматриваемые батареи имеют гибкую конструкцию и могут быть размещены на различных поверхностях, включая стены зданий или столбы, что открывает дополнительные возможности для их использования [2, 3].

Целью статьи являются разработка имитационной модели солнечной батареи с вертикальной ориентацией ее модулей и оценка основных параметров в реальных условиях эксплуатации.

### Конструкция вертикальной солнечной батареи

Конструкция предлагаемой солнечной батареи с вертикальной ориентацией ее модулей приведена на рис. 1 [4].



Рис. 1. Структура вертикальной тонкопленочной солнечной батареи:

1 – нанопленка окиси кремния; 2 – корпус из силикатного стекла; 3 – герметик, 4 – фотоэлектрический преобразователь на основе  $\text{CuInSe}_2$  с лицевым прозрачным электродным слоем (на рис. не указан); 5 и 7 – электродные слои; 6 – термоэлектрический преобразователь на основе  $\text{CuInSe}_2$ ; 8 – радиатор

Fig. 1. The structure of the vertical thin-film solar battery: 1 – silicon oxide nanofilm; 2 – silicate glass case; 3 – sealant; 4 –  $\text{CuInSe}_2$ -based photoelectric converter with a transparent front electrode layer (not shown in the figure); 5 and 7 – electrode layers; 6 – thermoelectric converter based on  $\text{CuInSe}_2$ ; 8 – radiator

Солнечная батарея включает в себя радиатор 8 с вертикальными пазами, термически связанный с тыльной стороной вертикально ориентированного термоэлектрического преобразователя 6 через вертикальный электродный слой 7 и далее – с тыльной стороной фотоэлектрического преобразователя 4 – через вертикальный электродный слой 5. Фронтальная сторона фотоэлектрического преобразователя механически и оптически соединена с корпусом 2 посредством герметика 3 через лицевой прозрачный электродный слой. На внешней вертикальной поверхности корпуса расположена нанопленка окиси кремния 1.

Для обеспечения максимального проникновения солнечного света и минимизации потерь энергии внутри солнечной батареи выбираются гер-

метики с коэффициентом преломления, приближенным к коэффициенту преломления силикатного стекла. Это позволяет снизить отражение света и повысить эффективность преобразования солнечной энергии. Однако конкретный диапазон значений коэффициента преломления герметика может варьироваться в зависимости от выбранных материалов, конструкции и требований, предъявляемых к солнечной батарее. Важно учитывать также факторы, такие как механическая прочность, стойкость к воздействию внешней среды и улучшение теплового отвода. Коэффициент преломления  $n$  герметика нами был выбран исходя из условия

$$n_M < n < n_{SM}, \quad (1)$$

где  $n_M$  и  $n_{SM}$  – коэффициенты преломления соответственно силикатного стекла и фотоэлектрического преобразователя.

Нанопленка окиси кремния (размером  $100 \times 178 \times 178$  мм) представляет собой тонкий слой наночастиц окиси кремния, полученных из коллоидного раствора. Нанопленка прочно прикреплена к корпусу из силикатного стекла (размером  $3 \times 178 \times 178$  мм) и образует сплошной слой наноразмерных бугорков, обладающих самоупорядочивающимися свойствами, которые препятствуют скапливанию на нанопленке капель воды, снега, частиц пыли и т. д. Герметик представляет собой силиконовый прозрачный самополимеризующийся клей. Коэффициент преломления  $n$  герметика выбран согласно условию (1) с учетом того, что силикатное стекло корпуса вместе с герметиком являются просветляющим покрытием с минимальным отражением солнечного излучения для фотоэлектрического преобразователя (размером  $1 \text{ мкм} \times 178 \text{ мм} \times 166 \text{ мм}$ ), который электрически соединен с электродным слоем 5. Термоэлектрический преобразователь подключен к электродным слоям 5 и 7. Радиатор из алюминиевого сплава Д16Т термически соединен с электродным слоем 7.

### **Алгоритм работы вертикальной тонкопленочной солнечной батареи**

Тонкопленочную солнечную батарею устанавливают фронтальной стороной в южном направлении. Солнечное излучение поступает на нанопленку окиси кремния как непосредственно, так и после отражения от ровной подстилающей поверхности (например, воды или снега). После прохождения через нанопленку окиси кремния, силикатное стекло корпуса, а также герметик оно поступает на фотоэлектрический преобразователь. С одной стороны, в фотоэлектрическом преобразователе происходит поглощение падающего солнечного излучения, в результате чего генерируются электрические заряды, а с другой стороны, солнечное излучение (его инфракрасная часть) нагревает фотоэлектрический преобразователь. Сгенерированные заряды разделяются электрическим полем  $p-n$  перехода, создавая фото-ЭДС между лицевым прозрачным электродным слоем

и электродным слоем 5. Часть фотогенерированных зарядов рекомбинирует, что приводит к нагреву фотоэлектрического преобразователя и появлению градиента температур между электродными слоями 5 и 7. Это, в свою очередь, вызывает термоЭДС между боковыми сторонами термоэлектрического преобразователя, электрически соединенными с электродными слоями 5 и 7. Поэтому генерируется выходное напряжение солнечной батареи, включающее фото- и термоЭДС, между лицевым прозрачным электродным слоем и электродом 7.

Радиатор позволяет повысить эффективность рассеивания тепловой энергии в окружающую среду и тем самым выровнять его температуру с температурой окружающей среды. Более того, рассматриваемая солнечная батарея обладает свойством самоочищения входной апертуры и тем самым снижает частоту очистки устройства.

### Компьютерное моделирование

Трехмерная модель вертикально ориентированной солнечной батареи разработана и оптимизирована в программной среде COMSOL Multiphysics [5, 6]. С использованием модуля Heat Transfer (теплопередача) исследовано функционирование солнечной батареи в определенный день (например, 15 января и 15 июля) в заданном местоположении (например, выбраны географические координаты г. Минска). Описанный анализ с помощью опции Solar Position позволяет определить направление и интенсивность солнечного излучения, учитывая географические координаты и время суток, и более точно моделировать работу солнечной батареи в зависимости от угла падения солнечных лучей [7]. Радиационная теплопередача между элементами солнечной батареи позволила учесть влияние тепловых процессов на работу устройства. Учет суточных и сезонных изменений температуры окружающей среды и интенсивности солнечного излучения спектра AM1,5 является важным фактором для оптимальной эксплуатации солнечной батареи в различных условиях. Максимальное значение плотности мощности  $P_{\max}$  солнечного излучения варьировалось от 1 до 10 кВт/м<sup>2</sup>. Расчет характеристик солнечной батареи выполнялся с учетом стабилизации температуры тыльной стороны радиатора на уровне температуры окружающей среды.

В условиях устойчивой ясной погоды суточный ход температуры проявляется достаточно четко, но в отдельные дни могут наблюдаться существенные изменения, приводящие к сложной форме его кривой. Эти изменения вызываются различными факторами, такими как облачность, приток воздушных масс с другой температурой и др. В результате минимум этой кривой может сместиться даже на дневные часы, а максимум – на ночь. В климатологии обычно рассматривается суточный ход температуры воздуха, осредненный за длительный период времени, чтобы скомпенсировать непериодические изменения. В результате такого усреднения кривая суточного хода температуры становится приближенной к синусоиде

$$T_{amb}(t) = T_{avg} + \Delta T \cos\left(2\pi \frac{t-14}{24}\right),$$

где  $T_{avg}$  и  $\Delta T$  – средняя температура воздуха и половина суточного изменения температуры соответственно;  $t$  – время суток, ч.

При моделировании использовалась функция  $T_{amb}(t)$ , а средние минимальная ( $T_{avg} - \Delta T$ ) и максимальная ( $T_{avg} + \Delta T$ ) месячные температуры воздуха в г. Минске были взяты с сайта <http://belmeteo.net>. Кроме того, в зависимости от географического положения и времени суток определялись углы падения солнечного излучения на солнечную батарею.

Как следует из [8], построение расчетной сетки представляет собой важный и трудоемкий этап создания модели солнечной батареи методом конечных элементов, так как это влияет на эффективность использования вычислительных ресурсов. В Comsol Multiphysics имеются 4 типа конечных элементов: тетраэдры, гексаэдры, треугольные призмы и пирамиды, а также 9 предустановленных размеров: от очень мелкого (Extremely fine) до очень крупного (Extremely coarse). В качестве конечных элементов для построения сетки солнечной батареи выбраны тетраэдры, так как с их помощью можно разделить и аппроксимировать любой геометрический объект со сколько угодно сложной топологией (рис. 2).

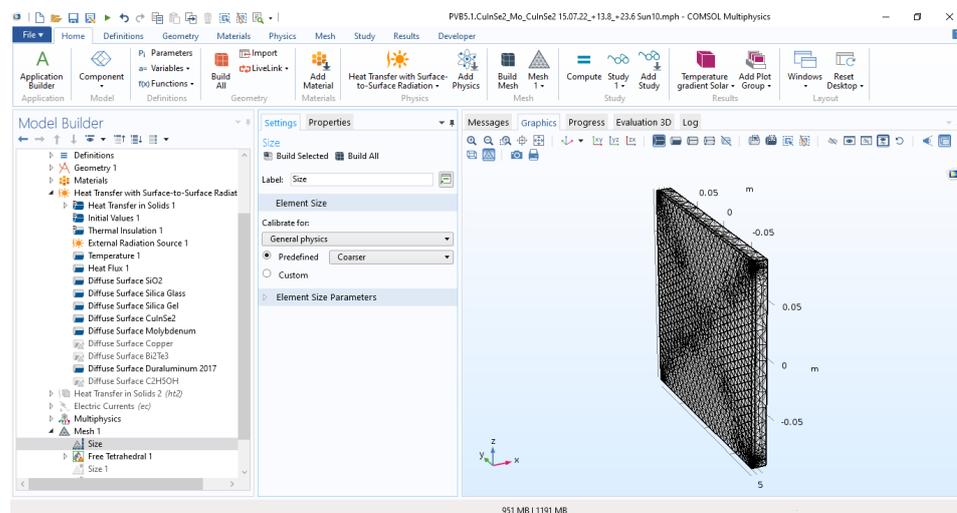


Рис. 2. Скриншот операции построения сетки солнечной батареи в виде тетраэдров в программной среде Comsol Multiphysics

Fig. 2. Screenshot of the grid construction of the solar battery in the form of tetrahedrons in the Comsol Multiphysics software environment

### Анализ полученных результатов

Моделирование вертикальной тонкопленочной солнечной батареи осуществлялось в условиях изменения температуры окружающей среды и воздействия солнечного излучения спектра AM1,5. Показано, что происходит

преимущественно равномерный нагрев ее поверхностных слоев, за исключением торцевых сторон, температура которых в полдень значительно больше температуры остальных поверхностей батареи (рис. 3).

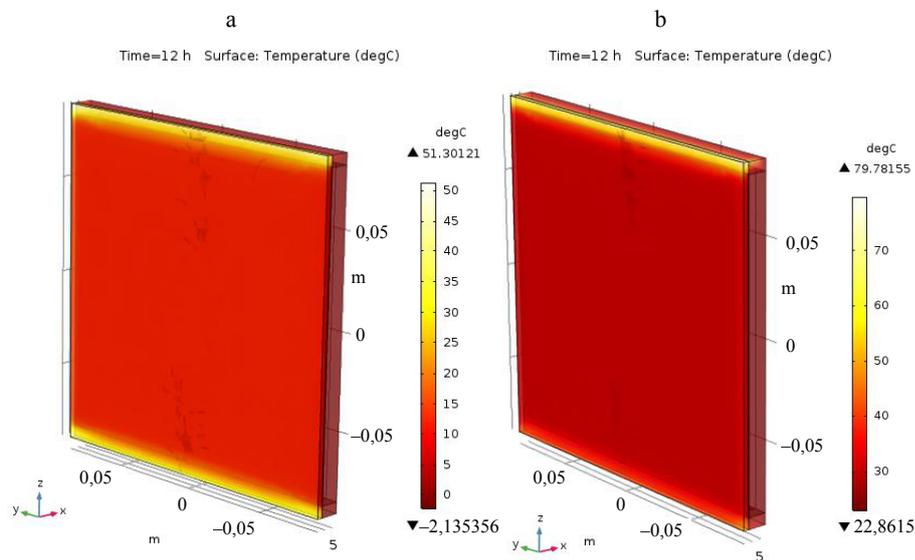


Рис. 3. Распределение максимальных значений температуры поверхности солнечной батареи при воздействии на ее поверхность солнечного излучения ( $P_{\max} = 10 \text{ кВт/м}^2$ ) в полдень: а – 15 января; б – 15 июля

Fig. 3. Distribution of the maximum values of the surface temperature of the solar battery under exposure to the solar radiation ( $P_{\max} = 10 \text{ kW/m}^2$ ) on its surface at noon on 15<sup>th</sup> January (a) and at noon on 15<sup>th</sup> July (b)

Как видно из рис. 4, начиная с восхода солнца и до 11:00 максимальная температура солнечной батареи повышается. Поскольку температура окружающей среды и продолжительность светового дня в январе меньше, чем в июле, возрастание температуры батареи в январе происходит более резко, чем в июле. С 11:00 до 16:00 существенных изменений максимальной температуры солнечной батареи как в январе, так и июле не наблюдается, что обусловлено постепенным нагревом всех ее элементов к 11:00 и эффективной радиационной теплопередачей между ними. Начиная с 16:00 понижается температура окружающей среды и, как следствие, максимальная температура солнечной батареи. Продолжительность светового дня и значения температуры окружающей среды также влияют на скорость понижения максимальной температуры. Чем они больше, тем более плавным будет уменьшение температуры солнечной батареи с течением времени. При повышении мощности концентрированного солнечного излучения и прочих равных условиях увеличение (с восхода солнца и до 11:00) и уменьшение (с 16:00 и до захода солнца) максимальной температуры солнечной батареи становится более существенным. Более того, возрастают изменения максимальной температуры, например при  $P_{\max} = 3 \text{ кВт/м}^2$  (кривая 3, рис. 4) максимальная температура не превы-

шает +41 °С в промежутке времени с 11:00 до 16:00. Однако существенного возрастания температуры батареи в этот промежуток времени не происходит за счет стабилизации температуры тыльной стороны радиатора на уровне температуры окружающей среды.

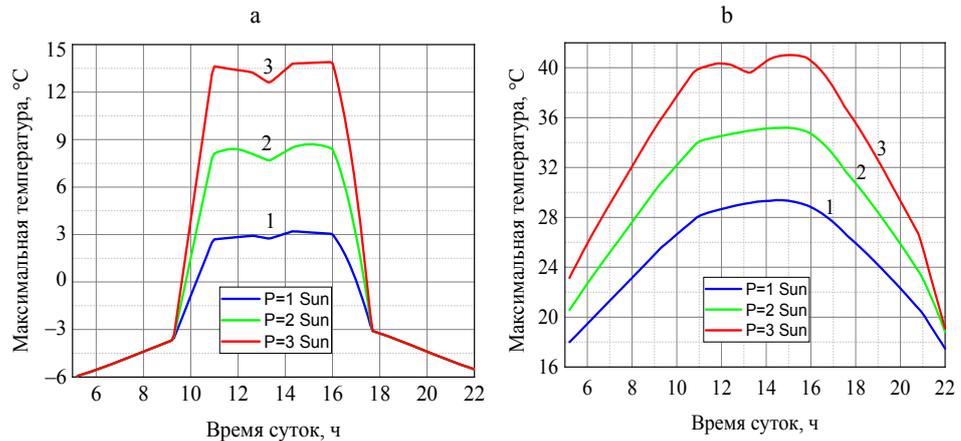


Рис. 4. Зависимости максимальных значений температуры солнечной батареи от времени суток при  $P_{\max} = 1 \text{ кВт/м}^2$  (кривая 1),  $2 \text{ кВт/м}^2$  (кривая 2) и  $3 \text{ кВт/м}^2$  (кривая 3): а – в середине января; б – в середине июля

Fig. 4. Dependencies of the maximum temperature values of the solar battery on the time of day in the middle of: а – January; б – July at  $P_{\max} = 1 \text{ kW/m}^2$  (curve 1),  $2 \text{ kW/m}^2$  (curve 2) and  $3 \text{ kW/m}^2$  (curve 3)

Зависимость теплового потока с поверхности солнечной батареи от времени суток приведена на рис. 5. В реальных условиях между телами всегда происходит теплообмен. Количество отдаваемой и принимаемой теплоты определяется разностью между излучаемой и поглощаемой энергией. Как показали расчеты, тепловой поток с поверхности солнечной батареи в середине января достигает максимальных значений:  $\sim 2,18$  и  $\sim 2,47 \text{ кВт/м}^2$  в 11:00 и 16:00 соответственно (при  $P_{\max} = 3 \text{ кВт/м}^2$ , кривая 3, рис. 5а). А в середине июля его максимальные значения также достигаются дважды: около 7:30 ( $\sim 3,61 \text{ кВт/м}^2$ ) и около 19:00 ( $\sim 3,66 \text{ кВт/м}^2$ ) (при  $P_{\max} = 3 \text{ кВт/м}^2$ , кривая 3, рис. 5б). При этом показано, что в дневные часы (с 11:00 до 16:00) тепловой поток ниже (кривые 1, 1', 2 и 2', рис. 5). Это обусловлено тем, что к середине дня как января, так и июля месяца температура всех элементов батареи выравнивается, а градиент температуры становится меньше.

На рис. 6 показаны изменения максимальных значений градиента температуры внутри термоэлектрического преобразователя солнечной батареи в течение суток в условиях облучения ее поверхности солнечным излучением, максимальное значение плотности мощности которого составляет 1, 2 и 3  $\text{кВт/м}^2$  в январе (кривые 1', 2' и 3') и июле (кривые 1, 2 и 3). Из полученных результатов следует, что градиент температуры достигает максимума около 13:00 как в середине января, так и в середине июля. В январе максимальные значения градиента температуры на  $\sim 50\%$  выше, чем в июле (рис. 6), вследствие большей разности температур на

поверхностях термоэлектрических преобразователей солнечной батареи в условиях более низких значений температуры окружающей среды.

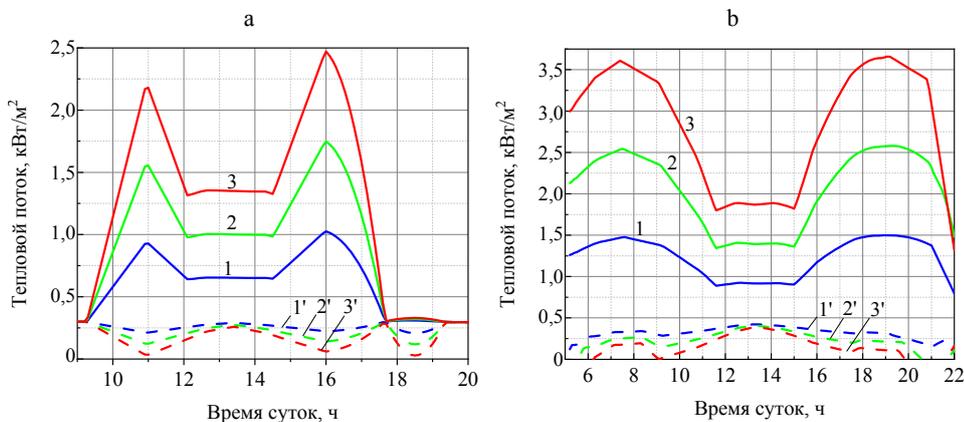


Рис. 5. Зависимости минимальных (кривые 1', 2' и 3') и максимальных (кривые 1, 2 и 3) значений теплового потока с поверхности солнечной батареи от времени суток при  $P_{\max} = 1$  кВт/м<sup>2</sup> (кривые 1' и 1), 2 кВт/м<sup>2</sup> (кривые 2' и 2) и 3 кВт/м<sup>2</sup> (кривые 3' и 3): а – в середине января; б – в середине июля

Fig. 5. Dependencies of the minimum (curves 1', 2' and 3') and maximum (curves 1, 2 and 3) values of the heat flux from the surface of the solar battery on the time of day in the middle of: а – January; б – July at  $P_{\max} = 1$  (curves 1' and 1), 2 (curves 2' and 2) and 3 (curves 3' and 3) kW/m<sup>2</sup>

При воздействии солнечного излучения на солнечную батарею градиенты температуры (рис. 6, 7) между внутренними и внешними поверхностями ее термоэлектрических преобразователей достигают максимальных значений с 11:00 до 16:00, вследствие чего генерируемая разность потенциалов между электродами 5 и 7 как в январе, так и в июле также достигает максимальных значений, увеличивая КПД работы устройства в целом.

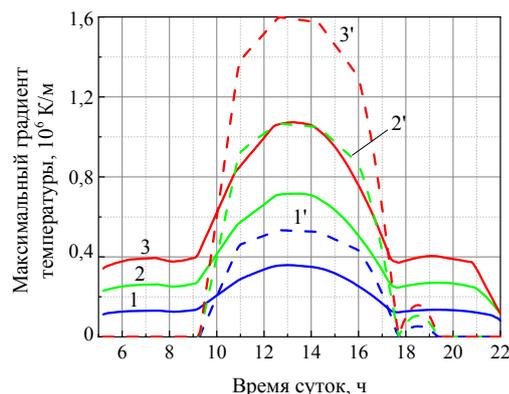


Рис. 6. Зависимости максимальных значений градиента температуры внутри солнечной батареи от времени суток при  $P_{\max} = 1$  кВт/м<sup>2</sup> (кривые 1' и 1), 2 кВт/м<sup>2</sup> (кривые 2' и 2) и 3 кВт/м<sup>2</sup> (кривые 3' и 3) в серединах января (кривые 1', 2' и 3') и июля (кривые 1, 2 и 3)

Fig. 6. Dependencies of the maximum values of the temperature gradient inside the solar battery on the time of day in the middle of January (curves 1', 2' and 3') and July (curves 1, 2 and 3) at  $P_{\max} = 1$  (curves 1' and 1), 2 (curves 2' and 2) and 3 (curves 3' and 3) kW/m<sup>2</sup>

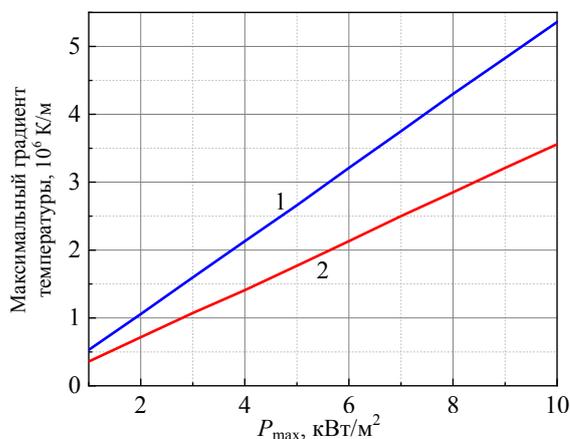


Рис. 7. Зависимости максимальных значений градиента температуры внутри солнечной батареи от максимальных значений плотности мощности солнечного излучения в серединах января (кривая 1) и июля (кривая 2)

Fig. 7. Dependencies of the maximum values of the temperature gradient inside the solar battery on the maximum values of solar radiation power density in the middle of January (curve 1) and July (curve 2)

Для фотоэлектрического преобразователя на основе  $\text{CuInSe}_2$  [9] при интенсивности освещения  $I_{\text{осв}}$  в 1 солнце  $100 \text{ мВт/см}^2$  КПД = 20 %. При  $I_{\text{осв}} = 174 \text{ мВт/см}^2$  КПД его достигает максимального значения 22 %, а при  $I_{\text{осв}} = 700 \text{ мВт/см}^2$  КПД снижается до 18 %. В то же время при освещении, например, в 7 солнц ( $700 \text{ мВт/см}^2$ ) в январе (рис. 7) градиент температуры внутри термоэлектрического слоя на основе  $\text{CuInSe}_2$  достигает значения  $3,7 \times 10^6 \text{ К/м}$ , что соответствует термоЭДС, равной 29,6 мВ [10]. Это означает, что КПД солнечной батареи при указанной интенсивности освещения равен 23,3 % и при этом происходит полная компенсация нелинейных свойств фотоэлектрического преобразователя при его нагреве, так как КПД солнечной батареи при  $I_{\text{осв}} = 174 \text{ мВт/см}^2$  будет равен 23,4 %. Расчетная толщина термоэлектрического слоя составила в данном случае 10 мкм.

## ВЫВОДЫ

1. Трехмерная имитационная модель предложенной вертикальной тонкопленочной солнечной батареи, разработанная в программной среде COMSOL Multiphysics, позволила рассчитать и оценить основные температурные характеристики и диапазон КПД в условиях суточных и сезонных изменений температуры окружающей среды, а также плотности мощности солнечного излучения спектра AM1,5, максимальные значения которых варьировались от 1 до  $10 \text{ кВт/м}^2$ .

2. Выполненные расчеты показали, что зимой при плотности мощности солнечного излучения с максимальным значением  $7 \text{ кВт/м}^2$  можно получить полную компенсацию снижения КПД фотоэлектрического преобразо-

вателя на основе  $\text{CuInSe}_2$  из-за его нагревания в середине дня. Точно также происходит компенсация и летом – с увеличением среднего значения КПД солнечной батареи на 2–3 % за счет генерации термоэлектричества. При использовании объемных термоэлектрических слоев, можно получить больший рост КПД солнечной батареи, но в этом случае толщина ее существенно увеличится, что приведет к росту ее стоимости.

3. Установлено, что использование вертикальных тонкопленочных солнечных батарей позволит повысить эффективность выработки электроэнергии за счет увеличения времени генерации электричества и снижения загрязненности их поверхности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Reker, S. Investigation of Vertical Solar Power Plants Into a Future German Energy System / S. Reker, J. Schneider, C. Gerhards // *Smart Energy*. 2022. Vol. 7. P. 100083-1–100083-12. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100083>.
2. Radiative Cooling for Vertical Solar Panels / H. Fang [et al.] // *Science*. 2024. Vol. 27, Iss. 2. P. 108806-1–14. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.108806>.
3. Исследование вертикально ориентированной солнечной батареи при воздействии концентрированного солнечного излучения / А. К. Есман [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 5. С. 405–410. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-405-410>.
4. Солнечная батарея: пат. на пол. модель 7713 Респ. Беларусь: МПК F 24J 2/06, H 02N 6/00 / А. К. Есман, В. К. Кулешов, М. В. Шпектор. Оpubл. 30.10.2011.
5. Heat Transfer Module. Analyze Thermal Effects with Advanced Simulation Software [Electronic Resource] // COMSOL, Inc. USA. Mode of access: <https://www.comsol.com/heat-transfer-module>. Date of access: 21.04.2024.
6. Моделирование тонкопленочных солнечных элементов со структурой халькопирита  $\text{CuInSe}_2$  / А. К. Есман [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 1. С. 5–13. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-5-13>.
7. Есман, А. К. Моделирование характеристик фототермоэлектрической батареи / А. К. Есман [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 3. С. 250–258. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-250-258>.
8. Thermo-Photo-Voltaic Cell [Electronic Resource] // COMSOL, Inc. USA. Mode of access: <https://www.comsol.com/model/thermo-photo-voltaic-cell-494>. Date of access: 21.04.2024.
9. Временная стабильность характеристик солнечных элементов на основе соединения  $\text{CuInGaSe}_2$  в процессе работы / Е. В. Луценко [и др.] // *Лазерная физика и оптические технологии: материалы IX Междунар. науч. конф. (Гродно, 30 мая – 2 июня 2012 г.): в 2 ч. / редкол.: С. А. Маскевич (гл. ред.) [и др.]*. Гродно: ГрГУ, 2012. Ч. 2. С. 23–26.
10. Термоэлектрические свойства твердых растворов  $(\text{CuInSe}_2)_{1-x}(\text{In}_2\text{Te}_3)_x$  / Ч. И. Абилов [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. 2022. Т. 56, вып. 1. С. 38–41. <https://doi.org/10.21883/FTP.2022.01.51809.25>.

Поступила 11.03.2024 Подписана в печать 21.05.2024 Опубликована онлайн 30.09.2024

#### REFERENCES

1. Reker S., Schneider J., Gerhards C. (2022) Investigation of Vertical Solar Power Plants into a Future German Energy System. *Smart Energy*. 7, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100083>.
2. Fang H., Zhou L., Dang S., St. De Wolf, Q. Gan. (2024) Radiative Cooling for Vertical Solar Panels. *Science*, 27 (2), 108806. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.108806>.
3. Esman, A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. (2023) Study of Vertically Oriented Solar Battery by Exposure of Concentrated Solar Radiation. *Nauka i Tekhnika* =

- Science and Technique*, 22 (5), 405–410. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-405-410> (in Russian).
4. Esman A. K., Kuleshov V. K., Shpektor M. V. (2011) *Solar Battery*. Patent of the Republic of Belarus No 7713 (in Russian).
  5. Heat Transfer Module. Analyze Thermal Effects with Advanced Simulation Software. *COMSOL*. Available at: <https://www.comsol.com/heat-transfer-module> (accessed: 21 April 2024).
  6. Esman A. K., Zыkov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. (2020) Simulation of Thin-Film Solar Cells with a CuInSe<sub>2</sub> Chalcopyrite Structure. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 5–13. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-5-13> (in Russian).
  7. Esman A. K., Zыkov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. (2021) Simulation of Photovoltaic Thermoelectric Battery Characteristics. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (3), 250–258. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-250-258> (in Russian).
  8. Thermo-Photo-Voltaic Cell. *COMSOL*. Available at: <https://www.comsol.com/model/thermo-photo-voltaic-cell-494> (accessed: 21 April 2024).
  9. Lutsenko E. V., Rzheutsky N. V., Voinilovich A. G., Danilchik A. V., Svitenkov I. E., Pavlovsky V. N., Yablonsky G. P., Shiripov V. Ya., Nastochkin S. M., Khokhlov E. A. (2012) Temporal Stability of the Characteristics of Solar Cells Based on the CuInGaSe<sub>2</sub> Compound during Operation. *Lazernaya fizika i opticheskiye tekhnologii: materialy IX mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Laser physics and optical technologies: materials of the IX international scientific conference (Grodno, May 30 – June 2, 2012. Part 2)]. Grodno, Yanka Kupala State University of Grodno, 23–26 (in Russian).
  10. Abilov Ch. I., Hasanova M. Sh., Huseynova N. T., Kasumova E.K. (2022) Thermoelectric Properties of (CuInSe<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub>(In<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>)<sub>x</sub> Solid Solutions. *Semiconductors*, 56 (1), 31–34. <https://doi.org/10.21883/SC.2022.01.53014.25>.

Received: 11 March 2024

Accepted: 21 May 2024

Published online: 30 September 2024

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-393-410>

УДК 621.355:004.94

## О методике расчета экономической эффективности применения систем накопления энергии

К. В. Доброго<sup>1)</sup>, С. А. Фурсов<sup>1)</sup>, С. С. Дубновицкий<sup>2)</sup>, В. Л. Червинский<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>IAK-GROUP ООО «Актив ОМЗ» (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>IAK-GROUP ООО «Зубр энерджи» (Пинск, Республика Беларусь),

<sup>3)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** В связи с ростом «зеленой» энергетики, необходимостью регулирования нагрузки крупных энергосистем, развитием электротранспорта в мире все шире применяются системы накопления электроэнергии (СНЭ). В Республике Беларусь и Российской Федерации разработаны концептуальные документы, констатирующие необходимость модернизации нормативно-правовой базы применения СНЭ, создания научного обеспечения развития технологий СНЭ, центров компетенции и реализации пилотных проектов. В настоящей статье дается пример расчета экономического эффекта применения СНЭ на промышленном предприятии. Предлагается методика, которая может быть использована для разработки стандартизированных методик расчета экономического эффекта применения СНЭ на предприятиях и в локальных энергетических системах потребителей различного типа. Охарактеризованы основные функции, выполняемые СНЭ на предприятии. Рассмотрены особенности расчета экономического эффекта выполнения указанных функций в условиях статистического характера режима нагрузки предприятия. Приведены расчеты простого срока окупаемости инвестиций на установку СНЭ для предприятия при нескольких вариантах условий оплаты за электроэнергию. Показано, что экономический результат использования СНЭ существенно зависит как от условий тарификации и графиков нагрузки предприятия, так и от специфических требований к качеству и надежности электроснабжения и должен оцениваться в каждом конкретном случае индивидуально.

**Ключевые слова:** система накопления энергии, аккумуляторные батареи, литий-ионные батареи, промышленное применение, экономическая эффективность, методика расчета

**Для цитирования:** О методике расчета экономической эффективности применения систем накопления энергии / К. В. Доброго [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 5. С. 393–410. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-5-393-410>

## On the Methodology for Calculating the Economic Efficiency of Energy Storage Systems

K. V. Dobrego<sup>1)</sup>, S. A. Fursov<sup>1)</sup>, S. S. Dubnovitski<sup>2)</sup>, V. L. Charvinski<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>IAK-GROUP LLC “Aktiv OMZ” (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>IAK GROUP LLC “Zubr energy” (Pinsk, Republic of Belarus),

<sup>3)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Due to the growth of “green” energy, the need to regulate the load on large power systems, and the development of electric transport, electricity storage systems (ESS) are increasingly

**Адрес для переписки**  
Доброго Кирилл Викторович  
IAK-GROUP, ООО «Актив-ОМЗ»  
ул. Л. Толстого, 10,  
220007, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 29 56-28-559  
k.dobrego@aomz.lak.by

**Address for correspondence**  
Dobrego Kirill V.  
IAK-GROUP, LLC «Aktiv-OMZ»  
10 L.Tolstogo str.,  
220007, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 29 56-28-559  
k.dobrego@aomz.lak.by

being used in the world. Conceptual documents have been developed in the Republic of Belarus and the Russian Federation stating the need to modernize the regulatory framework for the use of ESS, create scientific support for the development of ESS technologies, centers of competence and of the implementation of pilot projects. This article provides an example of calculating the economic effect of using ESS at an industrial enterprise. A methodology is proposed that can be used to develop standardized methods for calculating the economic effect of using ESS at enterprises and in local energy systems of consumers of various types. The main functions performed by the ESS at the enterprise are characterized. The features of calculating the economic effect of performing these functions under the conditions of the statistical nature of the load regime of the enterprise are considered. Calculations of the simple payback period for investments in the installation of an ESS for an enterprise with several options for payment terms for electricity are given. It is shown that the economic result of using ESS significantly depends on both the pricing conditions and load schedules of the enterprise, as well as on specific requirements for the quality and reliability of power supply and should be evaluated individually in each case.

**Keywords:** energy storage system, rechargeable batteries, lithium-ion batteries, industrial application, economic efficiency, calculation method

**For citation:** Dobrego K. V., Fursov S. A., Dubnovitski S. S., Charvinski V. L. (2024) On the Methodology for Calculating the Economic Efficiency of Energy Storage Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (5), 393–410. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-393-410> (in Russian)

## Введение

В настоящее время в мире все шире применяются системы накопления электрической энергии (СНЭ). Это связано с развитием электротранспорта, ростом «зеленой» энергетики, а также с необходимостью регулирования нагрузки крупных энергосистем. Рост рынка аккумуляторных батарей (АКБ) в последнее десятилетие составлял 20–30 %. Согласно данным BlumbergNEF [1], мощность и емкость систем накопления электроэнергии в мире выросла за 2022 г. на 16 ГВт / 35 ГВтч и приращение объемов накопителей продолжит расти в среднем на 23 % до конца 2030 г. При этом отмечается, что использование накопителей пока не стало экономически привлекательным в большинстве стран мира.

В России, Беларуси и других странах СНГ системы накопления электроэнергии в силу разных причин развиваются с опозданием относительно таких стран, как США, Австралия, Республика Корея, КНР и некоторые другие, однако имеется понимание необходимости развития данного научно-технического направления. В Российской Федерации в 2017 г. разработана Концепция развития рынка систем хранения электроэнергии. В Беларуси в 2022 г. разработана Концепция применения систем накопления энергии на базе литий-ионных аккумуляторов в Белорусской энергосистеме (далее – Концепция). Данные документы указывают на необходимость модернизации нормативно-правовой базы применения СНЭ, научного обеспечения развития технологий СНЭ, создания центров компетенций и реализации пилотных проектов.

Важнейшим условием для практического применения СНЭ в промышленности и коммунальном хозяйстве является наличие научно обоснованных методик расчета экономической эффективности их применения. Однако сегодня отсутствуют не только стандартизированные методики или методические рекомендации, но и экспериментальные методики и основа-

тельные научные публикации по данному вопросу. Как правило, производители СНЭ самостоятельно оценивают экономический эффект внедрения СНЭ у конкретного заказчика, не ссылаясь на методические источники. Такая практика оставляет открытым вопрос о корректности технико-экономических оценок и создает трудности для ее проверки.

В русскоязычной научно-технической литературе имеются исследования общего характера по эффективности применения СНЭ, как правило, касающиеся анализа их влияния на работу энергосистемы или крупных генерирующих станций [2–6]. При этом отсутствуют методики или примеры расчета экономической эффективности применения СНЭ в распределительных сетях, на объектах промышленности или коммунального хозяйства.

В [3] рассмотрен базовый аспект использования СНЭ в энергосистеме – выравнивание графика нагрузки. Предложен подход, позволяющий оценить границы экономической целесообразности применения СНЭ с этой целью. Модель ориентирована на расчет системного эффекта, носит оценочный характер, где принята норма амортизации СНЭ 0,033. В [4] проводится сравнительный анализ экономической эффективности конкурирующих проектов: внедрения СНЭ и использования электродвигателей для выравнивания графика нагрузки энергосистемы в условиях работы БелАЭС. В более современной работе [5] выполнен функциональный и экономический анализ использования СНЭ на тепловых электрических станциях. Прежде всего, оценивалась экономия на расходах на собственные нужды ТЭС при условии рыночной стоимости расходуемой на эти цели электроэнергии. Несмотря на то что многие компании и государственные организации в РФ активно продвигают технологии, направленные на эффективное применение СНЭ (например, технология «интеллектуального энергетического хаба» АО «Фонд «Форсайт»), методические разработки по данному вопросу не опубликованы.

В отчете о научно-исследовательской работе «Концепция применения систем накопления энергии на базе литий-ионных аккумуляторов в Белорусской энергосистеме» [7] содержатся разделы, посвященные обобщенному анализу экономической целесообразности использования СНЭ в различных системах: на тепловых электрических станциях; подстанциях системообразующих распределительных сетей напряжением 220 кВ и выше; в распределительных электрических сетях напряжением 110 кВ и ниже; в распределительных сетях промышленных предприятий; в системе с возобновляемыми источниками энергии; в зарядной инфраструктуре для электрического транспорта. Оценка экономической эффективности строится на Методических рекомендациях по составлению технико-экономических обоснований для энергосберегающих мероприятий, утвержденных Департаментом по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь [8], посредством определения величины экономии топлива от внедрения мероприятия, что не является прямой оценкой экономического эффекта и применимо прежде всего для системной макроэкономической оценки экономического эффекта, а не эффекта для отдельного хозяйствующего субъекта. Процедура расчета в [7] не детализи-

зируется. Имеются более узкие специализированные исследования, например касающиеся технико-экономической эффективности гибридации СНЭ [9, 10], не предлагающие методик оценивания экономической эффективности их конкретного применения.

Таким образом, разработка методических рекомендаций и методик определения экономического эффекта от внедрения СНЭ является актуальной задачей для реализации целей, сформулированных в Концепции, а также для целей экологической, энергетической безопасности и устойчивого развития нашей страны.

В настоящей статье формулируются подход и методическая основа для расчета экономической эффективности применения СНЭ на промышленном предприятии. Приводится пример соответствующего расчета, базирующийся на данных и технико-экономических показателях реального предприятия. Показано, что эффекты, связанные с надежностью энергоснабжения, могут вносить существенный вклад в общий экономический эффект и требуют основательного анализа. Приведенная методика может быть использована для расчета экономической эффективности применения СНЭ на предприятиях со сложной структурой энергоснабжения и энергопотребления, например включающих ВИЭ и разнородных потребителей (с различными требованиями по надежности электроснабжения и суточными графиками потребления).

#### **Исходные данные для расчета эффективности использования СНЭ**

Исходные данные для расчета эффективности использования СНЭ можно разделить на блоки: 1) конфигурация системы потребителя, 2) экономические условия электроснабжения, 3) данные о нормальных режимах нагрузки (генерации) и статистике нарушений электроснабжения, 4) технические и экономические параметры СНЭ, условия и ограничения ее работы, 5) прочие существенные условия.

Если говорить о промышленном предприятии, то конфигурация системы – это схема электроснабжения, сведения о количестве блоков однородных потребителей (с одинаковыми требованиями по качеству электроснабжения, сходными графиками нагрузки), о наличии и типе собственных источников генерации и т. п. Экономические условия электроснабжения – прежде всего тарифы и другие условия, оговоренные договором об электроснабжении. Данные о режиме нагрузки (генерации) включают в себя графики нагрузки и иную статистику по каждому блоку однородных потребителей (зимний рабочий и выходной день, летний рабочий и выходной день) и каждому генератору (при наличии). Для метеозависимых генераторов приводятся статистические характеристики мощности генерации. Данные о статистике перерывов электроснабжения используются для расчета экономического эффекта, связанного с обеспечением надежности и бесперебойности электроснабжения предприятия. К техническим и экономическим параметрам СНЭ относятся допустимые производителем токовые режимы зарядки-разрядки, рекомендуемая рабочая глубина раз-

рядки (DOD) или связь DOD с эксплуатационным ресурсом СНЭ, стоимостные показатели СНЭ, ожидаемый эксплуатационный ресурс и т. п. Прочие существенные условия могут включать сведения о возможности энергетической кооперации с другими юридическими лицами (например, арендаторами), о необходимости и возможности увеличения подключенной мощности в связи с развитием предприятия и др. В последнем случае задача о применении СНЭ может ставиться как альтернатива модернизации линии электроснабжения или электроснабжающей подстанции.

Рассмотрим предприятие А (далее – предприятие), характеризующееся простой конфигурацией, не имеющее особых требований к качеству электричества. Оно не имеет собственных источников генерации и снабжается электроэнергией как энергоемкое предприятие при потреблении электрической энергии до 25 млн кВт·ч включительно. Основная плата (за мощность)  $C_{\text{max}} = 31,43$  руб./кВт. Понижающий коэффициент на основную плату  $K_m = 0,5$  устанавливается, если в течение учетного месяца вечерний пик не превышает утреннего и при отсутствии случаев превышения максимальной выделенной мощности. Дифференцированный тариф за электроэнергию по двум временным периодам:  $C_{\text{день}} = 0,19478$  руб./(кВт·ч) (с 6:00 до 23:00) и  $C_{\text{ночь}} = 0,16936$  руб./(кВт·ч) (с 23:00 до 6:00). Иные существенные условия отсутствуют.

### Функции СНЭ в системе

Важнейшим элементов методики расчета экономической эффективности применения СНЭ является определение функций накопителя, имеющих экономически значимый эффект. Для предприятия актуальны четыре функции (табл. 1). Для систем со сложной конфигурацией таких функций может быть больше.

Таблица 1

Функции СНЭ, имеющие экономически значимый эффект  
ESS functions of an economically significant effect

|   | Функция СНЭ   | Способ оценки эффекта  | Приоритет | Жесткость |
|---|---|--|-----------|-----------|
| 1 | Потребительское тарифное маневрирование                             | Прямой расчет с учетом тарифов                                 | 4         | Нет       |
| 2 | Снижение пиков потребления  | Снижение максимальной мощности                                 | 1         | Да        |
| 3 | Гарантирование выполнения условия $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$ | Расчет по статистике случаев $P_{\text{веч}} > P_{\text{утр}}$ | 3         | Да        |
| 4 | Обеспечение аварийной бесперебойности                               | Расчет по статистике перебоев электроснабжения                 | 2         | Да        |

Будем называть функции, имеющие бинарный характер (выполнение / невыполнение), жесткими, или качественными, а функции, всегда выполняющиеся в большей или меньшей мере, – мягкими, или количественными. Например, потребительское тарифное маневрирование приводит к большему или меньшему эффекту в зависимости от режима нагрузки в кон-

кретный день. Функция гарантирования исполнения условия  $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$ , наоборот, либо исполняется, либо нет в каждом конкретном случае. Функция не реализуется, если для ее выполнения не хватило запаса емкости. Функция снижения пикового потребления также жесткая, поскольку для ее выполнения должен быть достигнут фиксированный порог снижения мощности, обеспечивающий для предприятия выполнение требований регламента. Жесткие функции СНЭ должны быть обеспечены определенным запасом емкости, гарантирующим высокую вероятность выполнения заданных параметров.

Важным методическим моментом рассматриваемой проблемы является статистический характер как графиков нагрузки промышленных предприятий, так и ожидаемого экономического эффекта от реализации функций СНЭ. В связи с этим величины экономического эффекта от выполнения каждой из функций ( $C_{T1}$ ,  $C_{T2}$ ,  $C_{T3}$  и  $C_{T4}$ ) должны трактоваться как ожидаемые статистические величины. Оценка среднеквадратичных отклонений этих и других расчетных величин необходима для оценки запаса емкости СНЭ, требуемого для выполнения установленных функций в условиях статистических флуктуаций параметров энергопотребления.

Целесообразно ранжировать функции СНЭ по приоритету. Это может быть сделано на основании оценок их экономического эффекта и использовано для: 1) определения выделяемых для их реализации емкостей, 2) выстраивания алгоритмов управления СНЭ.

### Расчет экономического эффекта

Расчет экономического эффекта проводится в несколько этапов.

1. На основании исходных данных (рис. 1 и др.) производятся расчеты типичных, усредненных характеристик потребления, другие предварительные расчеты, устанавливаются статистические характеристики потребления и генерации (если таковые имеются). В табл. 2 приведены некоторые характеристики суточных графиков потребления электроэнергии предприятия.

2. Последовательно оценивается экономический эффект каждой из рассматриваемых функций СНЭ в зависимости от энергетической емкости, выделенной для ее выполнения.

3. Определяется взаимное соответствие выделенных для каждой функции емкостей и общей емкости СНЭ. При выполнении соответствующих оценок необходимо иметь в виду, что в силу совместности выполнения некоторых функций и особенностей графиков нагрузки общая емкость СНЭ меньше суммы емкостей, выделенных для реализации каждой из функций. После выполнения вышеуказанных этапов становится возможным выразить общий экономический эффект использования СНЭ в зависимости от ее емкости  $C_T(Q_{\text{СНЭ}})$ .

4. Расчет экономических показателей использования СНЭ. Так простой срок окупаемости без учета эксплуатационных расходов находится как частное от инвестиционной стоимости и суммарного экономического эффекта.

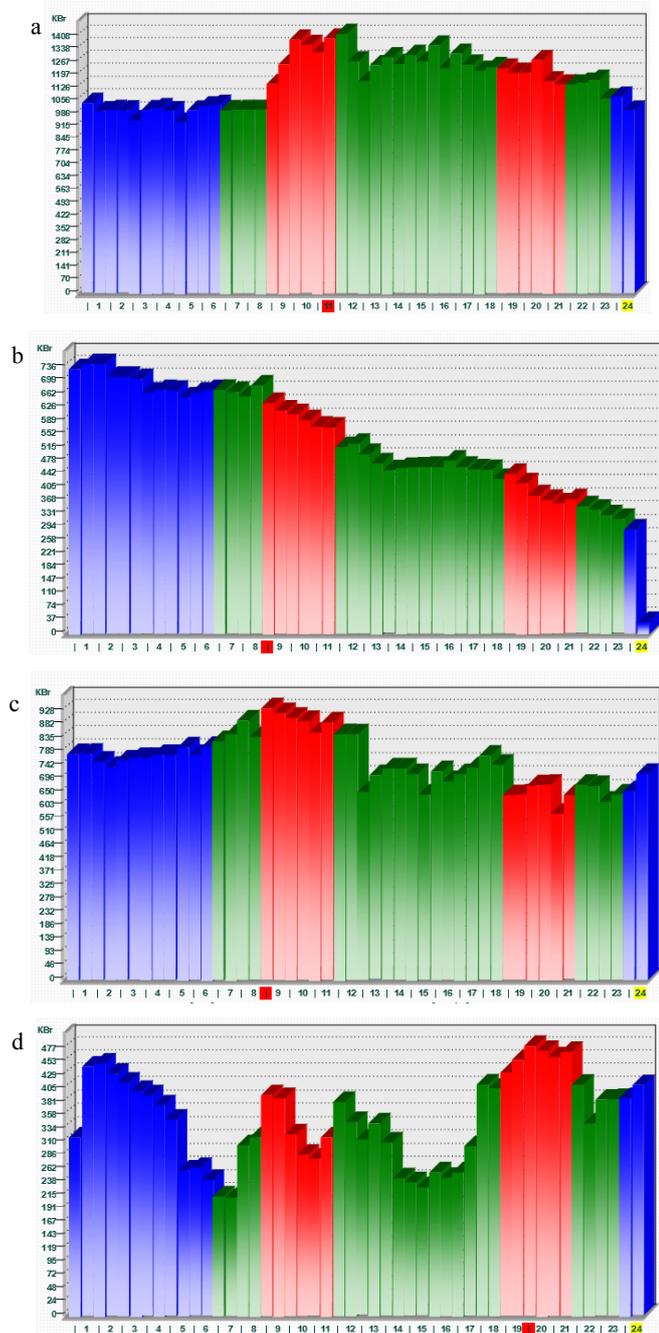


Рис. 1. Характерный график нагрузки предприятия А: а, б – в зимние рабочие и выходные дни; с, d – в летние рабочие и выходные дни (синие столбцы – время минимального тарифа, красные – утренний и вечерний пики нагрузки)

Fig. 1. Typical load schedule of the enterprise A: a, b – in winter working and weekend days; c, d – in summer working and weekend days (blue columns indicate the time of the minimum tariff, while red ones indicate morning and evening load peaks)

Таблица 2

**Характеристики суточных графиков нагрузки предприятия\***  
**Characteristics of the daily load schedules of the enterprise**

|  | Рабочий день   | Выходной день  |
|--|--|--|
| Зима                                   | $P_{\max} = 1408$ кВт<br>$P^* = 1146,7$ кВт<br>$\Delta P = P_{\max} - P^* = 234,1$ кВт<br>$Q = 27520,8$ кВт·ч<br>$\Delta Q = 1422$ кВт·ч | $P_{\max} = 736$ кВт<br>$P^* = 518,7$ кВт<br>$\Delta P = P_{\max} - P^* = 113,3$ кВт<br>$Q = 12448,8$ кВт·ч<br>$\Delta Q = 1516$ кВт·ч |
| Лето                                   | $P_{\max} = 928$ кВт<br>$P^* = 744,5$ кВт<br>$\Delta P = P_{\max} - P^* = 183,5$ кВт<br>$Q = 17867,2$ кВт·ч<br>$\Delta Q = 871$ кВт·ч    | $P_{\max} = 477$ кВт<br>$P^* = 346,27$ кВт<br>$\Delta P = P_{\max} - P^* = 130,5$ кВт<br>$Q = 8310,4$ кВт·ч<br>$\Delta Q = 798$ кВт·ч  |
| * Условные обозначения даны на с. 409. |  |  |

Дополнительно может быть выполнена оценка среднеквадратичного отклонения величины экономического эффекта от ожидаемого значения. На основании сделанных оценок может быть принято обоснованное решение о целесообразности или нецелесообразности внедрения СНЭ на предприятии.

Произведем расчеты экономического эффекта СНЭ, используя данные предприятия.

**Функция 1.** Потребительское тарифное маневрирование. Месячный экономический эффект от тарифного маневрирования в общем виде рассчитывается с учетом использованной для этой функции энергетической емкости  $Q_{li}$

$$C_{\text{т1}} = \sum_i Q_{li} (K_{\text{эф}} C_{\text{день}} - C_{\text{ночь}}), \text{ руб./мес.}, \quad (1)$$

где  $i$  – нумерация дней месяца.

Формула (1) может быть переписана с использованием среднемесячного значения емкости, используемой для реализаций функции  $Q_1$ :

$$C_{\text{т1}} = 30Q_1 (K_{\text{эф}} C_{\text{день}} - C_{\text{ночь}}), \text{ руб./мес.}$$

Среднее значение  $Q_1$  должно учитывать недельный график работы предприятия и базироваться на фактических графиках нагрузки. В случае предприятия принимаем, что 26 дней в месяце оно работает по графикам рабочего дня и 4 – по графикам выходного дня, представленным на рис. 1. Таким же образом может быть получено и среднегодовое значение емкости  $Q_1$ .

Оценим максимальные объемы электроэнергии, которые могут быть экономически эффективно перемещены с дневного на ночное потребление с помощью СНЭ. Согласно данным табл. 2, для зимнего рабочего дня смещение потребления 1422 кВт·ч энергии позволяет выровнять суточный график. Большее смещение нецелесообразно, так как при этом снижается экономический эффект от приоритетной функции 2. Поскольку энергопотребление смещается на 7-часовой интервал (23:00–6:00), снижение эффекта функции произойдет при меньшей энергии смещения (1200 кВт·ч). Анализируя графики нагрузки, легко показать, что в летние рабочие и в выходные дни возможно большее чем 1200 кВт·ч смещение потребления на ночное время. В летнее время и в выходные дни возможно перераспределение ем-

кости СНЭ, зарезервированной для функций 1 и 2 в пользу функции 1. В связи с этим в некоторых случаях может быть целесообразным рассчитывать экономический эффект отдельно для летнего и зимнего периодов

$$C_{T1} = N_z Q_{1z} (K_{эф} C_{день} - C_{ночь}) + N_l Q_{1л} (K_{эф} C_{день} - C_{ночь}), \quad (1'')$$

где  $N_z, N_l$  – количество дней, оцениваемых по графику нагрузки зимнего и летнего рабочего дней соответственно.

В разделе, посвященном отношению между емкостями, выделенными для обеспечения функций СНЭ, показано, что в силу совместности функций 1 и 2 необходимости такого деления нет.

Для предприятия при незначительном (~13 %) относительном размахе дифференцированного тарифа функция потребительского тарифного маневрирования малосущественна. Оценочно при энергетической эффективности СНЭ (КПД = 95 % для литий-ионных АКБ) и емкости 1000 кВт·ч месячный экономический эффект составит  $C_{T1} = 1000 \cdot 0,0156 \cdot 30 = 468$  руб., в предположении 11 полноценных рабочих месяцев 5148 руб. в год.

**Функция 2.** Снижение пиков потребления. Применяя получасовые графики нагрузки (рис. 1), можно рассчитать величину снижения нагрузки предприятия  $\Delta P_{max}$  в зависимости от энергии, использованной для компенсации пикового потребления  $Q_2$  (рис. 2).

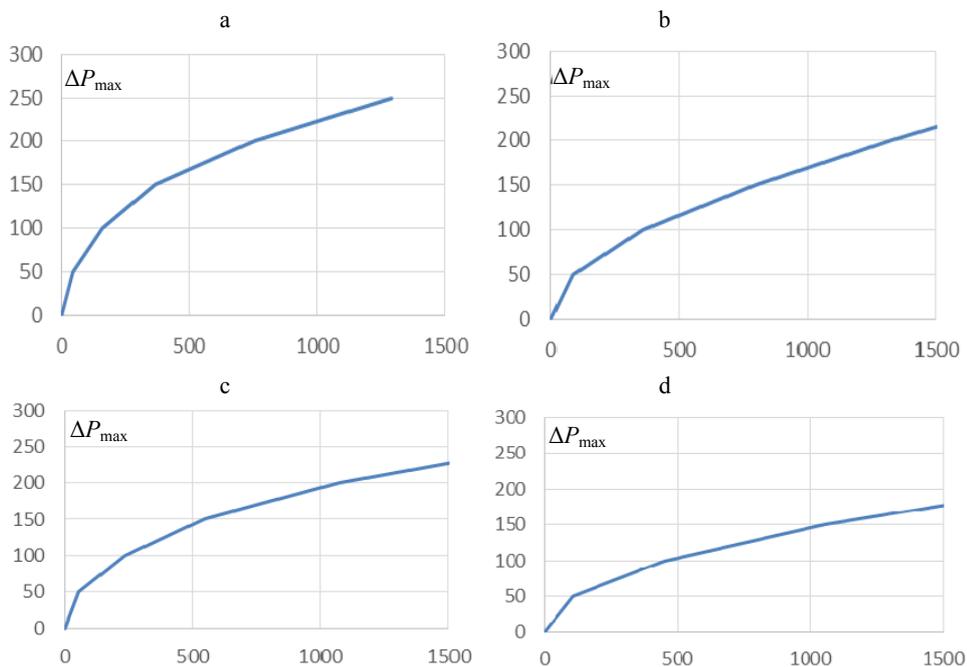


Рис. 2. Снижения пиковой нагрузки  $\Delta P_{max}$  в зависимости от энергии компенсации пикового потребления  $Q_2$ : а – зимний рабочий день (отрезки соответствуют статистическому разбросу в два стандартных отклонения); б – зимний выходной день; с – летний рабочий день; д – летний выходной день

Fig. 2. Reduction of peak load  $\Delta P_{max}$  depending on the energy compensation of peak consumption  $Q_2$ : а – winter working day (segments correspond to a statistical spread of two standard deviations); б – winter day off; с – summer working day; д – summer day off

Графики рис. 2 показывают, что  $\Delta P_{\max}$  повышается с ростом  $Q_2$ , а пиковая нагрузка падает. Эффект сильнее выражен при малых энергиях  $Q_2$ . Фактические зависимости, представленные на рис. 2, с высокой точностью (за исключением малых значений  $Q_2$ ) аппроксимируются дробно-степенной функцией

$$\Delta P_{\max} = \frac{a \cdot \sqrt{Q_2}}{1 + b \cdot \sqrt{Q_2}}, \text{ кВт.} \quad (2)$$

Для кривой, соответствующей зимнему рабочему дню, коэффициенты (2) принимают следующие значения:  $a = 8,53$ ;  $b = 0,006$ .

Экономический эффект от снижения пикового потребления найдем по формуле

$$C_{т2} = C_{\max} K_M \Delta P_{\max}. \quad (3)$$

Поскольку наибольшее пиковое потребление имеет место в зимние рабочие дни, расчет экономического эффекта проводится по соответствующему графику нагрузки. Из графика рис. 2а видно, что подкачка порядка 150 кВт·ч энергии от СНЭ обеспечивает снижение потребляемой от сети пиковой мощности на 100 кВт. Подкачка 200 кВт·ч снижает пиковую мощность потребления на 110–115 кВт, а подкачка 400 кВт·ч – на 150 кВт. Эффект снижения пиков прекращается при величине энергии подкачки 1422 кВт·ч.

Статистический анализ выборки 10 графиков нагрузки в зимний рабочий день показывает стандартное отклонение по оси ординат, соответствующее 6 % среднего значения  $\Delta P_{\max}$ , а стандартное отклонение по энергии компенсации пикового потребления  $\text{Sig}2 = 0,12Q_2$ .

Оценим величины экономического эффекта. При величине энергии, выделенной на компенсацию пиков нагрузки  $Q_2 = 150$  кВт·ч,  $\Delta P_{\max} = 100$  кВт  $C_{т2} = C_{\max} K_M \Delta P_{\max} = 1572$  руб./мес., или 17292 руб./год.

**Функция 3.** Гарантирование выполнения условия  $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$  ( $K_M = 0,5$ ). Основой для расчета экономического эффекта от данной функции СНЭ является статистика нарушения требования  $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$  за период использования данного тарифа и данные о связанных с этим финансовых издержках предприятия. Количество случаев нарушения условия потребления электроэнергии  $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$   $N_{3н}$  должно быть достаточно большим для достоверной оценки вероятности данного события. Максимальный экономический эффект данной функции СНЭ  $C_{т3\max}$  оценивается как

$$C_{т3\max} = \frac{C_{т3н}}{T_k}, \quad (4)$$

где  $C_{т3н}$  – издержки предприятия, связанные с нарушением условия потребления электроэнергии  $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$  за контрольный период  $T_k$ .

Для определения реального экономического эффекта от реализации данной функции необходимо учесть статистический характер случаев

нарушения условия  $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$ . На основании соответствующих графиков нагрузки предприятия определяются: 1) средняя величина энергии, необходимой для компенсации превышения  $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$ ,  $Q_{3\text{mst}}$ ; 2) среднеквадратичное отклонение этой величины  $\text{Sig}3$ . Величина экономического эффекта  $C_{\text{т3}}$  определяется как сглаженная ступенчатая функция (используем экспоненциальную сигмоиду) от емкости  $Q_3$

$$C_{\text{т3}} = \frac{C_{\text{т3max}}}{1 + \exp\left(-\frac{Q_3 - Q_{3\text{mst}}}{\text{Sig}3}\right)}. \quad (5)$$

Формула (5) обеспечивает приближенное выполнение характерного для нормально распределенных случайных величин условия – попадание 95 % случаев необходимой энергии компенсации в интервал  $[Q_{3\text{mst}} - 2\text{Sig}3; Q_{3\text{mst}} + 2\text{Sig}3]$ .

Изучение статистики нарушения условия  $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$  для предприятия дало следующие оценки для модели (5):  $C_{\text{т3max}} = 3000$  руб./год;  $Q_{3\text{mst}} = 50$  кВт·ч;  $\text{Sig}3 = 6$  кВт·ч. Величина экономического эффекта от энергетической емкости СНЭ, выделенной для гарантирования выполнения условия  $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$ , рассчитанная согласно (5), приведена на рис. 3. Физический смысл выражения (5) – вероятность получения максимального экономического эффекта, однако для простоты определим  $C_{\text{т3}}$  как экономический эффект от функции 3 СНЭ.

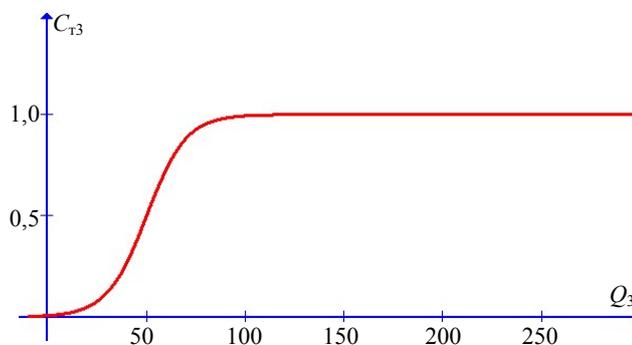


Рис. 3. Экономический эффект выполнения функции 3 СНЭ в зависимости от выделенной энергетической емкости

Fig. 3. The economic effect of performing function 3 of the ESS depending on the allocated energy capacity

Поскольку формула (5) описывает вероятность получения максимального оцененного эффекта функции 3, запас емкости для обеспечения высокой вероятности ее выполнения не рассматривается.

**Функция 4.** Обеспечение бесперебойности электроснабжения. Функция обеспечения бесперебойности электроснабжения предприятия по своей организации аналогична рассмотренной выше функции 3. Расчет максимального экономического эффекта  $C_{\text{т4max}}$  проводится по имеющейся стати-

стике аварийного нарушения подачи электроэнергии за период, по которому можно судить о статистике данных событий. Проводится оценка финансовых потерь, связанных с перерывом электропитания, которые рассматриваются как ожидаемый экономический эффект реализации функции  $C_{т4max}$ . Путем анализа случаев нарушения электропитания определяются: 1) значения средней величины энергии, необходимой для обеспечения бесперебойности питания или уменьшения экономических потерь при остановке всего производства или отдельных технологических участков,  $Q_{4mst}$ ; 2) среднеквадратичное отклонение этой величины по рассмотренной статистике  $Sig4$ . В некоторых случаях целесообразно рассматривать отдельно случаи внешнего аварийного отключения электроснабжения и случаи, связанные со срабатыванием собственной защитной и аварийной автоматики.

Математическое выражение экономического эффекта аналогично (5) представляет собой сглаженную ступенчатую функцию

$$C_{т4} = \frac{C_{т4max}}{1 + \exp\left(-\frac{Q_4 - Q_{4mst}}{Sig4}\right)}. \quad (6)$$

Изучение статистики нарушений электроснабжения предприятия и отдельных технологических участков приводит к следующим оценкам:  $C_{т4max} = 30\ 000$  руб./год;  $Q_{4mst} = 180$  кВт·ч;  $Sig4 = 35$  кВт·ч. Величина экономического эффекта от энергетической емкости СНЭ, выделенной для обеспечения аварийной бесперебойности энергоснабжения, рассчитанная по (6), приведена на рис. 4.

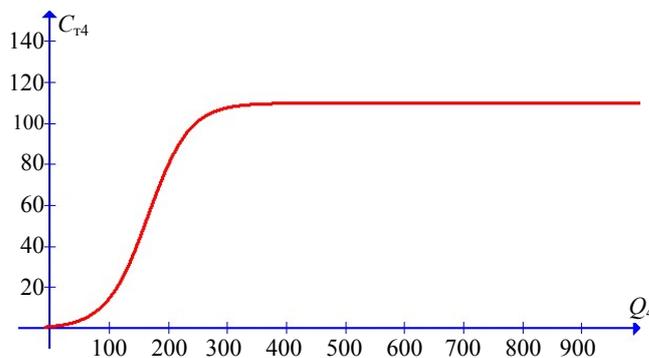


Рис. 4. Экономический эффект функции 4 СНЭ в зависимости от выделенной емкости  
 Fig. 4. The economic effect of function 4 of the ESS depending on the allocated energy capacity

### Взаимное соответствие емкостей и общая емкость СНЭ

В силу закономерного или случайного совпадения по времени выполнения рассматриваемых функций, а также ввиду их совместности (получения результата нескольких функций за счет ресурса одной) энергетические

емкости, выделенные для их реализации, могут относиться друг к другу как пересекающиеся множества:  $Q_{\text{СНЭ}} < Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$ . Для расчета экономического эффекта СНЭ необходимо выразить емкости  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  и  $Q_4$  как доли общей емкости  $Q_{\text{СНЭ}}$ . Точный статистический анализ взаимодействия функций не может быть произведен ввиду сложности задачи и отсутствия достаточного статистического материала. Поэтому целесообразно количественно-качественное определение отношений между емкостями на основе анализа: 1) их совместности, 2) приоритетности, 3) предполагаемого алгоритма работы СНЭ, 4) данных по стандартному отклонению режимных параметров системы.

Согласно рис. 1а, энергопотребление в дневной период (включая утренний и вечерний пики) приблизительно равномерное, поэтому график состояния зарядки СНЭ может иметь вид, представленный на рис. 5а.

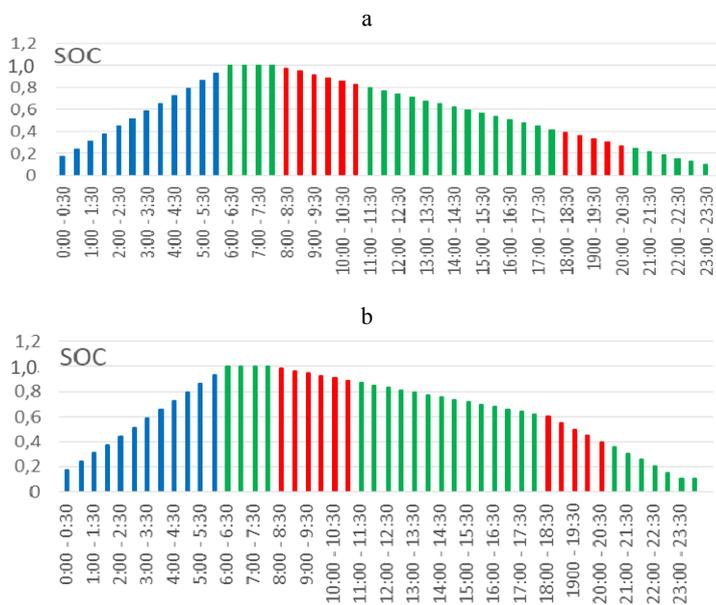


Рис. 5. График состояния зарядки СНЭ на литий-ионных АКБ:  
а – равномерная разгрузка СНЭ, б – оптимизированная разгрузка  
(синий цвет диаграммы – время ночного тарифа,  
красный – утренний и вечерний пики энергопотребления)

Fig. 5. Graph of the charging status of the ESS on lithium-ion rechargeable batteries:  
а – uniform discharge of the ESS, б – optimized discharge  
(the blue color of the chart is the time of the night tariff, the red one is morning  
and evening peaks of energy consumption)

В соответствии с техническими характеристиками СНЭ определяем величину допустимой рабочей глубины разрядки СНЭ –  $DOD_w$ . Принимаем  $DOD_w = 90\%$  для литий-ионных и  $DOD_w = 70\%$  – для свинцово-кислотных АКБ. Для аварийных случаев и случаев редкой необходимости допускаем  $DOD_w = 100\%$ . Поскольку запасание и выдача энергии СНЭ для

функций 1 и 2 проводятся по одинаковому временному графику, они полностью совместны. Поэтому выделяемые для их реализации емкости одинаковы и соответствуют максимально возможной для суточного циклирования емкости

$$Q_1 = Q_2 \leq 0,9Q_{\text{СНЭ}}. \quad (7)$$

Выполнение функции 3 может быть несовместно или частично совместно с выполнением функций 1 и 2 в зависимости от алгоритма работы СНЭ. В общем случае компенсация превышения  $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$  может быть выполнена из объема, соответствующего среднему запасу энергии в период вечернего пика энергопотребления. При равномерной разгрузке СНЭ в дневное время (рис. 5а),  $Q_3 = 0,27Q_{\text{СНЭ}}$ . Если СНЭ работает по оптимизированному графику и снижает нагрузку лишь до необходимого уровня в утренний пик и дневной полупик, то с высокой степенью вероятности для гарантирования выполнения условия  $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$  может быть выделена большая доля емкости СНЭ (для случая, соответствующего рис. 5б:  $Q_3 = 0,45Q_{\text{СНЭ}}$ ). При дальнейших расчетах принимаем последний вариант.

Функция 4 независима от остальных функций, поскольку при аварийном отключении электроснабжения функции 1–3 не осуществляются. Так как время аварийного отключения не может быть спрогнозировано, ожидаемая емкость для осуществления функции 4 соответствует средней величине SOC в течение рабочего времени. Эта величина зависит от алгоритма работы СНЭ. Для случая равномерной разгрузки СНЭ:  $Q_4 = 0,6Q_{\text{СНЭ}}$ , для случая оптимизированной разгрузки:  $Q_4 = 0,7Q_{\text{СНЭ}}$ .

Для «жестких» функций СНЭ должен предусматриваться запас емкости, обеспечивающий высокую вероятность ее реализации. Выше было указано, что в связи с вероятностным характером моделей (5) и (6) запас емкости для функций 3 и 4 не предусматривается. Запас емкости для функции 2 должен быть предусмотрен ввиду статистического характера величины снижения пиковой нагрузки  $\Delta P_{\text{max}}$  (рис. 2а). Статистический разброс в два стандартных отклонения как по оси абсцисс, так и по оси ординат изображен на графике. Стандартное отклонение по  $\Delta P_{\text{max}}$  соответствует 6 % среднего значения, стандартное отклонение от среднего значения экономического эффекта (3) также составит 6 %. Соответствующее стандартное отклонение по оси абсцисс в линейном приближении  $\text{Sig}2 = 0,12Q_2$ .

Имеются два способа учесть запас емкости для выполнения функции 2: 1) увеличение выделенной емкости  $Q_2$  на величину одного или двух стандартных отклонений; 2) уменьшение ожидаемого экономического эффекта от данной функции на соответствующие стандартные отклонения. Увеличение выделенной емкости для функции 2 обеспечивается пропорциональным уменьшением выделенной емкости для остальных функций. Соответствующая оценка выделенных емкостей для предприятия:

$$\begin{cases} Q_1 = 0,9Q_{\text{СНЭ}} - 0,45\text{Sig}2; \\ Q_2 = 0,9Q_{\text{СНЭ}} + \text{Sig}2; \\ Q_3 = 0,9Q_{\text{СНЭ}} - 0,2\text{Sig}2; \\ \text{Sig}2 = 0,12Q_2. \end{cases} \quad (8)$$

### Оценка экономического эффекта

Общий годовой экономический эффект применения СНЭ получаем суммированием эффектов от всех учтенных функций

$$C_T = C_{T1} + C_{T2} + C_{T3} + C_{T4}, \quad (9)$$

где величины  $C_{T1}$ ,  $C_{T2}$ ,  $C_{T3}$ ,  $C_{T4}$  рассчитываются по формулам (1)–(8). Поскольку величины емкостей  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_4$  связаны с  $Q_{\text{СНЭ}}$  (8), возможно построение зависимости  $C_T = f(Q_{\text{СНЭ}})$ , дающей наглядное представление о связи емкости СНЭ и экономическом эффекте ее применения (рис. 6).

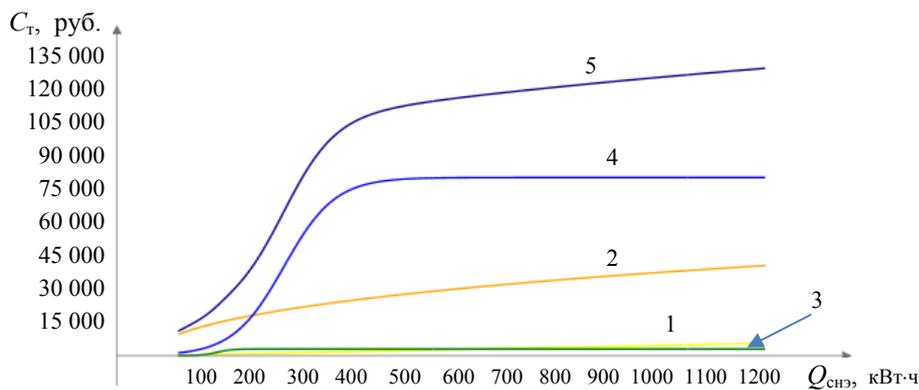


Рис. 6. Зависимость общего экономического эффекта, руб./год, от емкости СНЭ (кривая 5):  
1–4 – вклад функций 1–4 соответственно

Fig. 6. Dependence of the overall economic effect, rubles/year, on the capacity of the ESS (curve 5):  
1–4 – contribution of functions 1–4 respectively

Простой срок окупаемости инвестиций без учета амортизации и эксплуатационных затрат рассчитаем по формуле

$$T_{\text{оки}} = \frac{C_{T,\text{инв}}}{C_T}. \quad (10)$$

Полагаем, что инвестиционные затраты линейно связаны с общей энергетической емкостью СНЭ:

$$C_{T,\text{инв}} = C_{\text{СНЭ}} Q_{\text{СНЭ}}, \text{ руб.}, \quad (11)$$

где  $C_{\text{СНЭ}}$  – стоимость установки 1 кВт·ч номинальной емкости СНЭ.

Для расчетов принято  $C_{\text{СНЭ}} = 1000$  руб., что приблизительно соответствует 330 дол. США. Для создания более полной картины кроме базового случая был рассчитан простой срок окупаемости СНЭ при условии отсут-

ствия понижающего коэффициента за максимальную мощность ( $K_M = 1$ ), а также вариант увеличенного размаха дифференцированного тарифа  $C_{\text{день}}/C_{\text{ночь}} = 2$  с тем же средним значением, рис. 7.

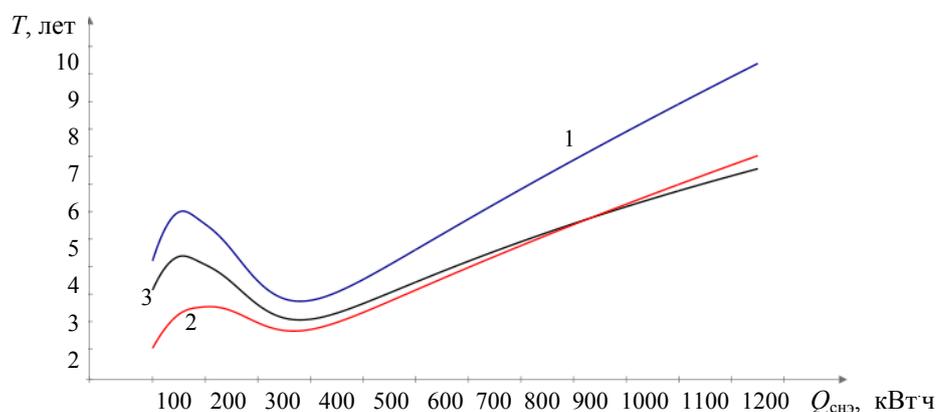


Рис. 7. Простой срок окупаемости (лет) как функция от энергетической емкости СНЭ:  
 1 – основной расчет для предприятия; 2 – расчет при  $K_M = 1$ ;  
 3 – расчет при условии  $C_{\text{день}}/C_{\text{ночь}} = 2$

Fig. 7. Simple payback period (years) as a function of the energy capacity of the ESS:  
 1 – the main calculation for the enterprise; 2 – calculation at  $K_M = 1$ ;  
 3 – calculation provided that  $C_{\text{day}}/C_{\text{night}} = 2$

Срок окупаемости инвестиций представляет собой сложную функцию от энергетической емкости СНЭ. Экономическая эффективность существенно зависит как от тарификации услуг энергоснабжения, так и от издержек от нарушения электроснабжения. В случае полной стоимости тарифа за подключенную мощность ( $K_M = 1$ ) и сохранения прочих условий работы предприятия минимальный эффективный простой срок окупаемости инвестиций составит 3,2 года. В рассмотренном случае размах дифференцированного тарифа мал (~13 %) и эффект соответствующей функции СНЭ незначительный. При двукратном отношении максимального и минимального тарифов минимальный эффективный срок окупаемости составит 3,5 года. В случае особо чувствительного к качеству электроснабжения производства эффективный срок окупаемости может быть еще ниже.

## ВЫВОДЫ

1. Представлена методика расчета экономической эффективности использования СНЭ на промышленном предприятии, поясняемая оценками и расчетами на основании данных по конкретному предприятию.

2. Приведены расчеты простого срока окупаемости инвестиций на установку СНЭ для предприятия, а также при возможных вариантах условий оплаты электроэнергии. Показано, что экономический результат использования СНЭ существенно зависит как от условий тарификации и графиков нагрузки предприятия, так и от специфических требований к бесперебойности электроснабжения (оцениваются в каждом конкретном случае индивидуально). Коммерческая привлекательность применения СНЭ на промышленных предприятиях существенно возрастает при снижении рыночной стоимости установленного киловатт-часа энергетической емкости.

3. Предложенная методика может быть использована при разработке стандартизированных методик для применения к более широкому классу потребителей. При этом методики могут быть дополнены примерными формами опросных листов для предприятий. Методика легко формализуется и может быть использована для создания калькулятора окупаемости инвестиций в СНЭ для предприятий. Принципы и формулы, предложенные в данной статье, могут быть использованы для создания «интеллектуальных» алгоритмов управления работой СНЭ.

#### Условные обозначения:

- $Q_{\text{снэ}}$  – номинальная емкость СНЭ;  
 $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  – энергетическая емкость СНЭ, требуемая для выполнения функций 1–4 соответственно, кВт·ч;  
 $K_{\text{эф}}$  – коэффициент энергетической эффективности СНЭ;  
 $C_{\text{день}}, C_{\text{ночь}}$  – максимальный (дневной) и минимальный (ночной) тариф при дифференцированной по двум периодам тарификации, руб./(кВт·ч);  
 $C_{\text{max}}$  – основная плата за мощность, руб./(кВт·ч);  
 $\Delta C = C_{\text{день}} - C_{\text{ночь}}$  – размах дифференцированного тарифа, руб./(кВт·ч);  
 $K_{\text{м}}$  – понижающий коэффициент платы за мощность;  
 $P_{\text{веч}}$  – максимальная мощность вечернего пика энергопотребления;  
 $P_{\text{утр}}$  – то же утреннего пика энергопотребления;  
 $\Pi_{\text{снэ}}$  – стоимость единицы энергетической емкости СНЭ, руб./(кВт·ч);  
 $P^*$  – среднесуточная мощность потребления электроэнергии по получасовому графику, кВт;  
 $P_{\text{max}}$  – максимальная суточная мощность потребления электроэнергии по получасовому графику, кВт.  
 $\Delta P = P_{\text{max}} - P^*$  – превышение максимальной мощности над среднесуточной, кВт;  
 $\Delta P_{\text{max}}$  – снижение пиковой нагрузки за счет применения СНЭ, кВт;  
 $Q$  – общее суточное потребление электроэнергии, кВт·ч;  
 $\Delta Q$  – суммарная энергия превышения среднесуточной мощности, кВт·ч.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. IН 2023 Energy Storage Market Outlook [Electronic Resource]. Mode of access: <https://about.bnef.com/blog/1h-2023-energy-storage-market-outlook>. Date of access: 07.04.2023.
2. Гуртовцев, А. А. Выравнивание графиков электрической нагрузки энергосистемы / А. А. Гуртовцев, Е. П. Забелло // Энергетика и ТЭК. 2008. № 7/8. С. 13–20.
3. Доброго, К. В. Об обосновании экономической целесообразности использования электрохимических накопителей энергии в энергетической системе / К. В. Доброго // Энергетическая стратегия. 2022. № 5 (89). С. 28–32.
4. Чернецкий, А. М. Оценка экономической эффективности использования накопителей электроэнергии в энергосистеме / А. М. Чернецкий. Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 4. С. 21–28.
5. К вопросу использования электрохимических накопителей энергии в условиях Белорусской энергосистемы / Е. О. Воронов [и др.] // Энергетическая стратегия. 2017. № 4. С. 14–17.
6. Анализ применения систем накопления электроэнергии на тепловых электрических станциях [Электронный ресурс] / Д. И. Менделеев [и др.] // Международная научно-практическая конференция «Развивая энергетическую повестку будущего» для представителей сообщества молодых инженеров ТЭК: Препринт, сб. докладов, Санкт-Петербург, 10–11 дек., 2021 г. СПб.: Невская Типография, ООО «Добрые коммуникации». Режим доступа: <https://eaf.etu.ru/assets/files/eaf21/index.htm>.

7. Концепция применения систем накопления энергии на базе литий-ионных аккумуляторов в Белорусской энергосистеме: отчет о НИР (заключ.) / ГПО «Белэнерго», РУП «БелТЭИ»; А. Ф. Молочко [и др.]. Минск, 2022. Т. 1–3. № Б 22-3/4.
8. Методические рекомендации по составлению технико-экономических обоснований для энергосберегающих мероприятий (ред. от 11.11.2020) [Электронный ресурс] // Департамент по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь. Режим доступа: [https://energoeffect.gov.by/programs/forming/2020\\_1118\\_tepem](https://energoeffect.gov.by/programs/forming/2020_1118_tepem).
9. Доброго, К. В. К вопросу создания гибридных систем накопления электроэнергии / К. В. Доброго // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 3. С. 215–232. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232>.
10. Доброго, К. В. Моделирование функционального взаимодействия блоков гибридного накопителя электроэнергии / К. В. Доброго, И. А. Козначеев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 5. С. 405–422. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-405-422>.

Поступила 15.05.2024 Подписана в печать 16.07.2024 Опубликовано онлайн 30.09.2024

#### REFERENCES

1. *1H 2023 Energy Storage Market Outlook*. Available at: <https://about.bnef.com/blog/1h-2023-energy-storage-market-outlook> (accessed 07 April 2023).
2. Gurtovtsev A. A., Zabello E. P. (2008) Alignment of Electrical Load Schedules of the Power System. *Energetika i TEK* [Power Engineering and Fuel-and-Energy Complex], (7/8), 13–20 (in Russian).
3. Dobrego K. V. (2022) On the Justification of the Economic Feasibility of Using Electrochemical Energy Storage Devices in the Energy System. *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], (5), 28–32 (in Russian).
4. Chernetsky A. M. (2013) Assessment of Economic Efficiency Pertaining to Application of Energy Storage Units in Power System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 21–28 (in Russian).
5. Voronov E. O., Kovalev D. V., Sivak A. V., Kudryavtsev D. I., Negod'ko A. Z., Dragun A. A. (2017) On the Issue of the Use of Electrochemical Energy Storage in the Conditions of the Belarusian Energy System. *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], (4), 14–17 (in Russian).
6. Mendeleev D. I., Rossikhin D. A., Galimzyanov L. A., Fedotov A. Yu. (2021) Analysis of the Application of Energy Storage Systems at Thermal Power Plants. *International Scientific and Practical Conference "Developing the Energy Agenda of the Future" for Representatives of the Community of Young Fuel and Energy Engineers. Preprint of the Collection of Presentations. St. Petersburg, December 10–11, 2021* St. Petersburg, Nevsky Printing House, LLC "Dobrye kommunikatsii". Available at: <https://eaf.etu.ru/assets/files/eaf21/index.htm> (in Russian).
7. Molochko A. F., Privalov A. S., Zhuchenko E. A., Ivashko E. V. [et al.] (2022) *The Concept of Using Energy Storage Systems Based on Lithium-Ion Batteries in the Belarusian Energy System*. Report on the Research Work (Final). Vol. 1–3. No. Б 22-3/4. Minsk (in Russian).
8. Methodological Recommendations for the Preparation of Feasibility Studies for Energy-Saving Measures (as amended on 11.11.2020). *Department for Energy Efficiency of the State Committee for Standardization of the Republic of Belarus*. Available at: [https://energoeffect.gov.by/programs/forming/20201118\\_tepem](https://energoeffect.gov.by/programs/forming/20201118_tepem) (in Russian).
9. Dobrego K. V. (2023) On the Problem of Arrangement of Hybrid Energy Storage Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (3), 215–232. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232> (in Russian).
10. Dobrego K. V., Koznacheev I. A. (2023) Modelling of Functional Interaction of Hybrid Energy Storage System Battery Units. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (5), 405–422. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-405-422> (in Russian).

Received: 15 May 2024

Accepted: 16 July 2024

Published online: 30 September 2024

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-411-424>

УДК 621.311

## **Прогнозирование коэффициента использования установленной мощности для объектов генерации на базе возобновляемых источников энергии для децентрализованных электроэнергетических систем**

**А. М. Брамм<sup>1)</sup>, П. В. Матренин<sup>1)</sup>, Н. А. Попкова<sup>2)</sup>, Д. А. Секацкий<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (Екатеринбург, Российская Федерация),

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** Одним из направлений развития электроэнергетики является децентрализация, направленная на повышение надежности энергоснабжения, снижение потерь при передаче электрической энергии и обеспечение энергетической независимости потребителей. Моделирование децентрализованных электроэнергетических систем, включающих объекты распределенной генерации, возможно с помощью мультиагентных систем, которые позволяют решать задачи планирования и управления с учетом потребностей каждого участника процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Развитие распределенной генерации с использованием мультиагентного подхода требует создания моделей оценки технико-экономической эффективности решений, принимаемых каждым агентом, как на стратегическом, так и на тактическом уровне. К стратегическим решениям агентов, связанных с распределенной генерацией, относится в том числе создание энергетических установок и электрических станций на базе возобновляемых источников энергии. Важным фактором для принятия таких решений является оценка коэффициента использования установленной мощности, однако в настоящее время отсутствуют модели, позволяющие выполнить такую оценку с высокой достоверностью. В данной работе предложены новый алгоритм оценки коэффициента установленной мощности для всей территории определенной административной единицы и модель его прогнозирования на основе климатических и географических параметров. Исследование проведено на выборке данных 221 объекта генерации (солнечные и ветровые электрические станции) четырех областей Российской Федерации. Определено, что коэффициент использования установленной мощности может быть спрогнозирован со средней ошибкой в пределах 4 % для фотоэлектрических станций и 9 % для ветровых, что позволяет использовать разработанные алгоритм и модель как в системах поддержки принятия решений при выборе места размещения указанных видов электрических станций, так и в системах, моделирующих развитие электроэнергетических систем с помощью мультиагентного подхода.

**Ключевые слова:** распределенная генерация, коэффициент использования установленной мощности, фотоэлектрическая станция, ветровая электрическая станция, мультиагентная система

**Для цитирования:** Прогнозирование коэффициента использования установленной мощности для объектов генерации на базе возобновляемых источников энергии для децентрализованных электроэнергетических систем / А. М. Брамм [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 5. С. 411–424. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-411-424>

---

### **Адрес для переписки**

Секацкий Дмитрий Александрович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 392-65-82  
[dsekatski@gmail.com](mailto:dsekatski@gmail.com)

### **Address for correspondence**

Sekatski Dzmitry A.  
Belarusian National Technical University  
65/2, Nezavisimosti Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 392-65-82  
[dsekatski@gmail.com](mailto:dsekatski@gmail.com)

---

## Capacity Factor Forecasting for Generation Facilities Based on Renewable Energy Sources in Decentralized Power Systems

A. M. Bramm<sup>1)</sup>, P. V. Matrenin<sup>1)</sup>, N. A. Papkova<sup>2)</sup>, D. A. Sekatski<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russian Federation),

<sup>2)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** One of the directions of development of the electric power industry is decentralization, aimed at improving the reliability of energy supply, reducing losses during transmission of electric energy and ensuring energy independence of consumers. It is possible to simulate decentralized power systems, including distributed generation facilities, by implementation of multi-agent systems that allow solving design and control problems taking into account the needs of each participant in the process of production, transmission, distribution and consumption of electricity. The development of distributed generation using a multi-agent approach requires the creation of models for assessing the technical and economic efficiency of decisions made by each agent, both at the strategic and tactical levels. The strategic decisions of agents related to distributed generation include, among other things, the creation of power facilities and power plants based on renewable energy sources. An important factor for making such decisions is the estimation of the capacity factor. However, currently there are no models for its estimation with high reliability. The present paper proposes a new algorithm for estimating the capacity factor for the entire territory of a certain administrative unit and a model for its forecasting based on climatic and geographical parameters. The study was conducted on a data sample of 221 generation facilities (solar and wind power plants) in four oblasts (regions) of the Russian Federation. It has been determined that the capacity factor can be forecasted with a mean error within 4 % for photovoltaic power plants and 9 % for wind power plants. Therefore, it is possible to use the developed algorithm and model both in decision support systems when choosing the location of this types of power plants, and in systems that model the development of power systems using a multi-agent approach.

**Keywords:** distributed generation, capacity factor, photovoltaic power station, wind power station, multi-agent system

**For citation:** Bramm A. M., Matrenin P. V., Papkova N. A., Sekatski D. A. (2024) Capacity Factor Forecasting for Generation Facilities Based on Renewable Energy Sources in Decentralized Power Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (5), 411–424. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-411-424> (in Russian)

### Введение

Развитие распределенной генерации (РГ) направлено на выработку электрической энергии вблизи точки ее потребления и внедрение источников энергии с относительно небольшой мощностью, компактными размерами и мобильной конструкцией. Энергетическими установками для РГ чаще всего являются генераторы, работающие на дизельном топливе или природном газе, или источники возобновляемой энергии (ВИЭ), включая фотоэлектрические, ветроэнергетические установки и малые гидроэлектростанции. РГ особенно важна для энергообеспечения небольших поселений в географически удаленных районах (арктических, горных и др.), где по техническим и экономическим причинам невозможно обеспечить подключение потребителей к общей энергосистеме и гарантировать эффективное централизованное управление режимами сети [1–3].

Поскольку одной из особенностей РГ является возможность электроснабжения потребителей, работающих в изолированном от электроэнергетической системы режиме полностью или периодически, а также потребителей, которые из-за ограничений системы электроснабжения могут получать от внешней сети только часть необходимой электроэнергии, то, очевидно, что их снабжение топливом также во многих случаях затруднено. Поэтому развитие распределенной генерации на основе возобновляемых источников энергии приобретает высокую актуальность.

В то же время возникает ряд научно-технических задач, одной из которых является выбор оптимального места для размещения объектов возобновляемых источников энергии. При этом необходимо учитывать множество факторов, включая географические и климатические условия, что требует создания систем поддержки принятия решений [4].

При выборе места размещения объектов ВИЭ необходимо учитывать доступность и потенциал соответствующих ресурсов (солнечное излучение, скорость ветра и т.п.). Географические особенности местности могут оказывать значительное влияние на эффективность работы объектов ВИЭ. Помимо непосредственного источника энергии, такого как солнечное излучение или скорость ветра, необходимо учитывать и прочие климатические условия. Например, для фотоэлектрических станций (ФЭС) облачность и осадки оказывают очень высокое влияние на выработку электрической энергии. Для ветровых электрических станций (ВЭС) важно учитывать не только скорость, но также направление и переменчивость ветра. Кроме того, при выборе места размещения объектов ВИЭ необходимо принимать во внимание экологические и социальные факторы.

Существующие исследования, посвященные задаче выбора параметров и мест размещения объектов РГ, как правило, сфокусированы на решении оптимизационной задачи выбора узла сети для размещения объекта генерации [5–9]. Однако если задача рассматривается с позиции интересов потребителя, использующего РГ как собственную генерацию, или же выбор места размещения РГ необходимо выполнить для изолированного энерго района, то влияние РГ на работу электроэнергетической системы уходит на второй план или даже оказывается в принципе не важно. Развитие концепции децентрализованных электроэнергетических систем приводит к смещению приоритетов с эффективности обеспечения функционирования всей электроэнергетической системы в целом на оптимизацию функционирования отдельных потребителей и поставщиков электрической энергии. Для описания и моделирования таких электроэнергетических систем эффективным является мультиагентный подход, позволяющий представить всех участников как агентов, имеющих собственные целевые функции, правила функционирования, принципы и ограничения [10, 11]. Решение задачи на основе технологий мультиагентных систем (МАС) оказывается более эффективным по совокупности критериев, чем решение, полученное на основе централизованного подхода [11].

Особенностью использования МАС в электроэнергетике является возможность решения не только оптимизационных задач, но и задач планирования развития систем [12, 13], включая планирование создания новых агентов с РГ. При этом для МАС важно получить данные, полно описывающие состояние всех агентов. В случае с РГ на базе ВИЭ среди множества агентов необходимо выделить объекты генерации, а также активных (генерирующих) потребителей. Например, принятие решений о строительстве новых линий электропередачи агентом, представляющим электросетевую компанию, должно учитывать поведение не только существующих агентов с РГ, но и прогнозы возникновения новых агентов с конкретными местами их появления и техническими параметрами. При этом необходимы данные и предиктивные модели, позволяющие оценивать потенциал ВИЭ в каждой географической точке рассматриваемой системы.

Существует большое количество исследований, посвященных прогнозированию выработки электрических станций на базе ВИЭ, среди которых можно отметить статьи [14–17], посвященные прогнозированию выработки ФЭС, [14, 15, 18, 19], посвященные ВЭС, и [20, 21], посвященные прогнозированию факторов, влияющих на работу ГЭС. Однако при выборе места размещения объектов ВИЭ прогноз выработки может быть вычислен, исходя из ретроспективы метеорологических наблюдений, поскольку при проектировании стоит задача не прогнозирования графика генерации, а оценки технико-экономического потенциала строительства электрической станции.

Проблемой, не рассмотренной в ранее проведенных исследованиях по данной теме, является определение коэффициента использования установленной мощности (КИУМ), который оказывает критическое влияние на экономическую эффективность строительства электрических станций на базе ВИЭ. Прогнозирование КИУМ позволяет избежать избыточных инвестиций в мощности, которые могут оказаться неиспользованными в будущем, а также оценить уровень энергетической безопасности, выполнить оценку рисков, связанных с недостатком или избытком электроэнергии.

В данном исследовании впервые предложен алгоритм прогнозирования КИУМ для всей территории заданных географических районов на основе климатических данных из открытых источников, включая данные о существующих объектах ВИЭ и их эффективности. Метод основан на применении к указанным данным регрессионных моделей машинного обучения и последующем формировании карты КИУМ для заданной территории.

### **Формирование выборки данных**

Для формирования выборки данных в рамках исследования был использован открытый перечень квалифицированных генерирующих объектов Российской Федерации, функционирующих на основе использования ВИЭ, а также данные реестра выдачи и погашения «зеленых» сертификатов, подтверждающих объемы производства электрической энергии на этих объектах, публикуемые ассоциацией «Некоммерческое партнерство Совет рынка по организации эффективной системы оптовой и розничной

торговли электрической энергией и мощностью» [22]. Перечень квалифицированных генерирующих объектов Российской Федерации, функционирующих на основе использования ВИЭ, содержит данные о наименованиях квалифицированных генерирующих объектов, их местонахождении, установленной мощности, типе генерации, дате и сроке получения статуса квалифицированного генерирующего объекта. Реестр «зеленых» сертификатов содержит данные об их выдаче с указанием расчетного периода и объемов электрической энергии, на которые был выдан сертификат, сведений о реализации электроэнергии данным квалифицированным генерирующим объектом на рынках электроэнергии и мощности, а также объеме электрической энергии, на который выданный сертификат не был погашен, если факт непогашения был зарегистрирован. Данный реестр содержит сведения с 2014 г. и обновляется в режиме реального времени.

При формировании базы данных проведено установление географических координат, описывающих положение генерирующих объектов, в формате WGS-84. Для этого использованы текстовые данные, описывающие ориентировочное местоположение генерирующего объекта, опубликованные в реестре квалифицированных генерирующих объектов, а также сервисы онлайн карт (Яндекс. Карты, Google. Maps, Bing. Maps).

Из всей предоставляемой информации в перечне квалифицированных генерирующих объектов Российской Федерации, использующих ВИЭ, в базу данных вошли следующие параметры:

- установленная мощность, МВт;
- вид возобновляемого источника энергии.

Данные из реестра выдачи и погашения «зеленых» сертификатов были обработаны в следующем порядке:

- 1) представленные в реестре данные отсортированы по наименованиям генерирующих объектов;
- 2) для определения объемов генерации электростанций использована разница между объемом электрической энергии, на который был выдан сертификат, и объемом электрической энергии, на который сертификат не был погашен;
- 3) данные, представленные на месячном интервале, просуммированы и приведены к годовому интервалу для каждого генерирующего объекта;
- 4) среднегодовое значение коэффициента использования установленной мощности рассчитано по выражению

$$\text{КИУМ} = \frac{W_{\text{год}}}{P_{\text{уст}} T_{\text{год}}}, \quad (1)$$

где  $W_{\text{год}}$  – годовой объем генерации электроэнергии генерирующего объекта, определенный как разность между объемом электрической энергии, на который был выдан сертификат, и объемом электрической энергии, на который сертификат не был погашен;  $P_{\text{уст}}$  – установленная мощность генерирующего объекта, кВт;  $T_{\text{год}}$  – количество часов на годовом интервале.

В дополнение к энергетическим параметрам в базу данных были добавлены среднегодовые метеорологические параметры, необходимые для

связи объемов генерации с климатическими и метеорологическими явлениями:

- скорость ветра на высоте 10 и 50 м от земли, м/с;
- направление ветра на высоте 10 и 50 м от земли, град.;
- среднесуточный объем коротковолнового прямого, рассеянного и полного солнечного излучения, кВт·ч/м<sup>2</sup>;
- альbedo земной поверхности, о. е.;
- температура на уровне 2 м от поверхности земли, °С;
- относительная влажность на уровне 2 м от поверхности земли, %.

На основе данных о географическом расположении генерирующих объектов, функционирующих на основе использования ВИЭ, полученных ранее, были собраны перечисленные выше метеорологические параметры для каждого энергообъекта. Таким образом была сформирована база данных для фотоэлектрических и ветровых электростанций, использованная для обучения прогнозной модели, лежащей в основе алгоритма расчета КИУМ ВИЭ для территорий субъектов РФ. В рамках данного исследования рассмотрены территории Мурманской области, Красноярского края, Республики Саха и Ханты-Мансийского автономного округа. Итоговый объем сформированной выборки данных составил 138 экземпляров для ФЭС и 83 экземпляра для ВЭС.

### Построение и валидация модели

В качестве средства определения значений КИУМ ВИЭ в различных географических точках были использованы прогнозные модели на основе ансамбля деревьев решений, а именно – модель случайного леса (Random Forest), которая показывает высокую эффективность в задачах прогнозирования ВИЭ [24, 25]. На основе сформированной базы данных были обучены две модели: одна – для определения значений КИУМ ФЭС, вторая – для КИУМ ВЭС. Гиперпараметры прогнозных моделей, созданных при помощи библиотеки Python Scikit-learn [26], приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Гиперпараметры моделей для прогнозирования КИУМ ВИЭ**  
**Hyperparameters of models for RES capacity factor forecasting**

| Параметр   | Прогнозная модель КИУМ ФЭС | Прогнозная модель КИУМ ВЭС |
|--|----------------------------|----------------------------|
| Функция потерь   | Среднеквадратичная ошибка  | Среднеквадратичная ошибка  |
| Максимальное число признаков                           | 3                          | 4                          |
| Минимальное количество экземпляров для разделения узла | 1                          | 1                          |
| Минимальное количество экземпляров в конечном узле     | 2                          | 2                          |
| Число деревьев   | 141                        | 61                         |

В результате обучения и тестирования моделей получены значения метрик оценки точности прогноза, представленные в табл. 2. Используются следующие показатели точности прогноза ( $y$  – истинное значение;  $y^*$  – прогнозное;  $n$  – количество экземпляров в выборке):

– максимальная по модулю ошибка – max error (*MaxE*)

$$MaxE = \max_i |y_i^* - y_i|, i = 1, \dots, n; \quad (2)$$

– средняя по модулю ошибка – mean absolute error (*MAE*)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i^* - y_i|; \quad (3)$$

– нормализованная MAE (*nMAE*)

$$nMAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - y_i^*|}{\sum_{i=1}^n y_i} \cdot 100 \%; \quad (4)$$

– среднеквадратичная ошибка – mean squared error (*MSE*)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2; \quad (5)$$

– корень из среднеквадратичной ошибки – root mean squared error (*MSE*)

$$RMSE = \sqrt{MSE}; \quad (6)$$

– коэффициент детерминации ( $R^2$ )

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (7)$$

Таблица 2

**Точность прогнозирования КИУМ**  
**Capacity factor forecasting accuracy**

| Прогнозная модель КИУМ ФЭС |                     |                 |               | Прогнозная модель КИУМ ВЭС |                     |                 |               |
|----------------------------|---------------------|-----------------|---------------|----------------------------|---------------------|-----------------|---------------|
| Результаты кросс-валидации |                     |                 |               |                            |                     |                 |               |
| <i>RMSE</i> , о. е.        | <i>MaxE</i> , о. е. | <i>nMAE</i> , % | $R^2$ , о. е. | <i>RMSE</i> , о. е.        | <i>MaxE</i> , о. е. | <i>nMAE</i> , % | $R^2$ , о. е. |
| 0,011                      | 0,025               | 6,241           | 0,438         | 0,024                      | 0,059               | 4,857           | 0,780         |
| 0,008                      | 0,017               | 3,944           | 0,694         | 0,028                      | 0,061               | 8,271           | 0,821         |
| 0,006                      | 0,017               | 2,813           | 0,814         | 0,011                      | 0,025               | 2,440           | 0,957         |
| 0,004                      | 0,008               | 1,694           | 0,778         | 0,046                      | 0,089               | 17,326          | 0,604         |
| 0,012                      | 0,025               | 6,543           | 0,348         | 0,051                      | 0,083               | 13,831          | 0,567         |
| Результаты тестирования    |                     |                 |               |                            |                     |                 |               |
| 0,007                      | 0,016               | 3,443           | 0,803         | 0,006                      | 0,022               | 1,048           | 0,971         |

На основании усредненных значений  $nMAE$  на этапе валидации (4,25 % для ФЭС и 9,35 % для ВЭС), а также на основании высоких значений коэффициента детерминации на этапе тестирования моделей (0,803 и 0,97) результаты прогноза моделей можно считать стабильными и обладающими высокой точностью.

### Алгоритм формирования карты КИУМ

Предложенный алгоритм, представленный на рис. 1, можно описать следующим образом:

1. Выбор территории.
2. Определение координат крайних левой, правой, верхней и нижней точек, соответствующих административной границе субъекта.
3. Создание в полученном прямоугольнике расчетной сетки размерностью 10 000×10 000.

3.1. Географические координаты (широта и долгота), определяемые пересечением линий сетки, используются в качестве входных параметров для расчета КИУМ ВИЭ в данной точке.

3.2. В соответствии с каждой парой географических координат [21] определяются среднегодовые значения метеорологических параметров, описанных выше.

4. Применение построенной для рассматриваемой территории прогнозной модели для каждой точки сетки, чтобы построить карту КИУМ.

Результатом расчета, согласно представленному выше алгоритму, является поверхность функции КИУМ в зависимости от географического положения энергообъекта, описываемая двумя матрицами – матрицей координат и матрицей значений КИУМ ВИЭ, связанной с географическими координатами.

На рис. 1–8 представлены результаты расчета КИУМ ВИЭ для различных видов электростанций установленной мощностью 5 МВт на территориях субъектов Российской Федерации, расположенных в границах Арктической зоны, представленные в виде трехмерной поверхности и карты с линиями равного уровня.

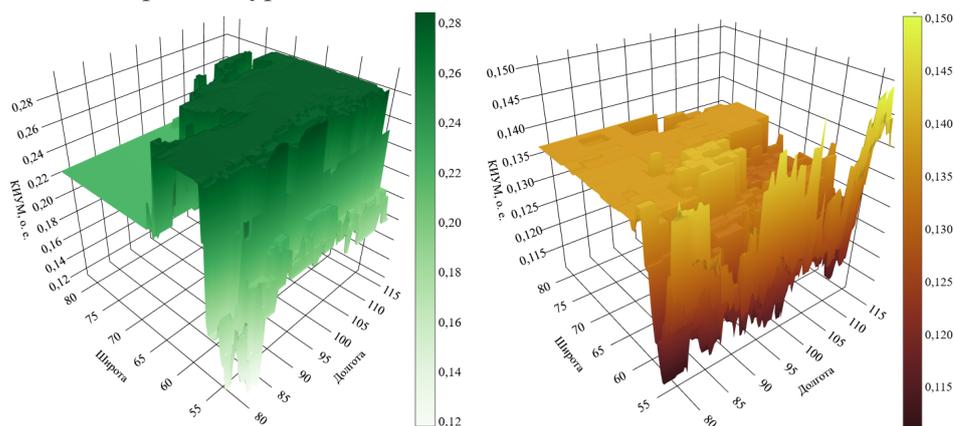


Рис. 1. Трехмерные поверхности целевой функции КИУМ ВЭС и ФЭС соответственно для Красноярского края

Fig. 1. Three-dimensional surfaces of the objective function of wind power plants and solar power plants capacity factor, respectively, for the Krasnoyarsk territory

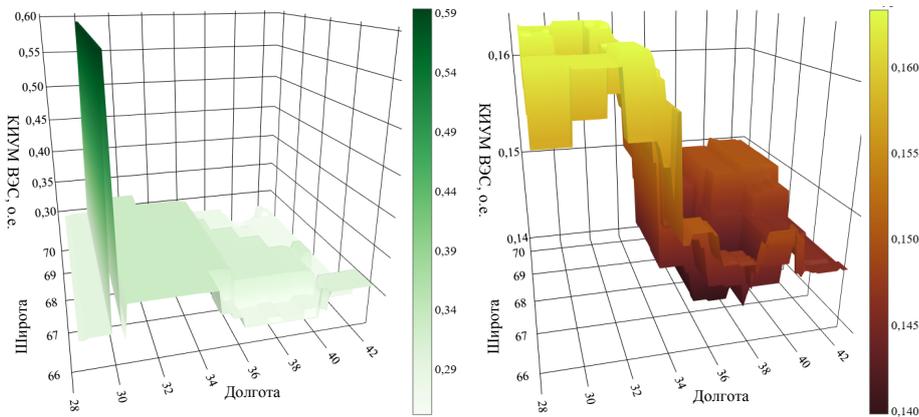


Рис. 2. Трехмерные поверхности целевой функции КИУМ ВЭС и ФЭС соответственно для Мурманской области

Fig. 2. Three-dimensional surfaces of the objective function of wind power plants and solar power plants capacity factor, respectively, for the Murmansk oblast (region)

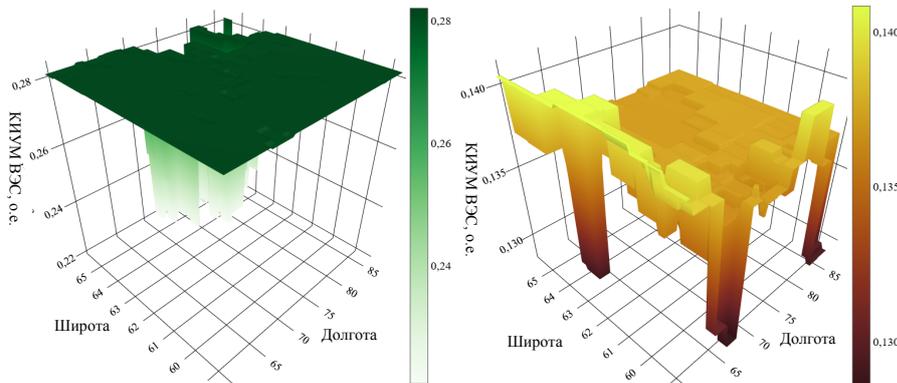


Рис. 3. Трехмерные поверхности целевой функции КИУМ ВЭС и ФЭС соответственно для Ханты-Мансийского автономного округа

Fig. 3. Three-dimensional surfaces of the objective function of wind power plants and solar power plants capacity factor, respectively, for the Khanty-Mansi Autonomous Okrug (district)

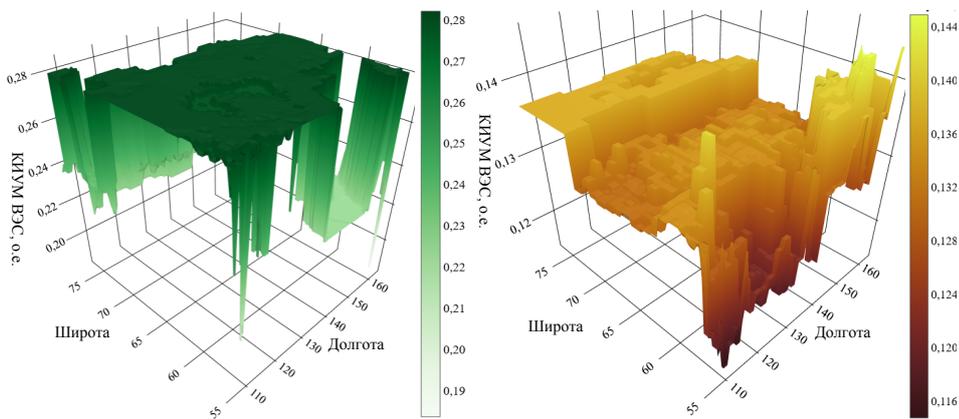


Рис. 4. Трехмерные поверхности целевой функции КИУМ ВЭС и ФЭС соответственно для Республики Саха (Якутия)

Fig. 4. Three-dimensional surfaces of the objective function of wind power plants and solar power plants capacity factor, respectively, for the Republic of Sakha (Yakutia)

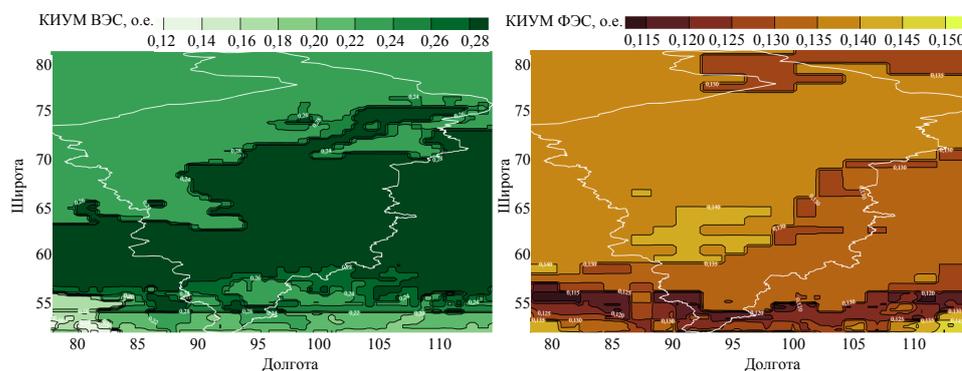


Рис. 5. Карта линий равного уровня целевой функции КИУМ ВЭС и ФЭС соответственно для Красноярского края

Fig. 5. Equal lines map of the objective function of wind power plants and solar power plants capacity factor, respectively, for the Krasnoyarsk territory

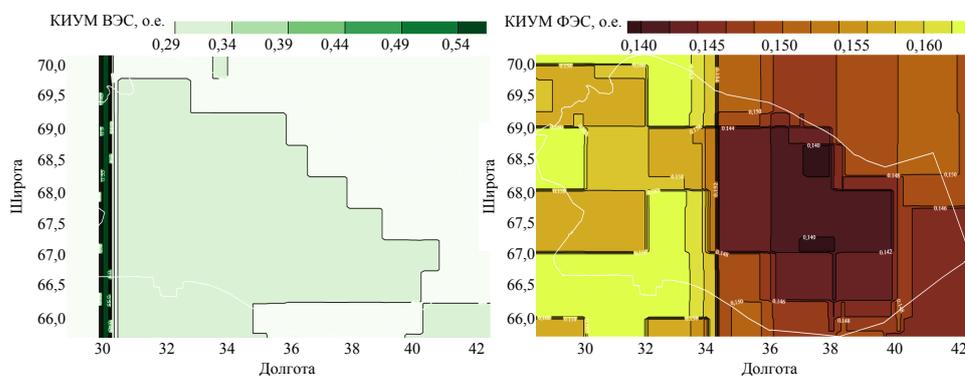


Рис. 6. Карта линий равного уровня целевой функции КИУМ ВЭС и ФЭС соответственно для Мурманской области

Fig. 6. Equal lines map of the objective function of wind power plants and solar power plants capacity factor, respectively, for the Murmansk oblast (region)

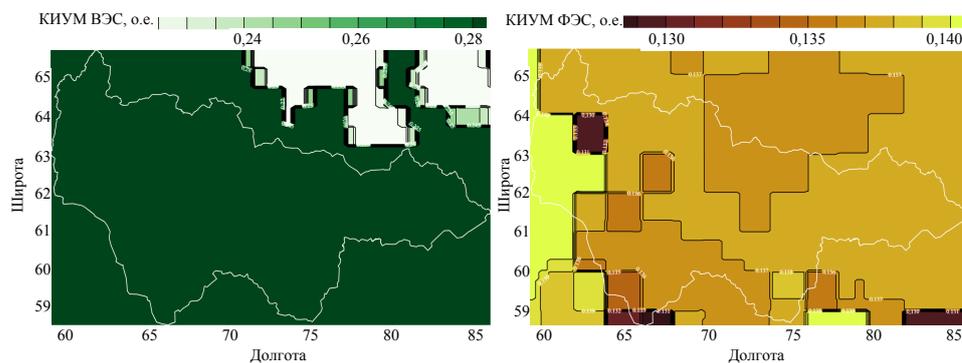


Рис. 7. Карта линий равного уровня целевой функции КИУМ ВЭС и ФЭС соответственно для Ханты-Мансийского автономного округа

Fig. 7. Equal lines map surfaces of the objective function of wind power plants and solar power plants capacity factor, respectively, for the Khanty-Mansi Autonomous Okrug (district)

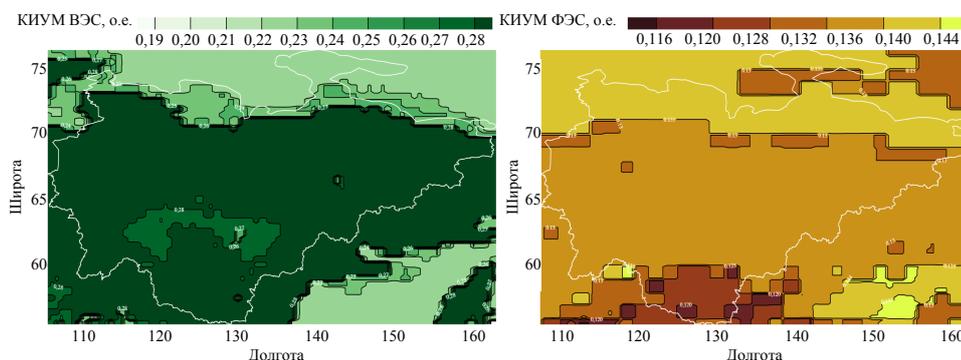


Рис. 8. Карта линий равного уровня целевой функции КИУМ ВЭС и ФЭС соответственно для Республики Саха (Якутия)

Fig. 8. Equal lines map surfaces of the objective function of wind power plants and solar power plants capacity factor, respectively, for the Republic of Sakha (Yakutia)

## ВЫВОДЫ

1. Показано, что для использования мультиагентных систем при моделировании и планировании развития децентрализованных электроэнергетических систем с распределенной генерацией важно включать в мультиагентную систему механизмы создания новых объектов (агентов) распределенной генерации. При этом необходимо обеспечить формирование технико-экономических показателей не только для существующих объектов, но и для потенциально возможных. Одним из таких показателей является КИУМ, который может быть оценен не только для уже существующих электрических станций, но и для потенциально возможных. В результате формируется карта прогнозов КИУМ для определенной территории.

2. На основе данных многолетних метеорологических наблюдений и данных о генерации ФЭС и ВЭС предложены и апробированы алгоритм формирования карты КИУМ для заданной территории и модель прогнозирования КИУМ на основе географических и климатических факторов. Особенностью разработанной модели является ее обучение на данных более чем двухсот объектов генерации на базе ВИЭ с формированием уникальной выборки на основе обработки представленных в открытом доступе сведений из перечня квалифицированных генерирующих объектов Российской Федерации, использующих ВИЭ, а также реестра выдачи и погашения «зеленых» сертификатов. Получены карты прогнозов КИУМ для четырех областей Арктической зоны Российской Федерации.

3. Вычислительные эксперименты показали, что средняя ошибка прогноза КИУМ для ФЭС составляет 4,25 %, для ВЭС – 9,35 %. Это позволяет использовать модель для оценки КИУМ на всей территории рассматриваемой административной единицы как в системах поддержки принятия решений при выборе места размещения фотоэлектрических станций или ветровых электрических станций, так и в системах, моделирующих развитие электроэнергетических систем с помощью мультиагентного подхода.

Исследование выполнено в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № ФЭУЗ-2022-0030 «Разработка интеллектуальной мульти-агентной системы моделирования глубоко интегрированных технологических систем в энергетике»).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Devices and Control Strategies for Voltage Regulation under Influence of Photovoltaic Distributed Generation. A review / L. F. Leon [et al.] // IEEE Lat. Am. Trans. 2022. Vol. 20, No 5. P. 731–745. <https://doi.org/10.1109/TLA.2022.9693557>
2. Grey Wolf Optimizer for RES Capacity Factor Maximization at the Placement Planning Stage / A. M. Bramm [et al.] // Mathematics. 2023. Vol. 11, No 11. P. 2545. <https://doi.org/10.3390/math11112545>.
3. Functional Assessment System of Solar Power Plant Energy Production / D. A. Snegirev [et al.] // Proc. Int. Conf. on Energy and Environment: Energy Saved Today is Asset for Future (CIEM). 2017, P. 349–353. <https://doi.org/10.1109/CIEM.2017.8120862>.
4. Eroshenko, S. A. Intelligent Model of Decision Support System of Distributed Generation Integration / S. A. Eroshenko, A. I. Khalyasmaa // Proc. Int. Conf. on Software Engineering and Service Sciences (ICSESS). 2017. P. 79–82. <https://doi.org/10.1109/ICSESS.2017.8342868>.
5. Ерошенко, С. А. Краткосрочное прогнозирование и планирование режимов фотоэлектрических электростанций: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / С. А. Ерошенко. Новосибирск, 2020. 212 л.
6. Ghosh, S. Optimal Sizing and Placement of Distributed Generation in a Network System / S. Ghosh, S. P. Ghoshal, S. Ghosh // Int. Journal of Electrical Power Energy Systems. 2010. Vol. 32, No 8. P. 849–856. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.01.029>.
7. Mashhour, M. Optimal Sizing and Siting of Distributed Generation in Radial Distribution Network: Comparison of Unidirectional and Bidirectional Power Flow Scenario / M. Mashhour, M. A. Golkar, S. Tafreshi // Proc. Int. Conf. IEEE Bucharest PowerTech. 2009. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/PTC.2009.5281948>.
8. Тарасенко, В. В. Генетический алгоритм выбора распределенной генерации / В. В. Тарасенко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2010. Т. 14, No 190. С. 15–19.
9. Celli, G. A Multiobjective Evolutionary Algorithm for the Sizing and Siting of Distributed Generation / G. Celli, E. Ghiani, S. Mocci // IEEE Transactions on Power Systems. 2005. Vol. 20. P. 750–757. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2005.846219>.
10. Agent-Based Coordinated Operation Strategy for Active Distribution Network With Distributed Energy Resources / S. Hu [et al.] // IEEE Transactions on Industry Applications. 2019. Vol. 55, No 4. P. 3310–3320. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2902110>.
11. Интеллектуальные мультиагентные системы в электроэнергетике: монография / А. И. Хальясмаа [и др.]. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. 222 с.
12. Khalyasmaa, A. I. Prospects for the Use of Intelligent Multi-agent Models for the Control of Objects of Deeply Integrated Power Systems / A. I. Khalyasmaa, S. A. Eroshenko, M. V. Mazunina // Proc. Int. Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). 2022. P. 730–733. <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016945>.
13. Yu, J. MAS-Based Energy Management Strategies for a Hybrid Energy Generation System / J. Yu, C. Dou, X. Li // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63, No 6. P. 3756–3764. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2524411>.
14. Critical Review of Data, Models and Performance Metrics for Wind and Solar Power Forecast / V. Prema [et al.] // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 667–688. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3137419>.
15. Energy Forecasting: A Review and Outlook / T. Hong [et al.] // IEEE Open Access Journal of Power and Energy. 2020. Vol. 7. P. 376–388. <https://doi.org/10.1109/OAJPE.2020.3029979>.
16. Повышение точности прогнозирования генерации фотоэлектрических станций на основе алгоритмов k-средних и k-ближайших соседей / П. В. Матренин [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 4. С. 305–321. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-305-321>.

17. Mutavhatsindi, T. Forecasting Hourly Global Horizontal Solar Irradiance in South Africa Using Machine Learning Models / T. Mutavhatsindi, C. Sigauke, R. Mbuva // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 198872–198885. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3034690>.
18. Lipu, M. S. H. Artificial Intelligence Based Hybrid Forecasting Approaches for Wind Power Generation: Progress, Challenges and Prospects / M. S. H. Lipu // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 102460–102489. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3097102>.
19. Оперативное прогнозирование скорости ветра для автономной энергетической установки тяговой железнодорожной подстанции / П. В. Матренин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 1. С. 18–29. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-18-29>.
20. Buhan, S. A Scalable River Flow Forecast and Basin Optimization System for Hydropower Plants / S. Buhan // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2019. Vol. 11, No 4. P. 2220–2229. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2019.2952450>.
21. Correlated Time-Series in Multi-Day-Ahead Streamflow Forecasting Using Convolutional Networks / F. O. Barino [et al.] // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 215748–215757. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3040942>.
22. Возобновляемые источники энергии [Электронный ресурс] // Ассоциация «НП Совет рынка». Режим доступа: <https://www.np-sr.ru/ru/market/vie/index.htm>. Дата доступа: 24.05.2024.
23. POWER Hourly API [Electronic Resource]. Mode of access: <https://power.larc.nasa.gov/api/pages/> (accessed 24 May 2024).
24. Prediction of Solar Power Generation Based on Random Forest Regressor Model / A. I. Khalyasmaa [et al.] // *Proc. Int. Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences*. 2019. P. 780–785. <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958063>.
25. Short-Term Load Forecasting Based on Optimized Random Forest and Optimal Feature Selection / B. Magalhães [et al.] // *Energies*. 2024. Vol. 17, No 8. P. 1926. <https://doi.org/10.3390/en17081926>.
26. RandomForestRegressor [Electronic Resource]. Mode of access: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestRegressor.html> (accessed 24 May 2024).

Получена 18.06.2024 Подписана в печать 23.07.2024 Опубликована онлайн 30.09.2024

## REFERENCES

1. Leon L. F., Martinez M., Ontiveros L. J., Mercado P. E. (2022) Devices and Control Strategies for Voltage Regulation under Influence of Photovoltaic Distributed Generation. A Review. *IEEE Latin America Transactions*, 20, 731–745. <https://doi.org/10.1109/TLA.2022.9693557>.
2. Bramm A. M., Eroshenko S. A., Khalyasmaa A. I., Matrenin P. V. (2023) Grey Wolf Optimizer for RES Capacity Factor Maximization at the Placement Planning Stage. *Mathematics*, 11 (11), 2545 <https://doi.org/10.3390/math11112545>.
3. Snegirev D. A., Valiev R. T., Eroshenko S. A., Khalyasmaa A. I. (2017) Functional Assessment System of Solar Power Plant Energy Production. *International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)*, 349–353. <https://doi.org/10.1109/CIEM.2017.8120862>.
4. Eroshenko S. A., Khalyasmaa A. I. (2017) Intelligent Model of Decision Support System of Distributed Generation Integration. *8th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*, 79–82. <https://doi.org/10.1109/ICSESS.2017.8342868>.
5. Eroshenko S. A. (2020) Short-Term Forecasting and Planning of Modes of Photovoltaic Power Plants [dissertation]. Novosibirsk, 2020. 212 (in Russian).
6. Ghosh S., Ghoshal S. P., Ghosh S. (2010) Optimal Sizing and Placement of Distributed Generation in a network system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 32 (8), 849–856. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.01.029>.
7. Mashhour M., Golkar M. A., Tafreshi S. (2009) Optimal Sizing and Siting of Distributed Generation in Radial Distribution Network: Comparison of Unidirectional and Bidirectional Power Flow Scenario. *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PTC.2009.5281948>.
8. Tarasenko V. V. (2010) Management of Power Supplies of Fixtures with Use of Methods of Fuzzy Logic. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Energetika = Bulletin of the South Ural State University series "Power Engineering"*, 14 (190), 15–19 (in Russian).

9. Celli G., Ghiani E., Mocci S. A. (2005) Multiobjective Evolutionary Algorithm for the Sizing and Siting of Distributed Generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20, 750–757. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2005.846219>.
10. Hu S. (2019) Agent-Based Coordinated Operation Strategy for Active Distribution Network With Distributed Energy Resources. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55 (4), 3310–3320. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2902110>.
11. Khalyasmaa A. I., Eroshenko S. A., Umanova I. F., Stepanova A. I., Matrenin P. V. (2023) *Intelligent Multiagent Systems in Power Industry*. Novosibirsk, NSTU. 222 (in Russian).
12. Khalyasmaa A. I., Eroshenko S. A., Mazunina M. V. (2022) Prospects for the Use of Intelligent Multi-agent Models for the Control of Objects of Deeply Integrated Power Systems. *IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, 730–733. <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016945>.
13. Yu J., Dou C., Li X. (2016) MAS-Based Energy Management Strategies for a Hybrid Energy Generation System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63 (6), 3756–3764. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2524411>.
14. Prema V., Bhaskar M. S., Almakhlles D., Gowtham N., Rao K. U. (2022) Critical Review of Data, Models and Performance Metrics for Wind and Solar Power Forecast. *IEEE Access*, 10, 667–688. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3137419>.
15. Hong T., Pinson P., Wang Y., Weron R., Yang D., Zareipour H. (2020) Energy Forecasting: A Review and Outlook. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, 7, 376–388. <https://doi.org/10.1109/OAJPE.2020.3029979>.
16. Matrenin P. V., Khalyasmaa A. I., Gamaley V. V., Eroshenko S. A., Papkova N. A., Sekatski D. A., Potachits Y. V. (2023) Improving of the Generation Accuracy Forecasting of Photovoltaic Plants Based on k-Means and k-Nearest Neighbors Algorithms. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (4), 305–321. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-305-321> (in Russian).
17. Mutavhatsindi T., Sigauke C., Mbuyha R. (2020) Forecasting Hourly Global Horizontal Solar Irradiance in South Africa Using Machine Learning Models. *IEEE Access*, 8, 198872–198885. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3034690>.
18. Lipu M. S. H. (2021) Artificial Intelligence Based Hybrid Forecasting Approaches for Wind Power Generation: Progress, Challenges and Prospects. *IEEE Access*, 9, 102460–102489. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3097102>.
19. Matrenin P. V., Khalyasmaa A. I., Rusina A. G., Eroshenko S. A., Papkova N. A., Sekatski D. A. (2023) Operational Forecasting of Wind Speed for an Self-Contained Power Assembly of a Traction Substation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (1), 18–29. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-18-29> (in Russian).
20. Buhan S. (2019) A Scalable River Flow Forecast and Basin Optimization System for Hydropower Plants. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11 (4), 2220–2229. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2019.2952450>.
21. Barino F. O., Silva V. N. H., López-Barbero A. P., De Mello Honório L., Santos A. B. D. (2020) Correlated Time-Series in Multi-Day-Ahead Streamflow Forecasting Using Convolutional Networks. *IEEE Access*, 8, 215748–215757. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3040942>.
22. Renewable Energy Sources. *NPSR Association* Available at: <https://www.np-sr.ru/ru/market/vie/index.html> (accessed 24 May 2024) (in Russian).
23. *POWER Hourly API*. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/api/pages/> (accessed 24 May 2024).
24. Khalyasmaa A. I., Eroshenko S. A., Chakravarthy T. P., Atluri S. K. R., Karrolla S. (2019) Prediction of Solar Power Generation Based on Random Forest Regressor Model. *2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, 780–785. <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958063>.
25. Magalhães B., Bento P., Pombo J., Calado M. D. R., Mariano S. (2024) Short-Term Load Forecasting Based on Optimized Random Forest and Optimal Feature Selection. *Energies*. 17 (8), 1926. <https://doi.org/10.3390/en17081926>.
26. *RandomForestRegressor*. Available at: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestRegressor.html> (accessed 24 May 2024).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-425-439>

УДК 62-137

## Повышение эффективности погружных многоступенчатых насосов на основе гидрофобизации поверхностей проточной части

Г. А. Кромм<sup>1)</sup>, Н. А. Дробницкий<sup>1)</sup>, А. В. Волков<sup>1)</sup>, А. А. Дружинин<sup>1)</sup>,  
В. Ю. Ляпин<sup>1)</sup>, А. В. Трулёв<sup>2)</sup>, И. В. Качанов<sup>3)</sup>, Г. М. Бровка<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Москва, Российская Федерация),

<sup>2)</sup>ООО «Римера-Алнас» (Альметьевск, Российская Федерация),

<sup>3)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** В работе представлено экспериментальное исследование сборки из пяти ступеней установки электроприводного центробежного насоса (УЭЦН), проточная часть которого модифицирована согласно принципам биомиметики, а именно с помощью эффекта лотоса. В качестве объекта исследования выступал УЭЦН марки 5А-35. Поверхности лопастных систем рабочих колес и выправляющих аппаратов ступеней 5А-35 гидрофобизировались методом нанесения слоев поверхностно активного вещества (ПАВ). Степень гидрофобности рабочих колес оценивалась по величине среднего значения угла смачивания по замерам трех капель в трех точках на поверхности рабочего колеса. Определена шероховатость поверхности исследуемых рабочих колес по среднему арифметическому отклонению профиля  $Ra$  и высоты неровностей профиля  $Rz$ . Исследовались вопросы, связанные с влиянием модификации ПАВ-покрытием на солеотложение и коррозию. Для этого поверхности исходного и модифицированного рабочих колес подвергались интенсивному принудительному солеотложению в результате длительного пребывания в солевом растворе. Вывод о степени коррозионной стойкости образцов выполнен посредством изменения их массы, которое было обусловлено формированием солевых отложений за 15 ч пребывания в растворе, а также с помощью метода капли. Оба способа показали, что ПАВ-покрытие может служить ингибитором солеотложения, а модифицированное им рабочее колесо насоса имеет повышенную коррозионную стойкость. Так, в ходе сравнительных испытаний на модифицированный образец рабочего колеса за 15 ч выдерживания в насыщенном солевом растворе отложилась меньшая масса соли, чем на исходный образец. Это свидетельствует о том, что слой ПАВ препятствует закреплению солевых отложений на рабочих поверхностях ступени. На модифицированном образце, исследуемом по методу капли, цвет индикатора менялся за 20 мин, а на исходном – за 2 мин. Проведены экспериментальные исследования, в ходе которых определены энергетические параметры работы насосного пакета из пяти ступеней 5А-35 с исходными и модифицированными ПАВ-покрытием рабочими колесами. Исследования показали повышение КПД на 2 % у насосного пакета ступеней с модифицированными

---

### Адрес для переписки

Качанов Игорь Владимирович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 249-56-77  
hidrokaf@bntu.by

### Address for correspondence

Kachanov Igor V.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 249-56-77  
hidrokaf@bntu.by

---

рабочими колесами. Результаты исследования могут быть полезны в нефтедобывающей, химической отрасли, а также в сфере ЖКХ.

**Ключевые слова:** эффект лотоса, супергидрофобность, поверхностно-активное вещество, природоподобные технологии, снижение гидравлического сопротивления, ингибитор солей, коррозионная стойкость

**Для цитирования:** Повышение эффективности погружных многоступенчатых насосов на основе гидрофобизации поверхностей проточной части / Г. А. Кромм [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 5. С. 425–439. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-425-439>

## Improving the Efficiency of Submersible Multistage Pumps Based on the Hydrophobization of the Flow Part Surfaces

G. A. Kromm<sup>1)</sup>, N. A. Drobnitsky<sup>1)</sup>, A. V. Volkov<sup>1)</sup>, A. A. Druzhinin<sup>1)</sup>,  
V. Y. Lyapin<sup>1)</sup>, A. V. Trulev<sup>2)</sup>, I. V. Kachanov<sup>3)</sup>, G. M. Brovka<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>NRU Moscow Power Engineering Institute (Moscow, Russian Federation),

<sup>2)</sup>Rimera Alnas LLC (Almetyevsk, Russian Federation),

<sup>3)</sup>Belarussian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper presents an experimental study of an assembly of five stages of an electric centrifugal pump (ECP) installation, the flow part of which is modified according to the principles of biomimetics, namely using the “lotus leaf effect”. The object of the study was a 5A-35 ECP. The surfaces of the blade systems of impellers and guide devices of stages 5 A-35 were hydrophobized using the method of applying surfactant layers. The degree of impellers hydrophobicity was estimated by the wetting angle average value measured by three drops at three different points on the impeller surface. The impellers surface roughness under study was determined by the arithmetic mean profile deviation  $Ra$  and the profile height irregularities  $Rz$ . The issues related to the surfactant coating modification effect salt deposition and corrosion were studied. For this purpose, the surfaces of the original and modified impellers were subjected to intensive forced salt deposition as a result of prolonged exposure to saline solution. The conclusion about the samples corrosion resistance degree was made by changing their mass, which was due to the salt deposits formation during 15 hours of stay in solution, as well as using the drop method. Both methods have shown that the surfactant coating can serve as a salt deposition inhibitor, and the pump impeller modified by it has increased corrosion resistance. Thus, during comparative tests, a smaller mass of salt was deposited on the modified impeller sample during 15 hours of exposure in saturated saline solution than on the original sample. This indicates that the surfactant layer prevents the salt deposits fixation on the working surfaces of the pump stage. On the modified sample examined by the drop method, the indicator color changed in 20 minutes, and on the original one – in 2 minutes. Experimental studies have been carried out, during which the operation energy parameters of a five stages 5A-35 pumping package with initial and modified surfactant-coated impellers have been determined. The studies have shown a 2 % increase in efficiency in the pumping package of stages with modified impellers. The results of the study can be useful in the oil production, chemical industry, as well as in the housing and communal services sector.

**Keywords:** lotus leaf effect, superhydrophobicity, surfactant, nature-like technologies, reduction of hydraulic resistance, salt deposition inhibitor, corrosion resistance

**For citation:** Kromm G. A., Drobnitsky N. A., Volkov A. V., Druzhinin A. A., Lyapin V. Y., Trulev A. V., Kachanov I. V., Brovka G. M. (2024) Improving the Efficiency of Submersible Multistage Pumps Based on the Hydrophobization of the Flow Part Surfaces. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (5), 425–439. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-425-439> (in Russian)

### Введение

Установки электроприводного центробежного насоса (УЭЦН), применяемые при добыче нефти, характеризуются низкой быстроходностью – высоким напором и малой подачей, что позволяет производить добычу

пластовой жидкости с большой глубины. Ввиду их конструкционных особенностей среднеинтегральный КПД одной ступени бесштанговых центробежных насосов для нефтедобычи не превышает 55–60 %.

При добыче нефти оборудование находится в контакте с химически активной средой с содержанием механических примесей и абразива. В результате этого в ходе длительной эксплуатации УЭЦН в проточных каналах рабочих колес и направляющих аппаратов возможно образование коррозии и солеотложений, а следовательно, закупоривание рабочих каналов, что снижает эффективность установки, приводит к необходимости преждевременной замены рабочих органов насоса и увеличению простоя установки на период ремонтно-восстановительных работ [1].

Для повышения эффективности эксплуатации УЭЦН возможно применение средств уменьшения парафиносодержащих отложений в подъемных трубах, а также защитных покрытий насосно-компрессорных труб. При этом межремонтный период работы УЭЦН составляет в среднем около года и во многом зависит от степени химической активности перекачиваемой среды. Коррозионный контроль особенно актуален в связи с высоким содержанием воды и коррозионной активностью пластовых флюидов, обусловленной высокой минерализацией и содержанием растворенных кислых примесей ( $H_2S$ ,  $CO_2$ ).

Коррозии и образованию солеотложений при разработке и эксплуатации нефтяных скважин подвержена не только проточная часть насосов, но и элементы подземного оборудования. Эти процессы зависят от множества факторов. Основной причиной образования солей является регулирование пластового давления путем искусственного заводнения. Кроме того, продукты коррозии и механические примеси при попадании в солевой раствор являются центрами кристаллизации, т.е. приводят к интенсификации процесса солеотложения [2, 3].

Во избежание отложения солей на поверхностях скважинного оборудования, а также других нежелательных явлений (коррозии, смолисто-парафиновых отложений, образования стойких эмульсий) часто применяется специальное оборудование для подачи нейтрализующих химических реагентов в необходимую точку скважины [2]. Однако для этих дополнительных устройств (средств активной защиты) требуется специальное обслуживание, что влияет на увеличение затрат на эксплуатацию скважины.

Основная цель настоящего исследования – повышение эффективности эксплуатации погружных центробежных насосов бесштангового типа (снижение энергозатрат и увеличение межремонтного периода), изменение геометрии элементов проточной части путем модификации функциональных поверхностей насосов созданием гидрофобных защитных покрытий на основе поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Задачей исследования является сравнительный анализ показателей работы исходной и модифицированной лопастных систем УЭЦН. При выполнении исследований оценивались энергетические показатели ступеней насоса, коррозионная стойкость и процессы солеобразования на поверхностях элементов проточной части в исходном и модифицированном состоянии с использованием ПАВ.

Для достижения поставленных целей предложено применение природоподобной технологии, а именно – эффекта лотоса [4–6]. Лист лотоса

представляет собой природную гидрофобную поверхность, для которой характерны большие значения угла смачивания при контакте капли воды с поверхностью.

Схема рельефа поверхности листа лотоса и характерная величина угла смачивания представлена на рис. 1.

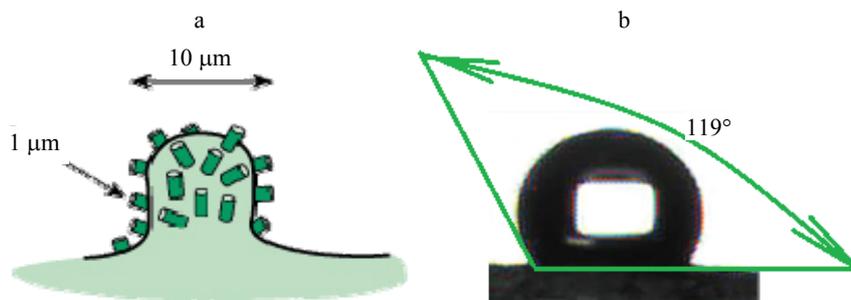


Рис. 1. Схема рельефа ультрагидрофобной поверхности листа лотоса (а) и характерная величина угла смачивания на его поверхности (б)

Fig. 1. Relief diagram of the lotus leaf ultrahydrophobic surface (a) and the characteristic wetting angle value on its surface (b)

При этом поверхность листа сохраняется сухой при скатывании капли и защищена от факторов внешнего воздействия. Гидрофобность листа лотоса обеспечивается его микроструктурированной поверхностью с тонким воскоподобным покрытием [4]. Следует отметить, что гидрофобизация поверхности по механизму эффекта лотоса с использованием ПАВ-покрытий исследовалась ранее в качестве метода снижения гидравлического сопротивления в трубопроводах, а также в многоступенчатых центробежных насосах [5–10].

На функциональных поверхностях лопастной системы аналогичный эффект возможно обеспечить с применением ПАВ-технологий, так как нанесение других покрытий, например полимерных, невозможно ввиду малых размеров проточных каналов рабочих колес скважинных насосов.

Технология применения ПАВ широко внедряется в большой энергетике [11] для задач консервации оборудования в период простоев и ремонтов. В качестве действующего ПАВ в данной работе использовались пленкообразующие амины.

Гидрофобизация функциональных поверхностей исследуемых насосов осуществлялась по технологии, разработанной в НИУ «МЭИ» [12]. В основе этой методики лежит адсорбция металлической поверхностью молекул ПАВ. По своему строению молекула ПАВ амфифильна (рис. 2): молекула общей величиной около 26 Å состоит из двух частей – полярной группы амина и неполярного углеводородного радикала.

Полярная группа, придающая молекулам ПАВ значительный дипольный момент и хорошо гидратируемая, обуславливает адсорбцию ПАВ на поверхности металлов в жидкостной среде. Гидрофобизация металлической поверхности с помощью ПАВ происходит в результате ориентированной адсорбции, приводящей к тому, что полярные группы фиксируются на поверхности, а углеводородные радикалы обращены во внешнюю среду, создавая водоотталкивающий слой.

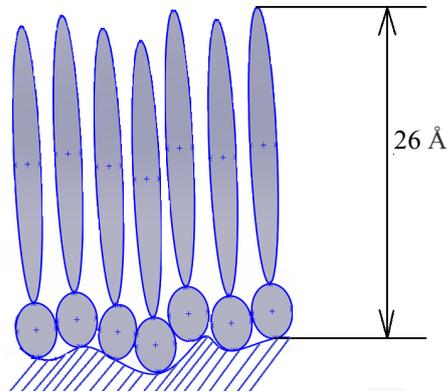


Рис. 2. Схема расположения молекул ПАВ на металлической поверхности

Fig. 2. Arrangement of surfactant molecules on a metal surface

Нанесение ПАВ на функциональные поверхности рабочего колеса и выправляющего аппарата насоса изменяет смачиваемость поверхностей. При этом прогнозируются повышение гидравлического КПД ступени насоса и обеспечение дополнительной защиты от коррозии и солеотложения. Для проверки этого предположения были проведены экспериментальные исследования.

### Методы исследования

Объектом исследования выступил электроприводной центробежный насос производства ООО «Римера-Алнас» марки 5А-35 с коэффициентом быстроходности  $n_s = 47,17$ . Ступень насоса 5А-35 (рис. 3) состоит из двух корпусных стаканов, внутри которых на подшипниках качения вращается рабочее колесо. В каждом стакане перед рабочим колесом расположен направляющий аппарат (четыре лопатки). Рабочее колесо насоса, изготовленное литьем из серого чугуна, состоит из восьми цилиндрических лопастей и ряда вихревых лопаток на внешней стороне ведущего диска.

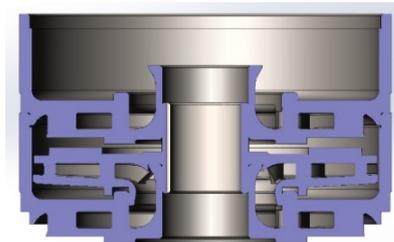


Рис. 3. Ступень насоса 5А-35 в разрезе

Fig. 3. Pump stage 5A-35 in section

При испытаниях экспериментальные характеристики ступеней ЭЦН определялись по показаниям манометров, дисплея расходомера, частотомера и электронных весов.

В зависимости от числа и типоразмера испытываемых ступеней смонтирован изменяемый узел насосной сборки (рис. 4).

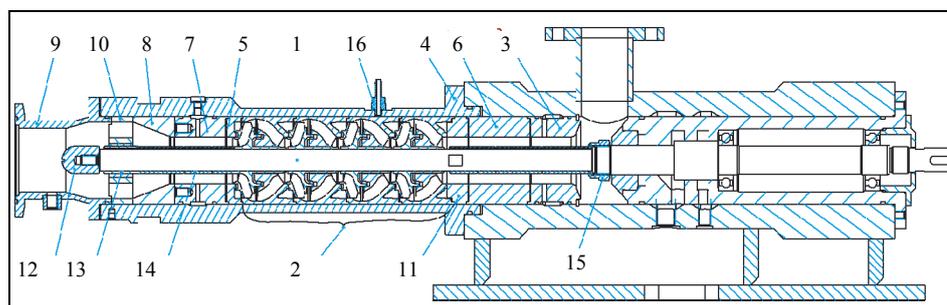


Рис. 4. Схема узла насосной сборки: 1 – вал; 2 – комплект ступеней ЭЦН; 3 – втулка выводящая; 4 – труба; 5 – опора колеса; 6 – проставок; 7 – втулка входная; 8 – конус; 9 – патрубок входной; 10 – подшипник; 11 – втулка опорная; 12 – наконечник; 13 – втулка защитная; 14 – втулка защитная вала; 15 – гайка; 16 – штуцер контроля утечек; позиции 1, 3, 4, 6, 7, 8, 11, 13, 14 – комплект сменных деталей для монтажа различных вариантов узла насосной сборки

Fig. 4. Diagram of the pump assembly unit: 1 – shaft; 2 – set of ECP stages; 3 – outlet sleeve; 4 – pipe; 5 – wheel support; 6 – spacers; 7 – inlet sleeve; 8 – cone; 9 – inlet pipe; 10 – bearing; 11 – support sleeve; 12 – tip; 13 – protective sleeve; 14 – shaft protective sleeve; 15 – nut; 16 – leak control fitting. Positions 1, 3, 4, 6, 7, 8, 11, 13, 14 – a set of interchangeable parts for mounting various versions of the pump assembly unit

Поверхности рабочего колеса и направляющего аппарата центробежного насоса 5А-35 были модифицированы на установке по формированию структурированных покрытий.

Гидрофобизация функциональных поверхностей производилась по отработанным программам, согласно которым гидрофобизируемый образец выдерживался в установке по нанесению ПАВ-покрытий длительное время в объеме циркулирующей рабочей среды с дозированием специально приготовленной эмульсии.

Степень гидрофобности поверхности оценивалась по величине угла контакта водяной капли с поверхностью (по результатам фотосъемки с выдержкой 2 мин).

Экспериментальные исследования образцов ступени насоса с модификациями поверхностей и без модификаций проведены в отделе испытаний ООО «Римера-Алнас» на испытательном стенде СЦН-2 (рис. 5).

Перед проведением экспериментов на испытательном стенде СЦН-2 произведена сборка узла из пяти ступеней насоса 5А-35 в соответствии с рис. 4. После установки узла и подготовки стенда осуществлялась обкатка стенда в течение 25 мин в режиме минимально возможной подачи, близком к закрытой задвижке, с целью достижения максимального давления в гидросистеме стенда.

Для этого открывались задвижка подачи воды из бака 1, вентили 10, краны манометров 3 (рис. 3) и система заполнялась рабочей жидкостью. После заполнения системы перекрывался выходной вентиль 10 и производился пуск электрооборудования, а также травление воздуха из гидросистемы (посредством крана 11). Затем вихревым насосом 14 опорожнялся бак 13 для сбора утечек. После обкатки стенда и отключения вихревого насоса выполнялось получение рабочих характеристик сборки ступеней по показаниям контрольно-измерительных приборов [13].

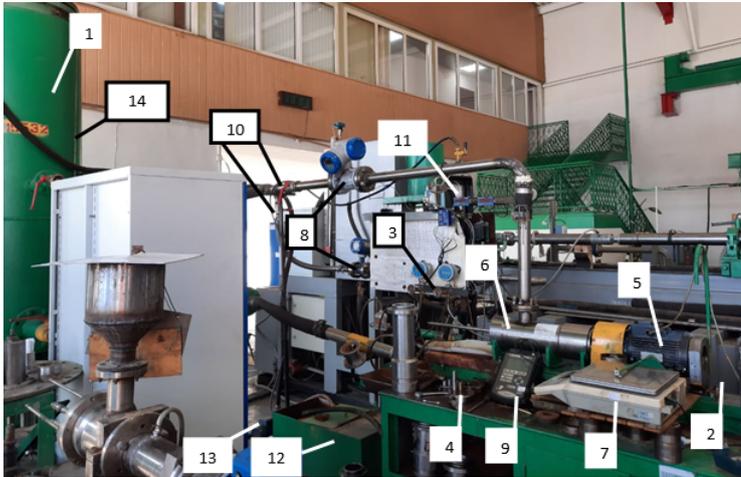


Рис. 5. Общий вид испытательного стенда СЦН-2: 1 – бак; 2 – станина; 3 – стойка с манометрами; 4 – хомут для соединения патрубков; 5 – балансирующий электродвигатель (мотор-весы); 6 – насосный модуль, в который монтируются испытываемые ступени; 7 – весы электронные; 8 – расходомеры; 9 – частотомер; 10 – вентили выходные, регулирующие подачу; 11 – кран сброса воздуха из трубопровода; 12 – бак для сбора утечек; 13 – вихревой насос; 14 – уровнемер

Fig. 5. General view of the SCP-2 test stand: 1 – tank; 2 – bed; 3 – rack with pressure gauges; 4 – clamp for connecting pipes; 5 – balancing electric motor (motor scales); 6 – pumping module into which the tested stages are mounted; 7 – electronic scales; 8 – flow meters; 9 – frequency meter; 10 – outlet valves regulating the supply; 11 – air discharge valve from the pipeline; 12 – leak collection tank; 13 – vortex pump; 14 – level gauge

В работе также рассматривалось влияние ПАВ-покрытия на процессы солеотложения и коррозии, являющиеся одними из основных проблем в сфере нефтедобычи. Процессы солеотложения возможно имитировать различными способами:

- испарением рабочей жидкости из проточной части;
- подачей в проточную часть химически активных жидкостей, имитирующих пластовую жидкость;
- подачей углекислого газа в проточную часть (осуществление барботажа) [14].

Для исследования влияния нанесения ПАВ (обработки поверхностей рабочего колеса и направляющего аппарата) на солеотложение применен метод длительного осаждения продуктов солевого раствора (15 ч и более) на элементы проточной части насоса. Образец был помещен в сосуд, залит насыщенным раствором минеральной соли, полученным растворением водой порошка дисульфида магния  $MgSO_4$ , и выдерживался при комнатной температуре до перехода формируемого отложения в твердое состояние [15].

Данным методом ускоренных испытаний имитировались процессы солеотложения при эксплуатации насоса в составе нефтедобывающей скважины. По результатам осаждения определялись: степень протекания коррозионных процессов по методу капли в соответствии с [16] – замерялось время, при котором индикаторный раствор при нанесении на поверхность менял цвет; степень прироста солевых отложений на поверхностях рабочих

органов насоса – по методу разности масс деталей до и после процесса осаждения.

### Результаты исследования

При оценке степени гидрофобности рабочих колес центробежного насоса 5А-35 получены следующие результаты: для одиннадцати исследуемых образцов с исходными поверхностями (до модификации) среднее значение угла смачивания по замерам не более  $90^\circ$ , при этом минимальное значение угла смачивания составляет  $33,4^\circ$ . На рис. 6 – фото капель водопроводной воды для измерений угла смачивания на образцах с исходной и с модифицированной поверхностями при температуре  $20^\circ\text{C}$ , нанесенных на 3-й образец рабочего колеса (рис. 7).

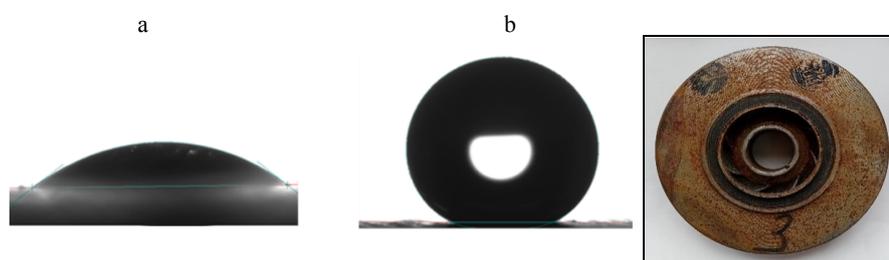


Рис. 6. Фото капель воды для измерений угла смачивания на образце с исходной поверхностью (а) и на образце с модифицированной поверхностью (б)  
Fig. 6. Water droplets photos for measuring the wetting angle on a sample with an initial surface (a) and on a sample with a modified surface (b)



Рис. 7. Рабочее колесо насоса 5А-35 (3-й образец)  
Fig. 7. The impeller of the pump 5А-35 (the 3<sup>rd</sup> sample)

В табл. 1 представлены результаты замеров угла контакта капли воды с поверхностью для всех испытуемых образцов. Поверхность необработанного колеса является гидрофильной. Определение среднего угла смачивания основано на трехкратном проведении замеров – по трем каплям для каждого образца до и после обработки ПАВ.

Как следует из данных таблицы, для исходной поверхности рабочего колеса наблюдается широкий разброс значений угла смачивания в зависимости от области нанесения капли. Жидкость наносилась на поверхности с различной шероховатостью, зависящей от механической обработки, и с различной степенью начальной коррозии в пределах одного образца. При этом заметно, что после нанесения ПАВ данный разброс по углам смачиваемости выровнялся. Кроме того, на поверхности исследуемых образцов угол смачивания значительно увеличился: максимальное значение для всех серий замеров составляет  $144,4^\circ$ , минимальное –  $99,0^\circ$ . Разброс полученных значений после обработки снизился более чем на 40 %.

Основываясь на результатах известных исследований [17], связанных с оценкой свойств модифицированных поверхностей с измененными характеристиками смачиваемости, в проведенных экспериментальных исследованиях достижение сверхгидрофобной поверхности не представляется возможным по причине того, что отсутствует возможность проведения обработки поверхности проточной части рабочего колеса до требуемого

уровня микрошероховатости. Поэтому в рассматриваемом случае имелась возможность нанесения только ПАВ.

Таблица 1

## Среднее значение угла смачивания для 11 образцов рабочих колес насоса 5А-35

## The average wetting angle for 11 samples of the pump 5A-35 impellers

| Номер образца /<br>Sample number | Угол смачивания (среднее значение), град. /<br>Wetting angle (average value), degree |   |
|----------------------------------|--|---|
|                                  | Исходная поверхность /<br>The initial surface  | Поверхность после нанесения ПАВ /<br>Surface after surfactant application |
| 1                                | 75,6   | 118,3   |
|                                  | 83,0   | 117,8   |
| 2                                | 90,1   | 102,0   |
| 3                                | 51,5   | 141,3   |
|                                  | 69,4   | 139,3   |
| 4                                | 50,5   | 132,7   |
| 5                                | 51,5   | 141,3   |
|                                  | 69,4   | 131,3   |
| 6                                | 66,9   | 109,9   |
| 7                                | 65,6   | 143,7   |
|                                  | 59,2   | 131,6   |
| 8                                | 48,4   | 134,6   |
| 9                                | 34,8   | 110,9   |
|                                  | 33,4   | 144,4   |
| 10                               | 55,5   | 99,0  |
| 11                               | 34,8   | 110,9   |
|                                  | 33,4   | 144,4   |

Следует отметить, что обычно под эффектом лотоса подразумевается формирование сверхгидрофобной поверхности (часто с краевым углом смачивания водой  $150^\circ$  и более [4]), где такие большие значения краевого угла смачивания обеспечиваются двумя факторами – слоем гидрофобного вещества на поверхности и микрошероховатостью поверхности.

Помимо оценки гидрофобности при проведении исследований была определена шероховатость поверхности с применением методики [18]. Были проведены замеры по параметрам  $Ra$  (среднее арифметическое отклонение профиля) и  $Rz$  (высота неровностей профиля по 10 точкам). Средние значения этих параметров для образцов колес составили:  $Ra = 9,3$  мкм;  $Rz = 46$  мкм.

На испытательном стенде СЦН-2 проведен ряд экспериментов в соответствии с методикой [13], по которым определены энергетические параметры работы насосного пакета из пяти ступеней 5А-35 и построены рабочие характеристики (пересчитанные на одну ступень). На рис. 8 представлена рабочая характеристика насоса 5А-35 с модифицированными рабочими поверхностями, построенная по результатам испытаний на воде (плотность  $1000 \text{ кг/м}^3$ ) при частоте вращения ротора насоса  $2910 \text{ мин}^{-1}$ .

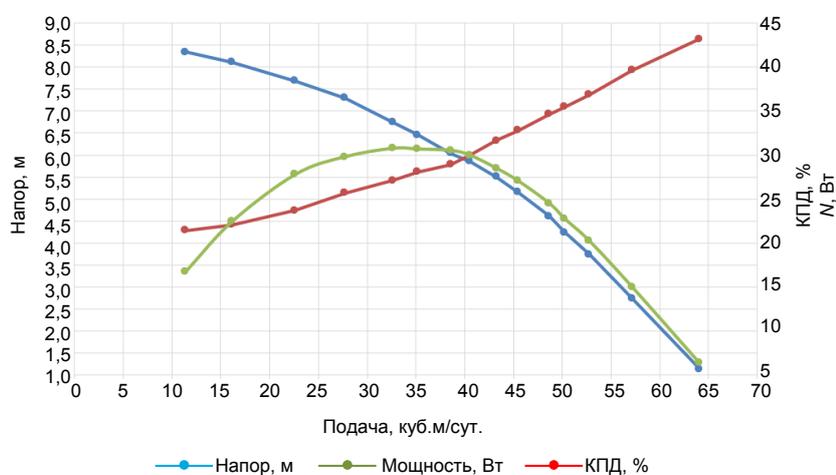


Рис. 8. Рабочая характеристика ступени насоса 5А-35 после обработки ПАВ  
Fig. 8. Operating characteristics of a pump 5A-35 stage after surfactant treatment

После построения рабочих характеристик проведено их сравнение по КПД и напору. Из графика рис. 9 видно, что на всем диапазоне подач КПД насоса с гидрофобным покрытием превышает КПД исходного насоса. Максимальное увеличение КПД наблюдается при расчетной подаче  $35 \text{ м}^3/\text{сут.}$  и составляет 2 %.

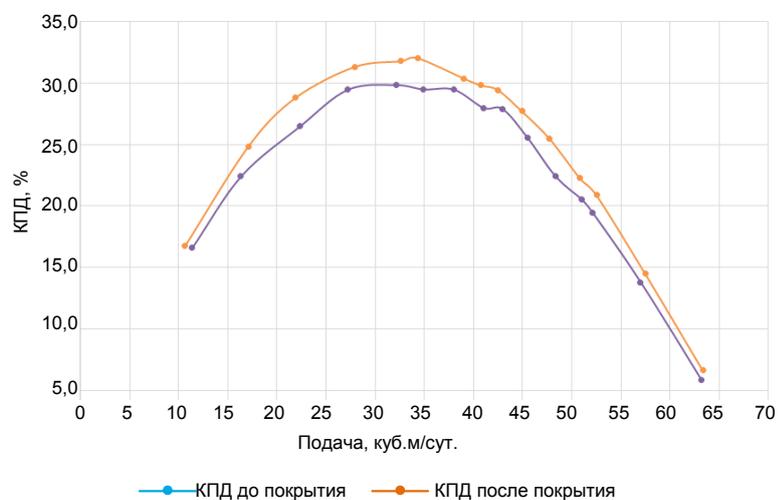


Рис. 9. График КПД ступени насоса 5А-35 до и после обработки ПАВ  
Fig. 9. Efficiency graph of a pump 5A-35 stage before and after surfactant treatment

Анализ напорной характеристики насоса после нанесения покрытия согласно рис. 10 свидетельствует, что в области рабочей зоны (от  $22$  до  $37 \text{ м}^3/\text{сут.}$ ) наблюдается увеличение напора на 1,0–1,5 %.

Таким образом, при нанесении ПАВ на функциональные поверхности рабочих органов гидромашин наблюдается улучшение энергетических характеристик насоса. Данный результат является свидетельством эффектив-

ности применения гидрофобных покрытий для элементов проточной части многоступенчатых центробежных гидромашин.

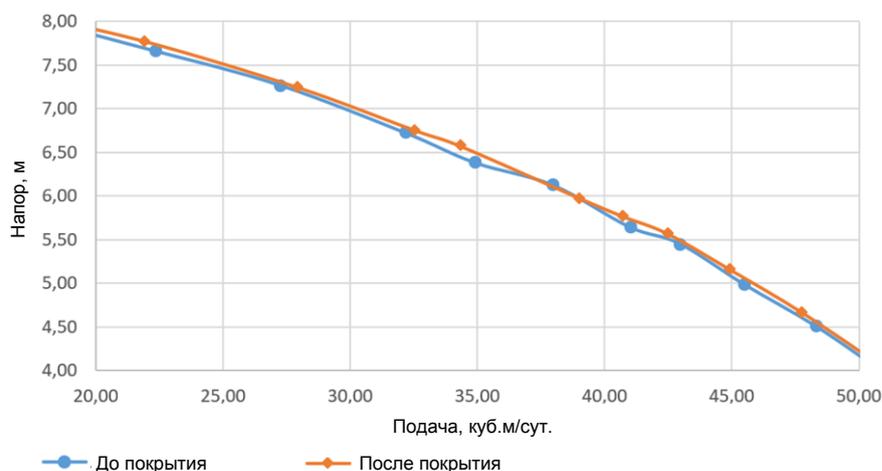


Рис. 10. График напорной характеристики ступени насоса 5А-35 до и после обработки ПАВ  
Fig. 10. Graph of the pump 5A-35 stage head characteristics before and after surfactant treatment

Образцы, обработанные ПАВ, меньше подверглись коррозии, чем исходные образцы. Работы [14, 15] указывают на то, что защитное действие покрытий ПАВ основано на снижении адгезии поверхности с осаждающимся на ней слоем солей. Это интенсифицирует унос отложений с защищаемой поверхности потоком рабочей жидкости в процессе эксплуатации УЭЦН. Отложившиеся соли удерживаются в рабочей среде адсорбционными силами. Величина данных сил зависит от энергии свободной поверхности. В связи со снижением поверхностной энергии снижается интенсивность парафинодержащих отложений, приводящих к закупорке межлопастных каналов.

В табл. 2 и 3 представлены результаты исследований гравиметрическим методом и исследований по методу капли соответственно.

Таблица 2

#### Гравиметрические исследования

##### Gravimetric studies

| Масса, г / Weight, g                       |  |  |
|--|--|--|
| Исходное колесо /<br>The original impeller | Модифицированное колесо /<br>Modifications. impeller |  |
| 120,9677                                   | 118,9003   | Исх. / Origin  |
|  | 118,9942   | ПАВ покрытие / Surfactant coating                    |
| 121,2521                                   | 118,9942   | После 5 ч / After 5 h                                |
| 121,2915                                   | 119,1383   | После 10 ч / After 10 h                              |
| 121,3412                                   | 119,1206   | После 15 ч / After 15 h                              |
| 0,3735                                     | 0,2203   | Привес за 15 ч / Gain in 15 h                        |
| 120,9527                                   | 118,9125   | Без соли / Without salt                              |
| 0,01500                                    | -0,0122  | Убыль массы (коррозия) /<br>Loss of mass (corrosion) |

Таблица 3

**Исследования методом капли**  
**Studies by the drop method**

| Метод капли. Время, с /<br>The "drop" method. Time, sec. |     |     |     | Удельная сорбция, мкг/см <sup>2</sup> /<br>Specific sorption<br>micrograms/cm <sup>2</sup> |
|--|-----|-----|-----|--|
| Исходное колесо /<br>The original impeller               | 100 | 110 | 115 |  |
| Модифицированное колесо /<br>Modifications. impeller     | 170 | 250 | 360 | 7,35   |

На образцах с покрытием ПАВ за 15 ч солеотложение проявилось в меньшей степени, чем на исходных образцах. Уменьшение массы рабочих колес в процессе осаждения ПАВ связано с протеканием коррозионных процессов, а для обработанных колес – также с уносом части коррозионных отложений с поверхности в процессе нанесения покрытия ПАВ. По изменению цвета индикатора видно, что интенсивность коррозии на образцах купируется и развивается с меньшей интенсивностью, чем на исходных образцах.

Изменение цвета капли индикатора на обработанных образцах (как до процесса осаждения, так и после нее) занимало существенно больше времени – до 20 мин в сравнении с 2 мин для исходных образцов. Этот факт – свидетельство значительного повышения коррозионной стойкости материала колес при модификации поверхности нанесением ПАВ, причем увеличенная коррозионная стойкость поверхностей, обработанных ПАВ, сохраняется и после выдерживания образца в солевом растворе.

Из представленных данных можно сделать вывод, что реализация эффекта лотоса за счет модификации ПАВ элементов проточной части насоса позволяет обеспечить увеличение ресурса и надежности насосного оборудования и соответственно снижение затрат на эксплуатацию, ремонтно-восстановительные работы и увеличение межремонтного периода.

### ВЫВОДЫ

1. На основе анализа полученных результатов установлена эффективность гидрофобизации поверхностей деталей в гидромашиностроении на примере пятиступенчатой сборки погружного многоступенчатого центробежного насоса. В ходе экспериментов установлено, что при модификации функциональных поверхностей насоса, выполненных по подобию эффекта лотоса с применением ПАВ, увеличивается суммарный КПД ступени на 1–2 %. Прирост КПД насоса в долгосрочной перспективе является возможностью ощутимого удельного снижения затрат

2. По результатам испытаний на коррозионную стойкость и солеотложение отмечено положительное влияние гидрофобизации поверхности – были снижены коррозия лопастной системы и отложение солей на стенках межлопастных каналов, что позволяет обеспечить увеличение срока эксплуатации насоса, а также исключить ухудшение паспортных характеристик, таких как развиваемый расчетный напор и подача, связанного с «закупоркой» межло-

пастных каналов рабочего колеса и проточной части в целом в результате «запарафинивания» и образования в них солеотложений.

3. Полученные результаты показывают перспективность примененных методов для повышения эффективности и надежности насосного оборудования для нефтедобычи, а в качестве расширения области применения предлагаемого подхода биомиметики (модифицированному изменению смачиваемости функциональных поверхностей) может быть представлен подход к тиражированию и применению данной технологии на иных типах насосного оборудования, эксплуатируемого в сложных условиях для перекачивания химически активных жидкостей, а также для модификации элементов проточной части гидравлических турбин, использующих избыточную энергию потока в магистральных трубопроводах для производства электроэнергии на собственные нужды повысительных насосных станций и/или станций катодной защиты магистральных трубопроводных систем от коррозии [19–21].

Результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения Государственного задания № FSWF-2022-0008, вступившего в силу в соответствии с Соглашением № 075-03-2022-138/5 от 02.11.2022.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ивашечкин, В. В. Оптимизация работы водозаборов подземных вод с помощью двухколлонных скважин / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 5. С. 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-451-462>.
2. Повышение эффективности эксплуатации центробежных насосов для добычи нефти на месторождении Западный Тикрит (West Tikrit) в Ираке / А. Ф. Ал-шареа [и др.] // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2021. № 6. С. 221–228.
3. Веремеинок, В. В. Методика гидравлического расчета групповых скважинных водозаборов с парными сборными водоводами / В. В. Веремеинок, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 3. С. 268–280. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-268-280>.
4. Bhushan, B. Bioinspired Structured Surfaces / B. Bhushan // Langmuir. 2012. Vol. 28, No 3. P. 1698–1714. <https://doi.org/10.1021/la2043729>.
5. Successive impact of droplets on the superhydrophobic surface / Chenyang Wang [et al.] // International Journal of Multiphase Flow. 2024. Vol. 174. P. 104758. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.104758>.
6. Даулетбекова, А. К. Эффект лотоса и биороботы / А. К. Даулетбекова, К. Шварц, М. Сорокин // Вестник евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева. Сер. Физика. Астрономия. 2021. Т. 137, № 4. С. 71–75.
7. Расчет трубопроводных систем с учетом степени гидрофобности внутренних поверхностей / М. А. Морозов [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2016. № 4. С. 130–133.
8. Волков, А. В. К вопросу об использовании супергидрофобности для повышения энергоэффективности центробежных насосов / А. В. Волков, А. И. Давыдов, Г. П. Хованов // Насосы & Оборудование. 2009. № 6. С. 48–51.
9. Волков, А. В. Экспериментальные исследования эффекта гидрофобизации твердых поверхностей и элементов центробежных насосов / А. В. Волков, А. И. Давыдов, Г. П. Хованов // Промышленная энергетика. 2010. № 11. С. 41–44.
10. Экспериментальное исследование влияния гидрофобного покрытия на энергоэффективность центробежного насоса в зависимости от коэффициента быстроходности / А. В. Волков [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. 2012. № 1 (75). С. 38–41.
11. Интенсификация теплообменных процессов в конденсаторах паровых турбин с использованием поверхностно-активных веществ / А. В. Куршаков [и др.] // Теплоэнергетика. 2014. № 11. С. 17–20.

12. Рыженков, В. А. О повышении эффективности эксплуатации отечественных систем теплоснабжения в современных условиях / В. А. Рыженков // Новости теплоснабжения. 2006. № 9 (73). С. 36–42.
13. Насосы динамические. Методы испытаний. Термины и определения: ГОСТ 6134–2007 (ИСО 9906:1999). Введ. 2008-06-01. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2007. 100 с.
14. Разработка стенда оценки стойкости внутренних защитных покрытий НКТ к неорганическим солеотложениям / Д. В. Берков [и др.] // Нефтегазовое дело. 2024. Т. 22, № 1. С. 160–172. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-1-160-172>.
15. Протасов, В. Н. Методологические основы выбора материалов полимерных покрытий для предотвращения образования значительных отложений парафинов и минеральных солей на внутренней поверхности нефтегазопроводных труб / В. Н. Протасов, А. В. Мурадов // Территория нефтегаз. 2008. № 3. С. 36–43.
16. Электрохимические методы определения стойкости против межкристаллитной коррозии. Термины и определения: ГОСТ 9.914–91. Введ. 1992-01-01. М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1991. 17 с.
17. Рыженков, А. В. Исследование влияния поверхностно-активных веществ на гидравлическое сопротивление трубопроводов систем теплоснабжения и разработка способа снижения энергозатрат при транспортировке теплоносителя: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.14.14 / А. В. Рыженков; Московский энергетический институт. М., 2008. 20 с.
18. Шероховатость поверхности; Параметры, характеристики и обозначения: ГОСТ 2789–73 (СТ СЭВ 638–77). Введ. 01-01-75. М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам: Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР, 1975. 14 с.
19. О возможностях применения низконапорных микроГЭС для автономного энергоснабжения технологических устройств / А. Г. Парыгин [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2015. № 10. С. 127–130.
20. Веремениук, В. В. Математические модели скважинных водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами соединения сборных водоводов / В. В. Веремениук, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 561–578. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-561-578>.
21. Веремениук, В. В. Моделирование работы скважинного водозабора подземных вод с кольцевым сборным водоводом / В. В. Веремениук, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 3. С. 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-289-300>.

Поступила 15.05.2024 Подписана в печать 16.07.2024 Опубликовано онлайн 30.09.2024

#### REFERENCES

1. Ivashechkin V. V., Medvedeva J. A. (2022) Optimization of the Operation of Groundwater Intakes Using Two-Column Wells. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (5), 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-451-462> (in Russian).
2. Al-sharea A. F., Kvesko N. G., Almohammad A. M., Kaiser Yu. F. (2021) Improving the Efficiency of Centrifugal Pumps for Oil Production at the West Tikrit Field (Iraq). *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, (6), 221–228 (in Russian).
3. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Krytskaya V. I. (2024) Hydraulic Calculation Methodology for Group Well Water Intakes with Paired Prefabricated Water Pipelines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (3), 268–280. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-268-280> (in Russian).
4. Bhushan B. (2012) Bioinspired Structured Surfaces. *Langmuir*, 28 (3), 1698–1714. <https://doi.org/10.1021/la2043729>.
5. Wang C., Zhang H., Zhu D., Huang B., Xu Z., Hao P., He F., Zhao H., Zhang X. (2024) Successive Impact of Droplets on the Superhydrophobic Surface. *International Journal of Multiphase Flow*, 174, 104758. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.104758>.

6. Dautlebekova A. K., Sorokin M., Schwartz K. (2021) Lotus Effects and Biorobots. *Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Physics, Astronomy Series*, 137 (4), 71–75 (in Russian).
7. Morozov M. A., Volkov A. V., Ryzhenkov A. V., Parygin A. G., Lukin M. V., Naumov A. V. (2016) Calculation of the Pipeline Systems According to the Degree of Hydrophobicity of Internal Surfaces. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*, 4, 130–133 (in Russian).
8. Volkov A. B., Davydov A. I., Khovanov G. P. On the Issue of Using Superhydrophobic News to Increase the Efficiency of Centrifugal Pumps. *Nasosy & Oborudovanie = Pumps & Equipment*, (6), 48–51 (in Russian).
9. Volkov A. B., Davydov A. I., Khovanov G. P. (2010) Experimental Studies of the Effect of Hydrophobization of Solid Surfaces and Elements of Centrifugal Pumps. *Promyshlennaya Energetika = Industrial Power Engineering*, (11), 41–44 (in Russian).
10. Volkov A. V., Davydov A. I., Khovanov G. P., Parygin A. G. (2012) An Experimental Study of the Effect of a Hydrophobic Coating on the Energy Efficiency of a Centrifugal Pump Depending on the Speed Coefficient. *Ènergobereženie i Vodopodgotovka = Energy Saving and Water Treatment*, (1), 38–41 (in Russian).
11. Kurshakov A. V., Ryzhenkov A. V., Bodrov A. A., Ryzhenkov O. V., Patakin A. A., Chernov E. F. (2014) Heat Transfer Enhancement in Steam-Turbine Condensers with the Use of Surface-Active Substances. *Thermal Engineering*, 61 (11), 785–789. <https://doi.org/10.1134/S0040601514110020>.
12. Ryzhenkov V. A. (2006) On Improving the Efficiency of Operation of Domestic Heat Supply Systems in Modern Conditions. *Novosti Teplosnabzheniya [Heat Supply News]*, (9), 36–42 (in Russian).
13. State standard 6134-2007 (ISO 9906:1999). *Dynamic Pumps. Test Methods. Terms and Definitions*. Moscow, Federal Agency for Technical Regulation and Metrology: Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 2007. 100 (in Russian).
14. Berkov D. V., Kostyuk I. I., Yudin P. E., Verevkin A. G. (2024) Development of Test Bench for Evaluation of Resistance of Internal Protective Tubing Coatings to Inorganic Salt Deposits. *Neftegazovoe delo = Petroleum Engineering*, 22 (1), 160–172. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-1-160-172> (in Russian).
15. Protasov V. N., Muradov A. V. (2008) Methodological Foundations of the Choice of Polymer Coating Materials to Prevent the Formation of Significant Deposits of Paraffins and Mineral Salts on the Inner Surface of Oil and Gas Pipelines. *Territoriya neftegaz [Territory of Neftegaz]*, (3), 36–43 (in Russian).
16. State standard 9.914-91. *Electrochemical Methods for Determining Resistance Against Inter-crystalline Corrosion. Terms and Definitions*. Moscow, USSR Committee for Standardization and Metrology: USSR State Committee for Product Quality Management and Standards, 1991. 17 (in Russian).
17. Ryzhenkov A. V. (2008) *Investigation of the Effect of Surfactants on the Hydraulic Resistance of Pipelines of Heat Supply Systems and the Development of a Method for Reducing Energy Consumption during Transportation of a Coolant* [dissertation]. Moscow. 20 (in Russian).
18. State standard 2789-73 (Comecon Standard 638-77). *Surface Roughness; Parameters, Characteristics and Designations*. Moscow, USSR State Committee for Product Quality Management and Standards: The State Committee of Standards of the Council of Ministers of the USSR, 1975. 14 (in Russian).
19. Parygin A. G., Volkov A. V., Naumov A. V., Druzinin A. A., Vihlantzev A. A. (2015) About the Opportunities the Application of the Low Head Micro Hydraulic Power Plants for the Autonomous Power Supply of the Technological Equipment of the Oil Pipelines. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*, (10), 127–130 (in Russian).
20. Veremenyuk V. V., Ivashchkin V. V., Krytskaya V. I. (2020) The Borehole Water Intakes Mathematical Models with a Branched and Circular Connection Scheme for Prefabricated Water Conduits. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (6), 561–578. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-561-578> (in Russian).
21. Veremenyuk V. V., Ivashchkin V. V., Krytskaya V. I. (2023) Simulation of the Operation of a Borehole Groundwater Intake with an Annular Prefabricated Conduit. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (3), 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-289-300> (in Russian)

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-440-451>

УДК 628.16

## **Промышленное апробирование гибридной технологии очистки воды из реки Оки методом угляевания с порошкообразным сорбентом**

**А. А. Филимонова<sup>1)</sup>, А. Ю. Власова<sup>1)</sup>, Н. Б. Карницкий<sup>2)</sup>, Н. Д. Чичирова<sup>1)</sup>,  
Р. Ф. Камалиева<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Казанский государственный энергетический университет (Казань, Российская Федерация),

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** Развитие промышленной отрасли, увеличение производственных мощностей оказывают положительный эффект на экономическую ситуацию страны, но не на экологическую безопасность. В водоисточники постоянно сбрасываются недостаточно очищенные и загрязненные сточные воды, количество которых напрямую зависит от промышленной развитости региона. Так, антропогенная нагрузка на реку Оку влияет на состав воды в водоисточнике, часто бывают всплески залповых загрязнений, а также цветение фитопланктонов в летний период, которые в дальнейшем существенно снижают эффективность очистки воды до питьевого качества. Поэтому разработка технологий, которые смогут поддерживать очистку на требуемом уровне, является актуальной задачей. В статье представлен метод угляевания, который позволит в короткие сроки нейтрализовать загрязнения и повысить качество очистки. Промышленный эксперимент разработанной технологии проводился на действующей станции очистки с апробацией двух крайних дозировок сорбционного материала. В работе определена оптимальная доза угольной пульпы, описано влияние на значимые показатели очистки, а также разработаны технологические решения по точке ввода угольной пульпы и кратности дозирования. Проведенные исследования позволили расширить знания в области подготовки питьевой воды и определить значимые параметры воды, на которые влияет метод сорбционной очистки.

**Ключевые слова:** метод угляевания, вода питьевого качества, угольная пульпа, порошкообразный уголь марки ОУ-А

**Для цитирования:** Промышленное апробирование гибридной технологии очистки воды из реки Оки методом угляевания с порошкообразным сорбентом / А. А. Филимонова [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 67, № 5. С. 440–451. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-440-451>

---

### **Адрес для переписки**

Власова Алена Юрьевна  
Казанский государственный  
энергетический университет  
ул. Красносельская, 51,  
420066, г. Казань, Российская Федерация  
Тел.: +7 843 519-42-52  
[vlasovaay@mail.ru](mailto:vlasovaay@mail.ru)

### **Address for correspondence**

Vlasova Alena Yu.  
Kazan State Power  
Engineering University  
51, Krasnoselskaya str.,  
420066, Kazan, Russian Federation  
Tel.: +7 843 519-42-52  
[vlasovaay@mail.ru](mailto:vlasovaay@mail.ru)

---

## Industrial Testing of a Hybrid Technology for Water Purification from the Oka River Using the Method of Charcoalization with Powdered Sorbent

A. A. Filimonova<sup>1)</sup>, A. Yu. Vlasova<sup>1)</sup>, N. B. Karnitsky<sup>2)</sup>, N. D. Chichirova<sup>1)</sup>,  
R. F. Kamaliev<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Kazan State Power Engineering University (Kazan, Russian Federation),

<sup>2)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The development of the industrial sector and the increase in production capacity have a positive effect on the economic situation of the country, but not on environmental safety. Insufficiently purified and polluted wastewater is constantly discharged into water sources, the amount of which directly depends on the industrial development of the region. Thus, the anthropogenic load on the Oka River affects the composition of water in the source, there are often bursts of instantaneous emissions, as well as the flowering of phytoplankton in the summer. The latter further significantly reduce the efficiency of water purification to drinking quality. Therefore, the development of technologies that will be able to maintain purification at the required level is an urgent task. The article presents the method of charcoalization, which allows to neutralize pollution in a short time and improve the water treatment quality. An industrial experiment of the developed technology was carried out at an operating water treatment plant with testing of two extreme dosages of sorption material. The optimal dose of coal pulp was determined, the impact on significant purification performance was described, and the technological solutions have been developed to determine the point of coal pulp input and the dosage multiplicity. The conducted research has made it possible to expand knowledge in the field of drinking water preparation and to determine significant water parameters that are affected by the sorption purification method.

**Keywords:** method of charcoalization, drinking water, coal pulp, powdered coal of OU-A brand

**For citation:** Filimonova A. A., Vlasova A. Yu., Karnitsky N. B., Chichirova N. D., Kamaliev R. F. (2024) Industrial Testing of a Hybrid Technology for Water Purification from the Oka River Using the Method of Charcoalization with Powdered Sorbent. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (5), 440–451. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-440-451> (in Russian)

### Введение

Предприятия промышленного сектора существенно увеличивают нагрузку антропогенного характера на источники водных ресурсов. Очистка сточных вод не всегда осуществляется качественно, и в водоисточник попадают различные органические загрязнения со сточными водами. Это явление особенно выражено в промышленных регионах, где водные источники испытывают значительное воздействие со стороны человека [1]. Одним из таких водоисточников является река Ока. На протяжении всей ее длины, особенно в среднем течении, производится систематический сброс сточных вод [2]. Отягощающим обстоятельством является непосредственная близость химического города Дзержинска. Учитывая огромное многообразие выпускаемой заводом продукции, качественный состав сточных вод нестабильный и постоянно меняется в зависимости от выработки предприятия.

Деятельность человека негативно сказывается на ключевых показателях качества природной воды. Анализ комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод согласно РД 52.24.643–2002 показал, что вода в водоисточнике характеризуется как «очень грязная» и «грязная». Для реки Оки наиболее характерны загрязнения органическими веществами, соединениями меди и азота, а в летний период (июль–август) еще и увеличивается активность жизнедеятельности фитопланктонов [3–5]. Чрезмерное развитие фитопланктона приводит к «цветению» и, как следствие, к резкому ухудшению показателей качества природной воды. Как правило, для рек средней полосы России данный период длится с середины июля по август. Поэтому для поддержания эффективности очистки требуется внедрение дополнительных установок, которые позволят подготавливать воду требуемого качества.

Для создания эффективных методов дополнительной очистки необходимо оценить состояние водного источника и определить причины изменения важных показателей качества природной воды, таких как химическое потребление кислорода (ХПК) и перманганатная окисляемость (ПО). Для реки Оки превышение ХПК более 45 мг/л и ПО более 8 мг О/л свидетельствует о необходимости подключения дополнительной обработки исходной воды с целью получения очищенной, удовлетворяющей требованиям СанПиН 2.1.3684-21 [6–8]. Цель работы заключалась в разработке и апробировании технологии дополнительной обработки природной воды для поддержания требуемой эффективности очистки.

Практическая значимость разработанного решения заключается в том, что предложенный метод позволяет в короткие сроки снизить концентрацию загрязняющих соединений в исходной воде путем ввода доступного и дешевого сорбционного материала. Сорбционный материал, выбранный для апробирования метода, является экологически безопасным и пригодным для обработки воды питьевого качества. В процессе промышленного эксперимента определена максимальная и минимальная доза сорбирующей пульпы, даны рекомендации по кратности дозирования.

Научная новизна исследования заключается в определении количественного снижения значений ключевых показателей качества воды при различных дозировках сорбционной пульпы в периоды залповых сбросов сточных вод и резких антропогенных выбросов. Рабочая дозировка материала определяется опытным путем. Подбор необходимо осуществлять на действующей технологии с возможным отсечением линии отстоя и фильтрации для корректной оценки результата, а марка сорбционного материала может быть выбрана либо экспериментальным путем, либо по техническим характеристикам.

### **Основная часть**

Для проведения опытно-промышленных испытаний на станции подготовки воды в Нижнем Новгороде было предусмотрено отделение действу-

ющей технологии от экспериментальной части. Данная возможность позволила получить достоверные результаты и объективно оценить действие метода сорбции. Для апробирования метода были выбраны один отстойник и два механических фильтра (загрузка – кварцевый песок). Один фильтр предусмотрен для проведения метода сорбции активным древесным углем, а второй работал в обычном рабочем режиме для сопоставления результатов (рис. 1).

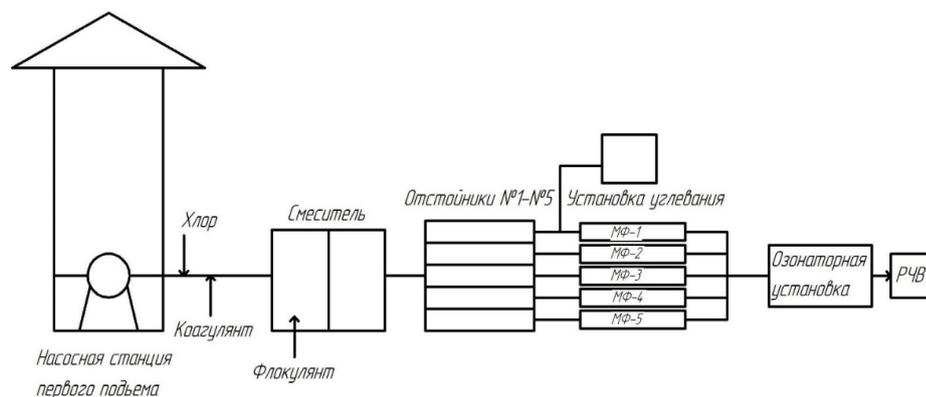


Рис. 1. Технологическая схема опытно-промышленного эксперимента

Fig. 1. Process flow diagram of the pilot-industrial experiment

Подготовка воды питьевого качества для потребителей состоит в следующем: на первом этапе исходная речная вода забирается из природного источника, далее направляется на станцию, где осуществляется ее фильтрация, и там же в воду дозируются дезинфектант (хлорная вода), коагулянт и флокулянт. Дозировки химических веществ, которые вводятся в систему смесителей для хлорной воды, составляют 3 мг/л, для сульфата алюминия, который традиционно используется в качестве коагулянта, – 300 мг/л, а для товарного продукта Floram AN 905 PWG (коагулянт), – 0,2 мг/л. Используемые дозировки реагентов соответствуют требованиям рабочих стандартов по дозированию реагентов по сезонности, а именно конца июля – времени проведения промышленных испытаний на водоканале.

На третьем этапе вода, насыщенная реагентами, поступает в реакционные камеры, и далее – в горизонтальные отстойники, в которых осаждаются общая масса взвешенных частиц и окрашенных веществ. После горизонтальных отстойников вода направляется на фильтрацию на механических фильтрах. Промышленные испытания проводились на механическом фильтре № 1, в который на входе в «воздушник» был установлен трубопровод для подачи угольной пульпы, которая затем направляется на фильтрующую нагрузку.

Механические фильтры № 2–5 функционировали в стандартном режиме. После механической фильтрации проводятся озонирование потоков воды и последующий сбор в резервуарах чистой воды (РЧВ).

Концентрации содержащихся органических веществ в воде определялись в серии опытно-промышленных испытаний. Были проведены два сегмента тестовых испытаний, для которых подбирались максимальная и минимальная концентрации угольной пульпы, исходя из анализа литературных данных (3 и 10 мг/л). Необходимый расход угольной пульпы рассчитывался по объему воды, проходящей через механический фильтр. Пульпа расфасовывалась в специальные контейнеры и далее смешивалась с водой в баке с использованием электромешалки для перемешивания. Для получения угольной пульпы рекомендовалась марка древесного активного угля марки ОУ-А по стандарту ГОСТ 4453–74. Выбор этой марки обусловлен высокой адсорбционной активностью (не менее 225 мг на 1 г, согласно данным производителя) по сравнению с индикатором метиленовым синим, высокой удельной поверхностью (более 1200 м<sup>2</sup> на 1 г угля), зависящей от большого объема и широкого диапазона пор.

Согласно проведенным исследованиям, для дозирования порошкообразного угля можно применять активные угли марок ОУ-А, ОУ-Б, ОУ-В, ОУ-Г, АДУ-В, СПДК-27Д, ЭКСТРА-СОРБ-102 [9], из которых угли марок ОУ-А и СПДК-27Д наиболее часто используются на практике. В свою очередь, необходимо перед использованием проводить тестирование конкретных сортов угля для определения их сорбционной активности. Игнорирование данного этапа может значительно снизить эффективность метода угляевания.

Установка для проведения угляевания в промышленном варианте представляет собой специализированный технологический модуль в контейнерном исполнении. Узлы и блоки установки включают бак, мешалку с электродвигателем, соединительный шланг с краном и фильтрующее (сорбционное) вещество, в качестве которого применяется активный уголь в форме древесного порошка марки ОУ-А (по ГОСТ). Для контроля и настройки расхода пульпы используются кран и измерительная шкала на баке. Для проведения испытаний разработана единая схема методики, позволяющая вести учет корректировки дозы угольной пульпы.

Время фильтроцикла составило 48 ч. Порядок проведения испытаний включал следующие этапы:

1. Одновременный запуск и работа в стандартном режиме в течение 8 ч после регенерации испытательного фильтра № 1 и фильтра сравнения № 2.
2. Подача угольной суспензии в испытательный фильтр № 1 на протяжении следующих 8 ч с параллельной работой фильтра сравнения (работал в обычном режиме).
3. Последующие за моментом останова подачи угольной суспензии 32 ч работы фильтра № 1 в стандартном режиме.
4. Вывод фильтра № 1 на регенерацию. Перед этим проводился осмотр фильтров с целью проверки объема насыпного материала, наличия иловых отложений на их поверхности, а также распределения угольной пульпы на фильтре № 1, оценка скорости фильтрации.

По результатам осмотра фильтра № 1 выявлено равномерное распределение угольной пульпы по поверхности фильтрующего материала (не глубже 5 см). В процессе регенерации вся пульпа с поверхности полностью удалялась, а время регенерации фильтра с углеванием не превышало 5 мин.

Отбор образцов воды во время проведения опытно-промышленных испытаний проводили из испытательного фильтра № 1 и фильтра № 2 в соответствии с разработанной режимной картой. Оценка эффективности очистки воды от органических веществ проводилась по следующим показателям качества: цвет, мутность, общий остаточный хлор, перманганатная окисляемость и общий органический углерод (ООУ).

Анализ ООУ проводили согласно ГОСТ Р 52991–2008 «Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода» с использованием ТОС анализаторов, в основе работы которых лежит метод Дюма–Прегля. При этом исследуемая проба сжигается в потоке инертного газа, а количество углекислого газа, образующегося на выходе, определяется датчиком-анализатором углекислого газа [10].

Перманганатную окисляемость определяли согласно ГОСТ Р 55684–2013 «Вода питьевая. Метод определения перманганатной окисляемости» [11]. Показатели цветности и мутности исследовали с помощью турбидиметрического метода оценки. Остаточный суммарный хлор анализировали по методике ГОСТ Р 55683–2013 «Вода питьевая. Метод определения содержания остаточного активного (общего) хлора на месте отбора проб» [12].

Образцы воды, отобранные во время промышленных испытаний, исследованы в химической лаборатории на предприятии. Анализы обработаны с использованием статистических методов, что позволило определить ключевые статистические параметры для полного набора данных. Среди них: среднее арифметическое, абсолютная ошибка, количество степеней свободы, критерий Стьюдента, среднеквадратическое отклонение, дисперсия, ошибка среднего арифметического и коэффициент вариации, а также показатель точности проведенного эксперимента. Полученные показатели качества воды считаются значимыми, так как критерий Стьюдента для среднего арифметического демонстрирует высокую степень надежности и уровень точности эксперимента оказался менее 5 %.

Результаты лабораторных исследований проб воды для каждого отобранного показателя качества в течение эксперимента отражены на графиках (рис. 2–6). Для получения полной картины влияния углевания на изменение показателей качества воды отбор проб проводили каждый час в процессе дозирования угольной пульпы и после него (с 10:00 до 18:00 в течение первых суток 48-часового фильтроцикла).

Анализируя результаты экспериментального дозирования угольной пульпы концентрацией 3 мг/л, можно достоверно утверждать о заметном уменьшении цветности и мутности и снижении концентрации остаточного хлора на фильтре с углеванием, а значение показателя перманганатной

окисляемости и содержание общего органического углерода остались без значимых изменений.

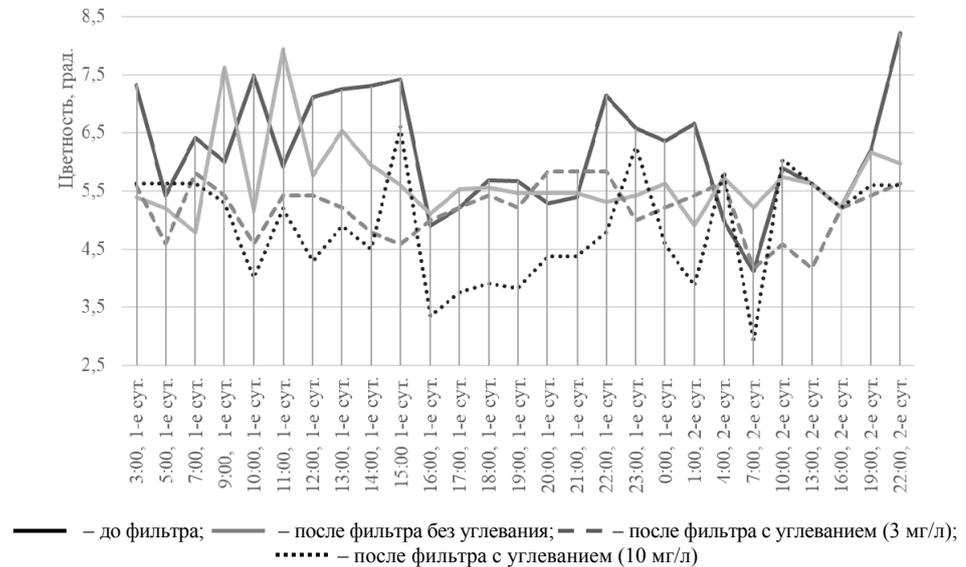


Рис. 2. Изменение показателя цветности в ходе эксперимента

Fig. 2. Change in color index during the experiment

По завершении дозирования порошкообразного угольного сорбента в течение следующих 4 ч наблюдалось значительное снижение показателей цветности и мутности и концентрации остаточного хлора на механическом фильтре № 1, что обуславливается высокими сорбционными свойствами угля марки ОУ-А.

После завершения эксперимента с дозированием угольной пульпы концентрацией 3 мг/л проводился процесс регенерации фильтров в течение 5 мин. Данный временной интервал полностью соответствует нормам для фильтров без углевания. По окончании промывки был проведен второй эксперимент с дозированием угольного порошкообразного сорбента максимальной концентрацией 10 мг/л с 9:00 до 17:00 с использованием тех же фильтров. Пробы воды забирались каждый час как в процессе дозирования, так и после его окончания.

Анализируя результаты экспериментального дозирования угольной пульпы максимальной концентрацией 10 мг/л, можно достоверно утверждать о заметном уменьшении цветности, мутности и содержания общего органического углерода на испытательном и контрольном фильтрах. На фильтре № 1 снижение цветности составило более 17 %, однако в осенне-весенний период данное изменение будет намного выше. Также стоит отметить, что значения показателей перманганатной окисляемости и остаточного активного хлора существенно сократились на испытательном

фильтре, а на фильтре № 2 изменение данных показателей не является статистически значимым.

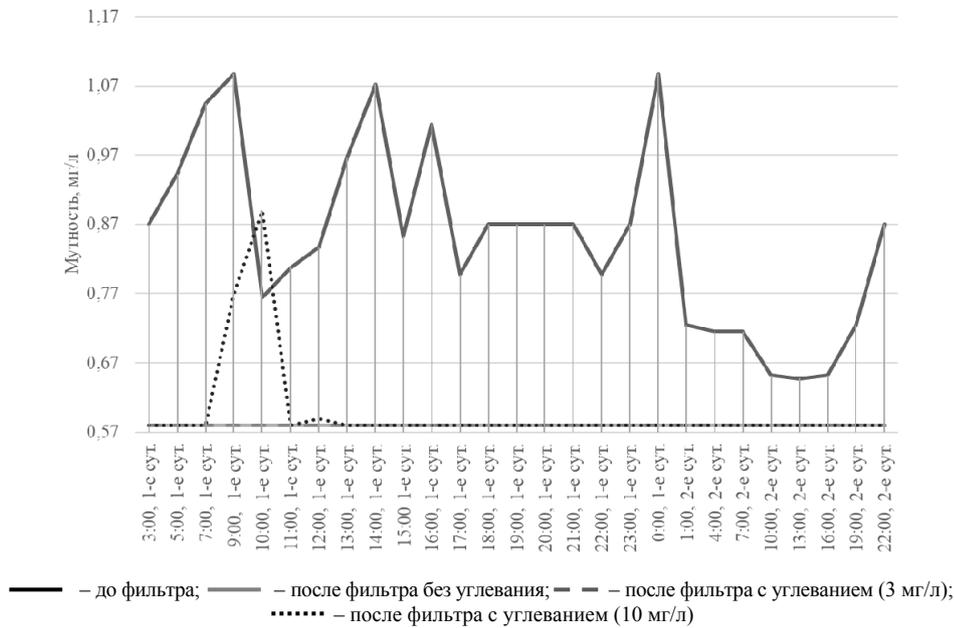


Рис. 3. Изменение показателя мутности в ходе эксперимента

Fig. 3. Change in turbidity index during the experiment

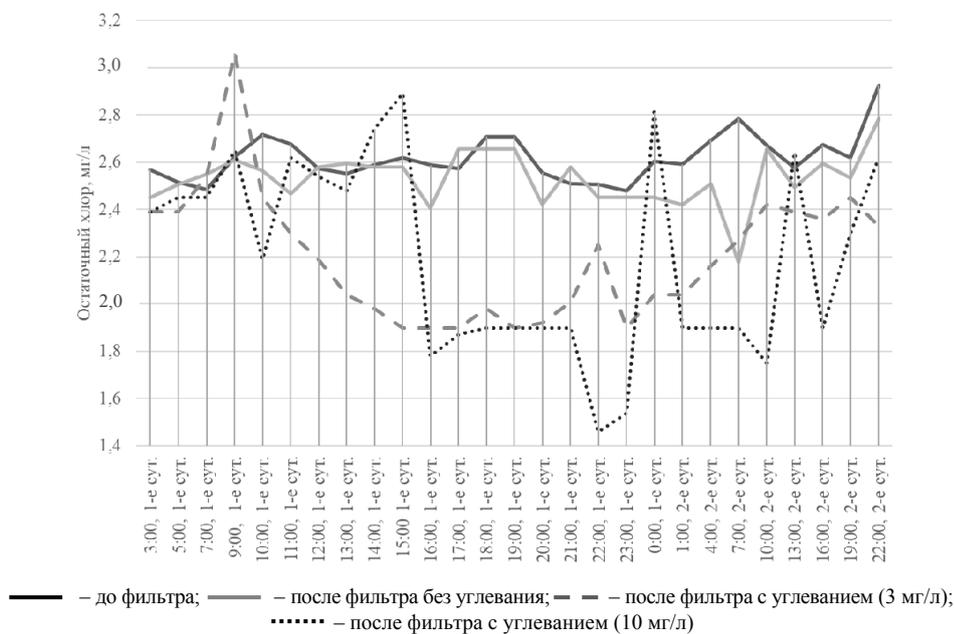


Рис. 4. Изменение значений остаточного хлора в ходе эксперимента

Fig. 4. Change in residual chlorine values during the experiment

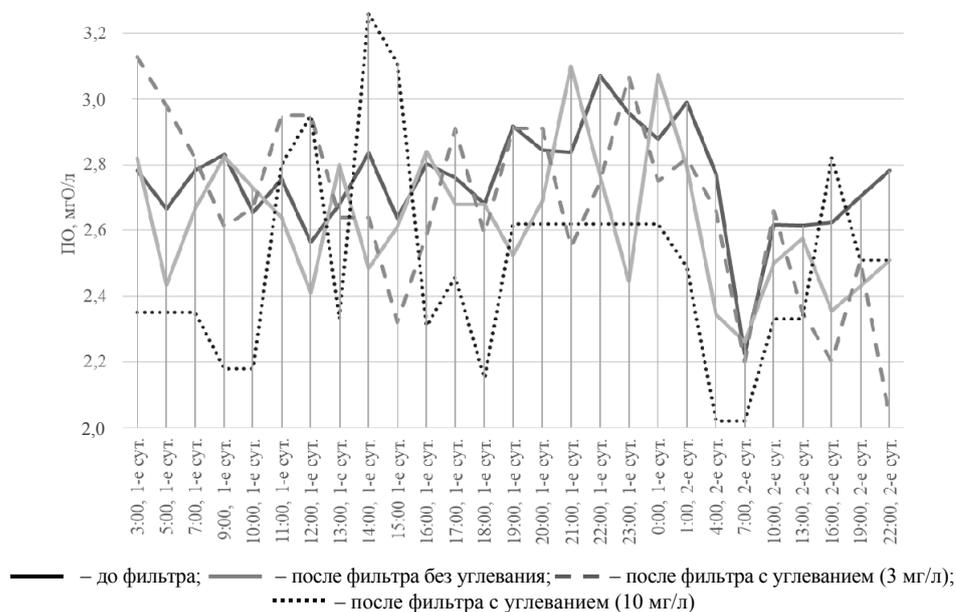


Рис. 5. Изменение значений перманганатной окисляемости в ходе эксперимента

Fig. 5. Change in permanganate oxidation values during the experiment

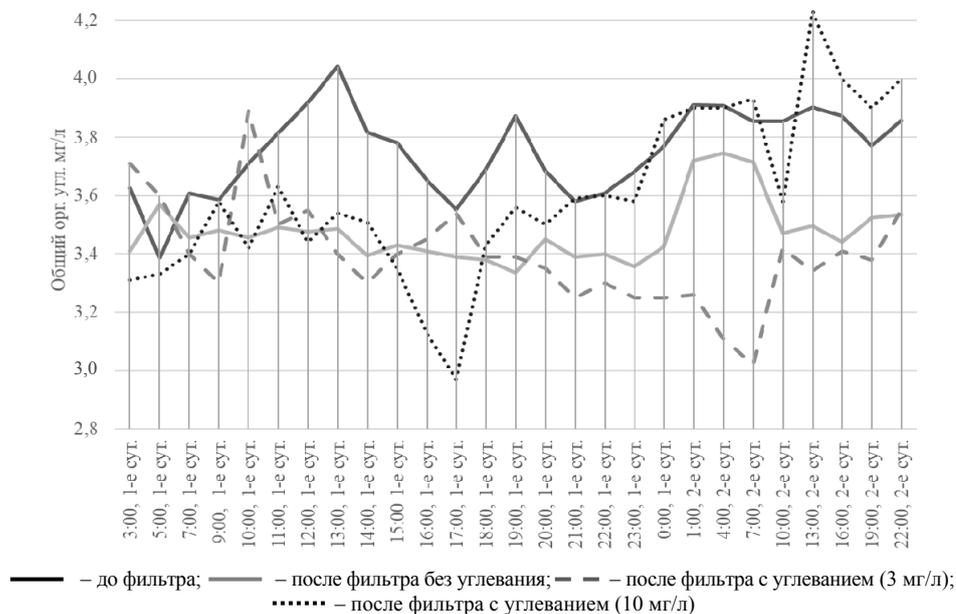


Рис. 6. Изменение значений общего органического углерода в ходе эксперимента

Fig. 6. Changes in total organic carbon values during the experiment

По завершении дозирования порошкообразного угольного сорбента в течение следующих 3–4 ч наблюдалось значительное снижение показателей цветности, перманганатной окисляемости и концентрации остаточного хлора. В течение часа после прекращения подачи угольной пульпы содер-

жание общего органического углерода оставалось на значительно низком уровне.

На основании полученных результатов разработаны технические решения модернизации действующей технологии, позволяющие контролировать уровень загрязнения питьевой воды различными органическими соединениями. В результате проведенных в промышленном масштабе экспериментов рекомендуются два интервала времени дозирования, напрямую зависящих от степени превышения фоновых концентраций органических веществ. В периоды, когда значения концентраций незначительно превышают допустимый уровень, предлагается использование метода углевания порошкообразным активированным углем ОУ-А дозировкой 10–15 мг/л с точкой ввода в смеситель. Рекомендуемая технологическая схема включает первичное озонирование воды дозировкой от 4 до 6 мг/л, последующее углевание порошкообразным активным углем концентрацией 10–15 мг/л, затем коагуляция и флокуляция с использованием реагентов «сульфат алюминия + ПАА» или «гидроксохлорид алюминия + ПАА», процесс отстаивания, применение механических фильтров и вторичное хлорирование с дозой 2–6 мг/л.

При высоком содержании органических соединений рекомендуется увеличить кратность обработки сорбционным материалом и предусмотреть две точки ввода угольной пульпы:

– первая – в смесителе, рекомендуемая доза 15–20 мг/л. Чем выше содержание органических соединений в исходной воде, тем больше доза вводимой угольной пульпы;

– вторая – перед фильтром. Так как большая часть органических соединений удаляется в отстойниках, дозу угольной пульпы для вторичной обработки рекомендуется снижать до значений 5–10 мг/л.

Технологическая схема с двукратной обработкой воды имеет последовательность: преаммонизация и первичное хлорирование, сорбционная обработка воды угольной пульпой (доза 15–20 мг/л), обработка химическими реагентами (коагулянт и флокулянт) с подачей в смесительную камеру отстойника, дозирование угольной пульпы на вход фильтра, фильтрация на механических фильтрах (загрузка – кварцевый песок), вторичное обеззараживание хлорсодержащими реагентами.

Дозировка сорбционного материала напрямую зависит от исходных показателей природной воды и уровня загрязненности. Технология и кратность обработки подбираются методом апробирования в реальных условиях с учетом рекомендаций экспериментальных исследований.

## **ВЫВОДЫ**

1. Технология углевания является перспективным методом улучшения показателей качества очистки природной воды. Установлено, что однократное дозирование угольной пульпы снижает такие показатели, как цветность, мутность, перманганатная окисляемость, содержание общего органического углерода. Эффективность применения данного метода зависит как от концентрации угольной пульпы, так и от частоты ее введения. Исследование полученных данных подтвердило, что при дозировке 3 мг/л наблюдается лишь снижение цветности, в то время как увеличение дозы до

10 мг/л приводит к уменьшению как цветности, так и перманганатной окисляемости, а также общего органического углерода. Эффект от углевания сохраняется на протяжении 4 ч после завершения введения угольной пульпы. Одним из недостатков данного подхода является уменьшение концентрации активного хлора в обработанной воде, что связано с использованием высокосорбционных материалов. Поэтому для обеспечения требуемых бактериологических характеристик необходимо дополнительно внедрить систему хлорирования или рассмотреть альтернативные методы дезинфекции.

2. В зависимости от водоисточника и начальных показателей качества природной воды подбор дозировки осуществляется экспериментальным путем с соблюдением рекомендации по выбору технологического процесса. Результаты испытаний показали, что при начальных высоких концентрациях органических веществ в воде эффект от углевания становится более заметным. Рекомендуется подключать дополнительную обработку в случаях, когда определенные параметры достигают критических значений: цветность превышает 20 град., мутность больше 20 мг/л, перманганатная окисляемость больше 10 мг О/л.

3. Метод углевания является экспресс-способом улучшения степени подготовки воды. Его эффективность зависит от сорбционной способности выбранного материала и его дозировки. Экспериментально подобранная дозировка может существенно снизить стоимость подготовки исходной воды. Проведенные исследования позволили расширить значения в области подготовки питьевой воды и определить ключевые показатели качества воды, на которые влияет метод углевания.

Результаты получены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения задания «Изучение процессов в гибридной энергетической установке топливный элемент – газовая турбина» (шифр проекта FZSW-2022-0001).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Решетняк, О. С. Многолетние и сезонные изменения развития фитопланктона и оценка состояния реки Ока в районе г. Дзержинск / О. С. Решетняк, Ю. С. Гришанова // *Вода: химия и экология*. 2016. № 3. С. 14–21.
2. Абрамова, Е. А. Оценка уровня антропогенной нагрузки на бассейн реки Оки в пределах Московской области / Е. А. Абрамова // *Вестник МГОУ. Сер. Естественные науки*. 2011. № 1. С. 77–83.
3. Никаноров, А. М. Пресноводные экосистемы в импактных районах России / А. М. Никаноров, В. А. Брызгало. Ростов-на-Дону: НОК, 2006. 275 с.
4. Никаноров, А. М. Реки России в условиях чрезвычайных экологических ситуаций / А. М. Никаноров, В. А. Брызгало, О. С. Решетняк. Ростов-на-Дону: НОК, 2012. 308 с.
5. Капанский, А. А. Энергоэффективность технологических систем водоснабжения и водоотведения и методы ее оценки / А. А. Капанский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 5. С. 436–451. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-436-451>.
6. Перспективы использования электромембранных технологий в энергетике / А. А. Филимонова [и др.] // *Труды Академэнерг*. 2020. № 2 (59). С. 55–76.
7. Ресурсосберегающая технология нейтрализации и очистки кислых и жестких высокоминерализованных жидких отходов ионитной водоподготовительной установки ТЭС / А. Ю. Власова [и др.] // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2017. № 2. С. 3–17.

8. Джалилов, М. Ф. О новой технологии подготовки горячей питьевой воды / М. Ф. Джа-лилов, М. М. Азимова, А. М. Джалилова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 5. С. 484–492. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-484-492.
9. Апробирование гибридной технологии с использованием порошкообразного сорбента для получения воды питьевого качества в периоды ухудшения показателей водоисточника / А. А. Филимонова [и др.] // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2024. № 17 (2). С. 148–161.
10. ГОСТ Р 52991–2008 / ISO 8245:1999. Вода. Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода. М.: ФГУП «Стандартинформ». 2010. 17 с.
11. ГОСТ Р 55684–2013 / ISO 8467:1993. Вода питьевая. Метод определения перманганатной окисляемости. М.: ФГУП «Стандартинформ». 2014. 16 с.
12. ГОСТ Р 55683-2013 / ISO 7393-3:1990 Вода питьевая. Метод определения содержания остаточного активного (общего) хлора на месте отбора проб. М.: ФГУП «Стандартинформ». 2019. 11 р.

Получена 24.04.2024 Подписана в печать 25.06.2024 Опубликована онлайн 30.09.2024

#### REFERENCES

1. Reshetnyak O. S., Grishanova Yu. S. (2016) Long-Term and Seasonal Changes in the Development of Phytoplankton and Assessment of the State of the Oka River in the Area of Dzerzhinsk. *Voda: Khimiya i Ekologiya = Water: Chemistry and Ecology*, (3), 14–21 (in Russian).
2. Abramova E. A. (2011) The Estimation of the Level of Anthropogenic Loading on the Oka Basin within the Moscow Region. *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Natural Sciences*, (1), 77–83 (in Russian).
3. Nikanorov A. M., Bryzgalo V. A. (2006) *Freshwater Ecosystems in Impact Areas of Russia*. Rostov-on-Don, NOC Publ. 275 (in Russian).
4. Nikanorov A. M., Bryzgalo V. A., Reshetnyak O. S. (2012) *Rivers of Russia in Conditions of Environmental Emergencies*. Rostov-on-Don, NOC Publ. 308 (in Russian).
5. Kapansky A. A. (2016) Energy Efficiency and Assessment Methods of Technological Systems of Water Supply and Water Disposal. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (5), 436–451. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-436-451> (in Russian).
6. Filimonova A. A., Chichirova N. D., Chichirov A. A., Minibaev A. I. (2020) Prospects of Using Electromembrane Technologies in Power Engineering. *Trudy Akademenergo = Transactions of Academenergo*, (2), 55–76 (in Russian).
7. Vlasova A. Yu., Chichirova N. D., Chichirov A. A., Filimonova A. A., Vlasov S. M. (2017) Resource-Saving Technology for Neutralization and Purification of Acidic and Hard-Concentrated, Liquid Waste of the Ion-Exchange Water Treatment Plant of TPPS Complex of Water for Drinkable Small Settlements. *Voda i Ekologiya: Problemy i Resheniya = Water and Ecology*, (2), 3–17 (in Russian).
8. Jalilov M. F., Azimova M. M., Jalilova A. M. (2017) On a New Technology of Preparation of Hot Drinking Water. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (5), 484–492. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-484-492 (in Russian).
9. Filimonova A. A., Vlasova A. Yu., Chichirova N. D., Kamaliev R. F. (2024) Testing of Hybrid Technology Using Powdered Sorbent to Obtain Drinking Quality Water During Periods of Deterioration in Water Source Indicators. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 17 (2), 148–161 (in Russian).
10. State Standard R 52991–2008 / ISO 8245:1999. *Water. Methods for Determining the Content of Total and Dissolved Organic Carbon*. Moscow, Standartinform Publ. 2010. 17 (in Russian).
11. State Standard R 55684–2013 / ISO 8467:1993. *Drinking Water. Method for Determining Permanganate Oxidizability*. Moscow, Standartinform Publ. 2014. 16 (in Russian).
12. State Standard R 55683–2013 / ISO 7393-3:1990. *Drinking Water. Method for Determining the Content of Residual Active (Total) Chlorine at the Sampling Site*. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 11 (in Russian).

Received: 24 April 2024

Accepted: 25 June 2024

Published online: 30 September 2024

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-452-470>

УДК 504.3.054

## Особенности углеродного регулирования в Республике Беларусь и Российской Федерации: сравнительный анализ и тенденции

О. А. Любчик<sup>1)</sup>, В. Е. Пинаев<sup>2)</sup>, В. Н. Ухова<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы  
(Москва, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** В статье рассмотрены международные акты в области противодействия изменению климата (Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата, Киотский протокол и Парижское соглашение), выявлены основные тренды в области углеродного регулирования: квотирование выбросов, реализация климатических проектов, введение отчетности по парниковым газам и расширение законодательной базы. Проведен сравнительный анализ национального законодательства, действующего на территории Республики Беларусь и Российской Федерации, рассмотрена его условная классификация с выделением применяемых в них инструментов углеродного регулирования: рыночных, ограничивающих, поддерживающих и вспомогательных. Регулирование выбросов парниковых газов должно включать широкий спектр мероприятий и не может сводиться исключительно к ограничивающим инструментам. К рыночным инструментам отнесены национальная система торговли выбросами, международные добровольные рынки и инструменты международной кооперации, к ограничивающим инструментам – введение углеродных налогов, квот, а также обязательной углеродной отчетности. Среди примеров поддерживающих инструментов отмечены субсидии, целевое финансирование и налоговые преференции, информационная политика. Вспомогательные инструменты включают методологии количественной оценки выбросов и поглощения парниковых газов, стандарты углеродной отчетности и инструменты верификации отчетности о выбросах парниковых газов, законодательно закрепленную возможность реализации климатических проектов. Рассмотрено нормативное национальное регулирование в части учета выбросов парниковых газов, обозначены категории источников выбросов и парниковые газы, выбросы которых подлежат учету. Важно отметить, что законодательство по парниковым газам в Республике Беларусь и Российской Федерации, как и во всем мире, не сформировано окончательно и находится в процессе становления.

**Ключевые слова:** углеродное регулирование, парниковые газы, сокращение выбросов, изменение климата, адаптация, климатическая повестка, климатическая стратегия, устойчивое развитие

**Для цитирования:** Любчик, О. А. Особенности углеродного регулирования в Республике Беларусь и Российской Федерации: сравнительный анализ и тенденции / О. А. Любчик, В. Е. Пинаев, В. Н. Ухова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 5. С. 452–470. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-452-470>

---

### Адрес для переписки

Любчик Ольга Андреевна  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-96-24  
[olga.liubchik@yandex.by](mailto:olga.liubchik@yandex.by)

### Address for correspondence

Liubchik Volha A.  
Belarusian National Technical University  
65/2, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-96-24  
[olga.liubchik@yandex.by](mailto:olga.liubchik@yandex.by)

---

## Features of Carbon Regulation in the Republic of Belarus and the Russian Federation: Comparative Analysis and Trends

V. A. Liubchyk<sup>1)</sup>, V. E. Pinaev<sup>2)</sup>, V. N. Ukhova<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba  
(Moscow, Russian Federation)

**Abstract.** The article reviews international acts in the field of combating climate change (United Nations Framework Convention on Climate Change, Kyoto Protocol and Paris Agreement), identifies the main trends in the field of carbon regulation: emissions quoting; implementation of climate projects; introduction of greenhouse gas reporting and expansion of the legislative framework. A comparative analysis of the national legislation in force in the Republic of Belarus and the Russian Federation is carried out, its conditional classification is considered with the allocation of carbon regulation instruments being applied, viz. the market ones, the restrictive ones, the supporting ones and the auxiliary ones. The regulation of greenhouse gas emissions should include a wide range of activities and cannot be reduced solely to restrictive instruments. Market instruments include the national emissions trading system, international voluntary markets and instruments of international cooperation, while restrictive instruments include the introduction of carbon taxes, quotas, and mandatory carbon reporting. Among the examples of supporting instruments subsidies, targeted financing and tax preferences, as well as information policy may be noted. Auxiliary instruments include methodologies for quantitative assessment of greenhouse gas emissions and uptake, carbon reporting standards and tools for verification of reporting on greenhouse gas emissions, legislated possibility of implementing climate projects. The normative national regulation regarding the accounting of greenhouse gas emissions is considered, the categories of emission sources and greenhouse gases whose emissions are subject to accounting are identified. It is important to note that the legislation on greenhouse gases in the Republic of Belarus and the Russian Federation, as well as around the world, has not been finalized and is in the process of formation.

**Keywords:** carbon regulation, greenhouse gases, emission reductions, climate change, adaptation, climate agenda, climate strategy, sustainable development

**For citation:** Liubchyk V. A., Pinaev V. E., Ukhova V. N. (2024) Features of Carbon Regulation in the Republic of Belarus and the Russian Federation: Comparative Analysis and Trends. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (5), 452–470. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-452-470> (in Russian)

### Введение

Углеродное регулирование в мире становится все более актуальной темой в условиях изменения климата. Все больше стран признают необходимость принятия мер для сокращения выбросов парниковых газов и разрабатывают новые механизмы углеродного регулирования [1].

Законодательство в области парниковых газов начало формироваться относительно недавно и не сформировано окончательно. Следует отметить, что законодательство по парниковым газам в Республике Беларусь и Российской Федерации, как и во всем мире, находится в процессе становления – нормативные документы изменяются [2].

Рассмотрим основные аспекты углеродного регулирования в Республике Беларусь и Российской Федерации. Углеродное регулирование на территории стран представлено широким спектром различных документов, как международных, так и национальных. Именно с ратификации международных документов и принятия на себя соответствующих обязательств начинается формирование национального углеродного регулирования, которое создано для достижения глобальных целей углеродной нейтральности [3].

### Международное регулирование в области изменения климата

Что касается международных актов, то важно отметить, что и Беларусь, и Россия подписали и ратифицировали Рамочную конвенцию Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН), Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата и Парижское соглашение (табл. 1).

Таблица 1

#### Ратификация международных документов в области изменения климата

#### Ratification of international documents related to climate change

| Республика Беларусь  | Российская Федерация   |
|--|--|
| Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата   |  |
| <i>Подписание:</i> 11 июня 1992 г.<br><i>Ратификация:</i> 10 апреля 2000 г.<br>(Указ Президента Республики Беларусь от 10 апреля 2000 г. № 177 «Об одобрении Рамочной конвенции ООН об изменении климата» [4])   | <i>Подписание:</i> 12 июня 1992 г.<br><i>Ратификация:</i> 4 ноября 1994 г.<br>(Федеральный закон от 04.11.1994 № 34-ФЗ «О ратификации Рамочной конвенции ООН об изменении климата» [5])  |
| Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата   |  |
| <i>Присоединение:</i> 12 августа 2005 г.<br>(Указ Президента Республики Беларусь от 12 августа 2005 г. № 370 «О присоединении Республики Беларусь к Киотскому протоколу к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата» [6]) | <i>Подписание:</i> 11 марта 1999 г.<br><i>Ратификация:</i> 4 ноября 2004 г.<br>(Федеральный закон от 04.11.2004 № 128-ФЗ «О ратификации Киотского протокола к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата» [7]) |
| Парижское соглашение   |  |
| <i>Подписание:</i> 22 апреля 2016 г.<br><i>Принятие:</i> 20 сентября 2016 г.<br>(Указ Президента Республики Беларусь № 345 «О принятии Международного договора» [8])   | <i>Подписание:</i> 22 апреля 2016 г.<br><i>Принятие:</i> 21 сентября 2019 г.<br>(постановление Правительства Российской Федерации от 21.09.2019 № 1228 «О принятии Парижского соглашения» [9])   |

На территории стран также действуют национальные стандарты в области парниковых газов, идентичные международному стандарту ISO. Наблюдаем поэтапное принятие нормативно-правовых актов, призванных

расширить функционал бизнеса и субъектов в части деятельности по сокращению выбросов парниковых газов. На данный момент в России возможна реализация климатических проектов, операции с углеродными единицами, существуют реестр углеродных единиц и национальная методология количественной оценки выбросов и поглощений парниковых газов, также проводится эксперимент по квотированию выбросов парниковых газов.

В будущем можно ожидать реализации таких трендов в области углеродного регулирования, как:

- расширение эксперимента по квотированию выбросов на другие регионы страны;
- разработка и утверждение методологий климатических проектов;
- введение обязательной верификации углеродной отчетности и формирование реестра аккредитованных органов валидации и верификации парниковых газов [10];
- появление национального стандарта нефинансовой отчетности, обязывающего бизнес раскрывать информацию о выбросах парниковых газов и климатических рисках по аналогии с международными стандартами GRI и IFRS S2;
- расширение законодательной базы в части рисков, связанных с изменением климата, в том числе разработка национальной методологии оценки климатических рисков.

### **Национальное регулирование в области изменения климата и его классификация**

Цель национального углеродного регулирования состоит в сокращении уровня выбросов парниковых газов на уровне страны [11].

В Республике Беларусь приняты следующие документы национального углеродного регулирования [12]:

- Закон Республики Беларусь от 26 ноября 1992 г. № 1982-ХІІ «Об охране окружающей среды» (Глава 7. Охрана озонового слоя. Регулирование воздействия на климат) [13]:
  - Статья 55. Охрана озонового слоя;
  - Статья 56. Обязанности юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, осуществляющих хозяйственную и иную деятельность, связанную с выбросами парниковых газов в атмосферный воздух;
  - Статья 57. Регулирование воздействия на климат.
- Национальный план действий по увеличению абсорбции поглотителями парниковых газов на период до 2030 г. [14];
- Стратегия адаптации лесного хозяйства Беларуси к изменению климата до 2050 г. [15];
- Национальный план действий по адаптации лесного хозяйства Беларуси к изменению климата до 2030 г. [16];
- Стратегия адаптации сельского хозяйства к изменению климата до 2050 г. [17].

В Российской Федерации основу национального законодательства в области парниковых газов составляют следующие документы национального углеродного регулирования:

- Указ Президента РФ от 26.10.2023 № 812 «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации» [18];
- Указ Президента Российской Федерации от 04.11.2020 № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов» [19];
- Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов»;
- Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. (распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р) [20];
- Федеральный закон «О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации» от 06.03.2022 № 34-ФЗ.

Существуют и другие документы, регламентирующие реализацию климатических проектов, порядок количественной оценки выбросов и поглощений парниковых газов, работу реестра углеродных единиц, операции с этими единицами и т. д.

Национальное углеродное регулирование можно условно классифицировать как рыночные инструменты, ограничивающие инструменты, поддерживающие инструменты и вспомогательные инструменты.

К *рыночным инструментам* относятся национальная система торговли выбросами, международные добровольные рынки (Verified Carbon Standard, Verra) и инструменты международной кооперации (Статья 6 Парижского соглашения).

В Республике Беларусь привлечению внимания к рыночным механизмам климатического финансирования способствовала реализация проекта ПРООН/ГЭФ «Наращивание потенциала для торговли выбросами парниковых газов и укрепление системы мониторинга, отчетности и верификации в Республике Беларусь», целью которого были их разработка и внедрение, а также создание системы мониторинга, отчетности и верификации выбросов парниковых газов [21].

С 2022 г. в России существует национальная система выпуска углеродных единиц, создан реестр углеродных единиц. Путь к получению углеродных единиц начинается с разработки климатического проекта, далее происходит валидация проекта и верификация сокращений, после этого происходит выпуск углеродных единиц в национальном реестре углеродных единиц. Полученные углеродные единицы можно продать, использовать для добровольного сокращения углеродного следа либо зачесть в рамках квоты Сахалинского эксперимента [22].

Статьей 6 Парижского соглашения [23] признается, что «стороны используют добровольное сотрудничество при осуществлении своих определяемых на национальном уровне вкладов, с тем чтобы создать возможности для повышения амбициозности своих действий по предотвращению

изменения климата и адаптации и поощрения устойчивого развития и экологической целостности».

Статья 6 устанавливает три подхода:

- Статья 6.2 обеспечивает основы учета международного сотрудничества. Это позволяет осуществлять международную передачу углеродных кредитов между странами.

- Статья 6.4 определяет централизованный механизм ООН для торговли кредитами за сокращение выбросов, полученными в рамках отдельных проектов.

- Статья 6.8 определяет рабочую программу для нерыночных подходов к смягчению последствий и адаптации [24].

*Ограничивающие инструменты* включают в себя введение углеродных налогов и квот, которые стимулируют компании ставить цели по сокращению выбросов и выполнять взятые на себя обязательства, введение обязательной углеродной отчетности [25].

В Беларуси с 26.04.2024 вступает в силу постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды от 28 марта 2024 г. № 8-Т, которым утверждены экологические нормы и правила (ЭкоНиП) «Охрана окружающей среды и природопользование. Климат. Требования (правила) количественного определения выбросов парниковых газов». Данный документ определяет категории источников и перечень парниковых газов для каждого источника, по которым предусмотрена отчетность (табл. 2) [26].

Таблица 2

**Категории источников выбросов и парниковые газы, подлежащие учету**

**Emission source categories and greenhouse gases to be accounted for**

| № п/п | Источник                            | Парниковый газ  |
|-------|-------------------------------------|---|
| 1     | Стационарное сжигание топлива       | Углекислый газ  |
| 2     | Сжигание на факельных установках    | Углекислый газ, метан   |
| 3     | Нефтепереработка                    | Углекислый газ, метан   |
| 4     | Металлургическое производство       | Углекислый газ  |
| 5     | Производство минеральных материалов | Углекислый газ  |
| 6     | Химическая промышленность           | Фторид серы (VI), трифторметан, углекислый газ, оксид азота (I) |
| 7     | Обращение с твердыми отходами       | Углекислый газ, оксид азота (I), метан                          |

В Российской Федерации перечень парниковых газов, подлежащих учету, регламентируется распоряжением Правительства РФ от 22.10.2021 № 2979-р «Об утверждении перечня парниковых газов, в отношении которых осуществляются государственный учет выбросов парниковых газов и ведение кадастра парниковых газов» [27] и содержит наименование парникового газа, химическую формулу и потенциал глобального потепления (на горизонте 100 лет).

Эксперимент по квотированию выбросов парниковых газов на территории Сахалинской области проводится с 1 сентября 2022 г. по 31 де-

кабря 2028 г. включительно и регламентируется Федеральным законом от 06.03.2022 № 34-ФЗ «О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации» [28]. Целью эксперимента является достижение углеродной нейтральности на территории субъекта. Для этого применяется стимулирование внедрения технологий сокращения выбросов парниковых газов и увеличения их поглощения, формируется система независимой верификации и создается система обращения углеродных единиц и единиц выполнения квоты [29]. Дополнительно хочется подчеркнуть важность внедрения стратегий энергоэффективности и создания новых мощностей возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – солнечных электростанций (СЭС) и ветряных электростанций (ВЭС) для декарбонизации энергетической отрасли [30].

В России введена обязательная отчетность о выбросах парниковых газов для регулируемых организаций, к которым относятся:

- юридические лица и индивидуальные предприниматели;
- организации, деятельность которых сопровождается годовыми выбросами парниковых газов массой 150 тысяч тонн СО-эквивалента и более, предоставляют отчеты о выбросах парниковых начиная с 1 января 2023 г., организации, деятельность которых сопровождается годовыми выбросами парниковых газов массой 50 тысяч тонн СО-эквивалента и более, – с 1 января 2025 г. [31];
- организации, деятельность которых соответствует производственным процессам и (или) видам хозяйственной и иной деятельности по перечню и показателям, указанным в приложении к постановлению Правительства Российской Федерации от 14.03.2022 № 355 «О критериях отнесения юридических лиц и индивидуальных предпринимателей к регулируемым организациям» [32].

Отчет предоставляется в Министерство экономического развития Российской Федерации ежегодно до 1 июля года, следующего за отчетным, в электронном виде через Интернет на сайте ГИС «ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ» [33] путем заполнения формы отчета в реестре выбросов парниковых газов. При этом расчет выбросов парниковых газов, представляемый в отчете, необходимо проводить по национальной методологии.

Важно подчеркнуть, что регулирование выбросов парниковых газов должно включать широкий спектр мероприятий и не может сводиться исключительно к ограничивающим инструментам.

*Поддерживающие инструменты* могут быть финансовые и нефинансовые. Примером финансовых поддерживающих инструментов являются субсидии, целевое финансирование и налоговые преференции, нефинансовых – внедрение новых технологий, поддержка НИОКР, информационная политика.

*Вспомогательные инструменты* представляют собой методологии количественной оценки выбросов и поглощений парниковых газов, стандарты углеродной отчетности и инструменты верификации отчетности

о выбросах парниковых газов, законодательно закреплённая возможность реализации климатических проектов.

Углеродный след включает в себя три категории выбросов – прямые (Охват 1), косвенные энергетические (Охват 2) и прочие косвенные (Охват 3) выбросы парниковых газов [34].

Охват 1, Охват 2 и Охват 3 были введены и определены в первом издании стандарта GHG Protocol в 2001 г. [35].

Охват 1 – прямые энергетические выбросы, связанные с собственной генерацией энергии, происходят из источников, принадлежащих компании или контролируемых ею. Примерами источников выбросов могут быть: непосредственно производственный процесс, сжигание топлива на стационарных энергетических источниках, потребление топлива корпоративным транспортом, эксплуатация системы охлаждения.

Охват 2 – косвенные энергетические выбросы, связанные с производством электроэнергии, теплоты или пара, закупаемых компанией.

Охват 3 – косвенные неэнергетические выбросы, связанные с осуществлением компанией хозяйственной и иной деятельности (выбросы, образующиеся при добыче (производстве) и транспортировке топлива, сырья, материалов, полуфабрикатов, а также выбросы от использования продукции и утилизации ее остатков).

В Республике Беларусь ЭкоНиП «Охрана окружающей среды и природопользование. Климат. Требования (правила) количественного определения выбросов парниковых газов» установлены требования количественного определения выбросов парниковых газов юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями для обеспечения производственного учета выбросов парниковых газов из источников и их абсорбции поглотителями. Постановление вступает в силу одновременно с Законом Республики Беларусь от 17 июля 2023 г. № 294-З «Об изменении Закона Республики Беларусь «Об охране окружающей среды» [36].

Также в Республике Беларусь существуют Технические кодексы установившейся практики (ТКП):

- ТКП 17.08-03–2006 (02120). Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосферный воздух. Выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферный воздух. Правила расчета выбросов механическими транспортными средствами в населенных пунктах [37];

- ТКП 17.08-11–2008 (02120). Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферный воздух. Правила расчета выбросов от животноводческих комплексов, звероферм и птицефабрик [38].

В России национальная методология количественной оценки выбросов парниковых газов существует для прямых и косвенных выбросов парниковых газов [39].

Прямые выбросы рассчитываются в соответствии с приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации

от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» [40]. Данный документ содержит описание методологии расчета, подробные формулы и коэффициенты выбросов для следующих категорий источников прямых выбросов парниковых газов: 1. Стационарное сжигание топлива; 2. Сжигание в факелах; 3. Фугитивные выбросы; 4. Нефтепереработка; 5. Производство кокса; 6. Производство цемента; 7. Производство извести; 8. Производство стекла; 9. Производство керамических изделий; 10. Производство аммиака; 11. Производство азотной кислоты, капролактама, глиоксаля и глиоксиловой кислоты; 12. Нефтехимическое производство; 13. Производство фторсодержащих веществ; 14. Черная металлургия; 15. Производство ферросплавов; 16. Производство первичного алюминия; 17. Прочие промышленные процессы; 18. Транспорт; 19. Дорожное хозяйство; 20. Захоронение твердых отходов; 21. Биологическая переработка твердых отходов; 22. Сжигание отходов; 23. Очистка и сброс сточных вод; 24. Выбросы закиси азота из сточных вод.

Количественная оценка косвенных энергетических выбросов парниковых газов по национальной методологии осуществляется в соответствии с приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 29.06.2017 № 330 «Об утверждении методических указаний по количественному определению объема косвенных энергетических выбросов парниковых газов» [41]. Документ представляет собой порядок количественного определения объема косвенных энергетических выбросов в организациях.

*Климатические проекты* подразделяются на проекты, которые обеспечивают сокращение выбросов парниковых газов, и проекты, направленные на увеличение их поглощения [42].

Основные требования к климатическим проектам изложены в приказе Минэкономразвития России от 11 мая 2022 г. № 248 «Об утверждении критериев и порядка отнесения проектов, реализуемых юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями или физическими лицами, к климатическим проектам, формы и порядка представления отчета о реализации климатического проекта» [43]. Также данный документ содержит форму отчета о реализации климатического проекта. Правила верификации результатов реализации климатических проектов представлены в постановлении Правительства Российской Федерации от 24.03.2022 № 455 «Об утверждении Правил верификации результатов реализации климатических проектов» [44].

Реализация климатических проектов позволяет получить углеродные единицы, с которыми впоследствии можно проводить операции на бирже [45]. На текущий момент в российском реестре углеродных единиц зарегистрированы 23 климатических проекта, в том числе проекты, связанные с повышением энергоэффективности и модернизацией оборудования энергетическими компаниями. Могут быть эффективны и другие про-

екты, например связанные с переходом на альтернативные виды топлива [46].

В Республике Беларусь на национальном уровне пока недоступно проведение операций с углеродными единицами. В связи с этим прогрессивные компании делают попытки проведения таких операций на международных рынках.

*Аккредитация органов валидации и верификации парниковых газов (ОВВПГ)* возможна в национальной системе аккредитации. Целью аккредитации ОВВПГ является подтверждение их компетентности, профессионализма и соответствия требованиям стандартов. Аккредитованные органы по валидации и верификации парниковых газов осуществляют верификацию углеродной отчетности и валидацию результатов климатических проектов. Аккредитация ОВВПГ регламентируется Федеральным законом от 28.12.2013 № 412-ФЗ «Об аккредитации в национальной системе аккредитации» [47] и приказом Министерства экономического развития Российской Федерации от 26.10.2020 г. № 707 «Об утверждении критериев аккредитации и перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации» [48].

Результаты анализа существующих инструментов углеродного регулирования в Республике Беларусь и Российской Федерации представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Мэппинг инструментов углеродного регулирования  
и нормативно-правовых актов в Республике Беларусь и Российской Федерации**

**Mapping of carbon management instruments and regulations  
in the Republic of Belarus and the Russian Federation**

| Республика Беларусь  | Российская Федерация  |
|--|---|
| Рыночные инструменты   |   |
| Не представлены  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Национальная система торговли выбросами;</i></li> <li>• <i>Реестр углеродных единиц</i> <a href="https://carbonreg.ru">https://carbonreg.ru</a> (постановление Правительства РФ от 30.04.2022 № 790 «Об утверждении Правил создания и ведения реестра углеродных единиц, а также проведения операций с углеродными единицами в реестре углеродных единиц»)</li> </ul>                                 |
| Ограничивающие инструменты   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Закон Республики Беларусь от 26 ноября 1992 г. № 1982-ХІІ «Об охране окружающей среды» (Глава 7. Охрана озонового слоя. Регулирование воздействия на климат)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Сахалинский эксперимент</i> (Федеральный закон от 06.03.2022 № 34-ФЗ «О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации»);</li> <li>• <i>Обязательная отчетность о выбросах парниковых газов для регулируемых организаций</i> (Федеральный закон от 02.07.2021 «296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов», статья 14);</li> </ul> |

Окончание табл. 3  
Ending of Table 3

| Республика Беларусь   | Российская Федерация  |
|---|---|
| Поддерживающие инструменты  |   |
| Законодательно не регулируются  | Законодательно не регулируются  |
| Вспомогательные инструменты   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Экологические нормы и правила (ЭкоНиП) 17.09.08-001–2024 «Охрана окружающей среды и природопользование. Климат. Требования (правила) количественного определения выбросов парниковых газов»</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Национальная методология количественной оценки выбросов парниковых газов</i> (приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» и приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 29.06.2017 № 330 «Об утверждении методических указаний по количественному определению объема косвенных энергетических выбросов парниковых газов»);</li> <li>• <i>Климатические проекты</i> (приказ Минэкономразвития России от 11 мая 2022 г. № 248 «Об утверждении критериев и порядка отнесения проектов, реализуемых юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями или физическими лицами, к климатическим проектам, формы и порядка представления отчета о реализации климатического проекта»; постановление Правительства Российской Федерации от 24.03.2022 № 455 «Об утверждении Правил верификации результатов реализации климатических проектов»);</li> <li>• <i>Аккредитация органов валидации и верификации парниковых газов (ОВВП)</i> (Федеральный Закон от 28.12.2013 № 412-ФЗ «Об аккредитации в национальной системе аккредитации»; приказ Министерства экономического развития Российской Федерации от 26.10.2020 № 707 «Об утверждении критериев аккредитации и перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации»)</li> </ul> |

### ВЫВОДЫ

1. Республика Беларусь и Российская Федерация полностью поддерживают мировую повестку в отношении сокращения выбросов парниковых газов и минимизации изменения климата и его последствий. Ратифицированы Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата и Киотский протокол к ней, подписано Парижское соглашение. Обе страны на национальном уровне принимают нормативные правовые акты в области углеродного регулирования, разрабатывают национальные стандарты в области парниковых газов, идентичные международному стандарту ISO.

2. В настоящий момент в Российской Федерации имеется большой набор инструментов для мотивации сокращения выбросов, который представлен возможностью торговли углеродными единицами на национальных рынках, признания реализуемых на предприятиях проектов климатическими, наличием возможности аккредитации органов валидации и верификации парниковых газов, чего пока нет в Республике Беларусь. Несмотря на это, в Республике Беларусь, так же как и в Российской Федерации, имеется законодательство в области охраны окружающей среды, методика количественной оценки выбросов парниковых газов, обязательный учет выбросов парниковых газов рядом источников их выбросов и другие инструменты углеродного регулирования. Обе страны имеют цели по сокращению выбросов парниковых газов и обновляют свои нормативно-правовые акты для достижения этих целей.

3. Законодательство по парниковым газам в Республике Беларусь и Российской Федерации, как и во всем мире, не сформировано окончательно и находится в процессе становления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пинаев, В. Е. Органы по валидации и верификации парниковых газов в России и Китае – новая реальность. Особенности аккредитации органов и подготовки специалистов в России [Электронный ресурс] / В. Е. Пинаев, С. Чжан, Т. Н. Ледацева // Отходы и ресурсы. 2023. Т. 10, № 1. Режим доступа: <https://resources.today/PDF/30ECOR123.pdf>. Дата доступа: 02.05.2024. <https://doi.org/10.15862/30ECOR123>.
2. Кучихин, Ю. А. Углеродное регулирование в России: стратегии по трансграничному регулированию в ЕС / Ю. А. Кучихин // Государственное управление и развитие России: глобальные тренды и национальные перспективы: сб. статей Междунар. конференц-сессии, Москва, 16 мая 2022 г. – 20 мая 2023 г. М.: Изд. дом «Научная библиотека», 2023. Т. II. С. 847–853.
3. Павленко, С. П. Переход к углеродной нейтральности: миф или реальность? Правовые основы углеродного регулирования в России и Европе / С. П. Павленко // Конференция молодых ученых «Правовое регулирование деятельности топливно-энергетического комплекса в современных условиях»: сб. науч. тр. конф., Москва, 22 окт. 2021 г. / сост.: С. Н. Рожнов, С. И. Конев; отв. ред. В. Г. Мартынов. М.: Рос. гос. ун-т нефти и газа имени И. М. Губкина, 2021. С. 261–265.
4. Об одобрении Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата [Электронный ресурс]: Указ Президента Респ. Беларусь, 10 апр. 2000 г., № 177. Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=p30000177>. Дата доступа: 02.05.2024.
5. О ратификации Рамочной конвенции ООН об изменении климата [Электронный ресурс]: Федеральный закон, 4 нояб. 1994 г., № 34-ФЗ. Режим доступа: <http://www.krem lin.ru/acts/bank/7188>. Дата доступа: 02.05.2024.
6. О присоединении Республики Беларусь к Киотскому протоколу к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата [Электронный ресурс]: Указ Президента Респ. Беларусь, 12 авг. 2005 г., № 370. Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=P30500370>. Дата доступа: 02.05.2024.
7. О ратификации Киотского протокола к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата [Электронный ресурс]: Федеральный закон, 4 нояб.

- 2004 г., № 128-ФЗ. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/21599>. Дата доступа: 02.05.2024.
8. О принятии международного договора [Электронный ресурс]: Указ Президента Респ. Беларусь, 20 сент. 2016 г., № 345. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=P31600345>. Дата доступа: 02.05.2024.
  9. О принятии Парижского соглашения [Электронный ресурс]: постановление Правительства Российской Федерации, 21 сент. 2019 г., № 1228. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201909240028>. Дата доступа: 02.05.2024.
  10. Пинаев, В. Е. Требования к документации и анализ существующей практики подготовки документов для создания и функционирования органа по валидации и верификации парниковых газов / В. Е. Пинаев, В. Н. Ухова. М.: Мир науки, 2024. 172 с. <https://doi.org/10.15862/01mnpu24>.
  11. Ухова, В. Н. Обзор актуального законодательства в области национального углеродного регулирования [Электронный ресурс] / В. Н. Ухова, В. Е. Пинаев // Garant Science Discussion Board on Legal, Accounting and Auditing. 2023. Вып. 1. Режим доступа: <https://base.garant.ru/77029762>.
  12. Любчик, О. А. Декарбонизация энергетического сектора: разработка Калькулятора сокращения выбросов парниковых газов. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2023. № 2. С. 87–95. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-87-95>.
  13. Об охране окружающей среды [Электронный ресурс]: Закон Респ. Беларусь, 26 нояб. 1992 г., № 1982-XII. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=v19201982>. Дата доступа: 02.05.2024.
  14. Национальный план действий по увеличению абсорбции парниковых газов поглотителями на период до 2030 года [Электронный ресурс]: постановление коллегии Министерства лесного хозяйства Респ. Беларусь, 05 дек. 2019 г. Режим доступа: <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/1-Minleshoz-Nats.-plan-po-absorbtsii-1-2.pdf>. Дата доступа: 02.05.2024.
  15. Постановление коллегии Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь от 05 декабря 2019 г. «Стратегия адаптации лесного хозяйства Беларуси к изменению климата до 2050 года» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/2-Minleshoz-Strategija-adaptatsii-1-x.pdf>. Дата доступа: 02.05.2024.
  16. Национальный план действий по адаптации лесного хозяйства Беларуси к изменению климата до 2030 г. [Электронный ресурс]: постановление коллегии Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь, 05 дек. 2019 г. Режим доступа: <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/3-Minleshoz-Nats.-plan-po-adaptatsii.pdf>. Дата доступа: 02.05.2024.
  17. Стратегия адаптации сельского хозяйства Беларуси к изменению климата [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/4-Minselxozprod-Strategija-adaptatsii-s-x.pdf>. Дата доступа: 02.05.2024.
  18. Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации [Электронный ресурс]: Указ Президента Российской Федерации, 26 окт. 2023 г., № 812. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310260009>. Дата доступа: 02.05.2024.
  19. О сокращении выбросов парниковых газов [Электронный ресурс]: Указ Президента Российской Федерации, 04 нояб. 2020 г., № 666. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202011040008>. Дата доступа: 02.05.2024.
  20. Об утверждении стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года [Электронный ресурс]: распоряжение Правительства РФ, 29 окт. 2021 г., № 3052-р. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzpfWO32e2yA0BhtlpyzWfHaiUa.pdf>. Дата доступа: 02.05.2024.
  21. Выступление на семинаре по внедрению системы торговли выбросами в Республике Беларусь [Электронный ресурс] // Республиканское научно-исследовательское унитарное предприятие «Бел НИЦ «Экология». Режим доступа: <https://www.ecoinfo.by/post/10180.html>. Дата доступа: 02.05.2024.
  22. Маяков, М. А. Влияние Сахалинского эксперимента на продвижение концепции устойчивого развития в РФ / М. А. Маяков // Актуальные проблемы общества, экономики

- и права в контексте глобальных вызовов: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Орел, 19 апр. 2023 г. Орел: Картуш, 2023. С. 61–65.
23. Парижское соглашение [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://unfccc.int/sites/default/files/russian\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf). Дата доступа: 02.05.2024.
  24. Фрикано, Ф. Возможные подходы к сотрудничеству в рамках Статьи 6 Парижского соглашения [Электронный ресурс]: Седьмая Конференция высокого уровня ЕС-Центральная Азия, Рим, 22–24 февр. 2023 г. / Ф. Фрикано. Режим доступа: <https://wecoop.eu/wp-content/uploads/2023/01/Session-5-Pres-1-Federica-Fricano-MASE-RU.pdf>. Дата доступа: 04.05.2024.
  25. Александрова, Ж. П. Достижение углеродной нейтральности путем внедрения инструментов налогообложения / Ж. П. Александрова, С. А. Кат // Кронос. 2022. Т. 6, № 10 (72). С. 92–95.
  26. Правила расчета выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность [Электронный ресурс]: ТКП-17.09-06-2022 (33140). Минск: Минприроды, 2023. Режим доступа: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2023/03/3-ТКП-17.09-06-2022.pdf>. Дата доступа: 04.05.2024.
  27. Перечень парниковых газов, в отношении которых осуществляется государственный учет выбросов парниковых газов и ведение кадастра парниковых газов [Электронный ресурс]: распоряжение Правительства Российской Федерации, 22 окт. 2021 г., № 2979-р. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202110260021>. Дата доступа: 02.05.2024.
  28. О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации [Электронный ресурс]: Федеральный закон, 06 марта 2022 г., № 34-ФЗ. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202203060003>. Дата доступа: 02.05.2024.
  29. Ситников, С. Л. Некоторые аспекты углеродного ценообразования и его особенности / С. Л. Ситников // Вестник Университета имени О. Е. Кутафина. 2023. № 9 (109). С. 188–198. <https://doi.org/10.17803/2311-5998.2023.109.9.188-198>
  30. Стратегия производства электрической и тепловой энергии в условиях ограниченного количества топлива / В. С. Кузеванов [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 3. С. 273–288. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-273-288>. Дата доступа: 20.04.2024.
  31. Об ограничении выбросов парниковых газов [Электронный ресурс]: Федеральный закон, 02 июля 2021 г., № 296-ФЗ. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031>. Дата доступа: 02.05.2024.
  32. О критериях отнесения юридических лиц и индивидуальных предпринимателей к регулируемым организациям [Электронный ресурс]: постановление Правительства Российской Федерации, 14 марта 2022 г., № 355. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202203150019>. Дата доступа: 02.05.2024.
  33. Реестр выбросов парниковых газов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://co2.gisee.ru>. Дата доступа: 06.05.2024.
  34. Лукерьянова, А. В. Углеродный след: международный и российский опыт сокращения / А. В. Лукерьянова // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. № 5–4 (80). С. 11–14.
  35. A Corporate Accounting and Reporting Standard [Electronic resource]. Mode of access: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>. Date of access: 02.05.2024.
  36. Об изменении Закона Республики Беларусь «Об охране окружающей среды» [Электронный ресурс]: Закон Республики Беларусь, 17 июля 2023 г., № 294-З. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=H12300294>. Дата доступа: 02.05.2024.
  37. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферный воздух. Правила расчета выбросов механическими транспортными средствами в населенных пунктах [Электронный ресурс]:

- ТКП 17.08-03-2006 (02120). Минск: Минприроды, 2006. Режим доступа: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2022/07/17.08-03-2006.pdf>. Дата доступа: 02.05.2024.
38. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферный воздух. Правила расчета выбросов от животноводческих комплексов, звероферм и птицефабрик [Электронный ресурс]: ТКП 17.08-11-2008 (02120). Минск: Минприроды, 2008. Режим доступа: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2022/07/17.08-11-2008.pdf>. Дата доступа: 02.05.2024.
39. Марфина, Е. А. Основы количественной оценки выбросов парниковых газов / Е. А. Марфина // Форум СНИПИ: сб. тез. докл. науч.-техн. форума ООО «СамараНИПИнефть», Самара, 20–29 сент. 2021 г. Самара: ООО «Портал инноваций», 2021. С. 139–140.
40. Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов [Электронный ресурс]: приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 27 мая 2022 г., № 371. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034>. Дата доступа: 02.05.2024.
41. Об утверждении методических указаний по количественному определению объема косвенных энергетических выбросов парниковых газов [Электронный ресурс]: приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 29 июня 2017 г., № 330. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201710230028?usclid=lgvxetnzru432991376>. Дата доступа: 02.05.2024.
42. Пинаев, В. Е. Направления, опыт и перспективы реализации климатических проектов в России [Электронный ресурс] / В. Е. Пинаев, В. Н. Ухова, Т. Н. Ледашева // Отходы и ресурсы. 2023. Т. 10. № 2. Режим доступа: <https://resources.today/PDF/17ECOR223.pdf>. <https://doi.org/10.15862/17ecor22>.
43. Об утверждении критериев и порядка отнесения проектов, реализуемых юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями или физическими лицами, к климатическим проектам, формы и порядка представления отчета о реализации климатического проекта [Электронный ресурс]: приказ Минэкономразвития России, 11 мая 2022 г. № 248. Режим доступа: [https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/prikaz\\_minekonomrazvitiya\\_rossii\\_ot\\_11\\_maya\\_2022\\_g\\_248.html](https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/prikaz_minekonomrazvitiya_rossii_ot_11_maya_2022_g_248.html). Дата доступа: 02.05.2024.
44. Об утверждении Правил верификации результатов реализации климатических проектов [Электронный ресурс]: постановление Правительства Российской Федерации, 24 марта 2022, № 455. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202203250027>. Дата доступа: 02.05.2024.
45. Любчик, О. А. Развитие возобновляемой и ядерной энергетики как направление снижения выбросов парниковых газов и обеспечения экологической безопасности / О. А. Любчик, Г. В. Бельская, Н. Г. Малькевич // Сахаровские чтения 2023 г.: экологические проблемы XXI века: материалы 23-й Междунар. науч. конф., 18–19 мая 2023 г., г. Минск. Минск: ИВЦ Минфина, 2023. Ч. 1. С. 52–55.
46. Оценка возможности перевода энергетических котлов на альтернативные твердые топлива путем моделирования процессов горения / В. Б. Прохоров [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 6. С. 536–551. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-536-551>.
47. Об аккредитации в национальной системе аккредитации [Электронный ресурс]: Федеральный закон, 28 дек. 2013 г., № 412-ФЗ. Режим доступа: <https://fsa.gov.ru/documents/5328/>. Дата доступа: 02.05.2024.
48. Об утверждении критериев аккредитации и перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации [Электронный ресурс]: приказ Министерства экономического развития Российской Федерации, 26 окт. 2020 г., № 707. Режим доступа: <https://fsa.gov.ru/documents/15721/>. Дата доступа: 02.05.2024.

## REFERENCES

1. Pinaev V. E., Zhang X., Ledashcheva T. N. (2023) Greenhouse Gas Validation and Verification Bodies in Russia and China — New Reality. Features of Bodies Accreditation and Training of Specialists in Russia. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*, 10 (1). Available at: <https://resources.today/PDF/30ECOR123.pdf>. <https://doi.org/10.15862/30ECOR123> (in Russian).
2. Kuchikhin Yu. A. (2023) Carbon Regulation in Russia: Strategies for Cross-Border Regulation in the EU. *Gosudarstvennoe upravlenie i razvitie Rossii: global'nye trendy i natsional'nye perspektivy: sb. statei Mezhdunar. konferents-sessii, Moskva, 16 maya 2022 g. – 20 maya 2023 g. T. II* [Public Administration and Development of Russia: Global Trends and National Prospects: Collection of Articles of the International Conference Session, Moscow, May 16, 2022 – May 20, 2023. Vol. II.] Moscow, “Scientific Library” Publishing House, 847–853 (in Russian).
3. Pavlenko S. P. (2021) Transition to Carbon Neutrality: Myth or Reality? Legal Bases of Carbon Regulation in Russia and Europe. *Konferentsiya molodykh uchenykh «Pravovoe regulirovanie deyatel'nosti toplivno-energeticheskogo kompleksa v sovremennykh usloviyakh»: Sb. nauch. tr. konf., Moskva, 22 okt. 2021 g.* [Conference of Young Scientists “Legal Regulation of Fuel and Energy Complex in Modern Conditions”: Collection of Scientific Papers of the Conference. Moscow, October 22, 2021]. Moscow, Russian State University of Oil and Gas (Gubkin National Research University), 261–265 (in Russian).
4. *On Approval of the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Decree of the President of the Republic of Belarus of April 10, 2000 No 177. Available at: <https://etalonline.by/document/?regnum=p30000177> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
5. *On Ratification of the UN Framework Convention on Climate Change*. Federal Law of November 4, 1994 N 34–FZ. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/7188> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
6. *On the Accession of the Republic of Belarus to the Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Decree of the President of the Republic of Belarus of August 12, 2005 N 370. Available at: <https://etalonline.by/document/?regnum=P30500370> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
7. *On Ratification of the Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Federal Law of November 4, 2004 No 128–FZ. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/21599> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
8. *On the Adoption of an International Treaty*. Decree of the President of the Republic of Belarus of September 20, 2016. No 345. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=P31600345> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
9. *On the Adoption of the Paris*. Agreement Resolution of the Government of the Russian Federation of September 21, 2019 No 1228. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201909240028> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
10. Pinaev V. E., Ukhova V. N. (2024) *Requirements for Documentation and Analysis of the Existing Practice of Document Preparation for the Establishing and Functioning of the Body for Validation and Verification of Greenhouse Gases*. Moscow, Mir nauki Publ. 172 (in Russian). <https://doi.org/10.15862/01mnnpu24> (in Russian.)
11. Ukhova V. N., Pinaev V. E. Review of Current Legislation in the Field of National Carbon Regulation. *Garant Science Discussion Board on Legal, Accounting and Auditing*, 2023, No 1. Available at: <https://base.garant.ru/77029762/> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
12. Liubchik V. (2023) Energy Sector Decarbonization: Avoided Greenhouse Gas Emissions Calculator developing. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*, (2), 87–95 (in Russian). <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-87-95>.

13. *On Environmental Protection*. Law of the Republic of Belarus of November 26, 1992 No 1982-XII. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=v19201982> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
14. *National Action Plan to Increase the Absorption of Greenhouse Gases by Sinks for the Period up to 2030*. Resolution of the Board of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus of December 05, 2019. Available at: <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/1-Minlesxoz-Nats.-plan-po-absorbtsii-1-2.pdf> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
15. *Strategy of Adaptation of Forestry in Belarus to Climate Change until 2050*. Resolution of the Board of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus of December 05, 2019. Available at: <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/2-Minlesxoz-Strategija-adaptatsii-1-x.pdf> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
16. *National Action Plan on Adaptation of Forestry of Belarus to Climate Change until 2030*. Resolution of the Board of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus of December 05, 2019. Available at: <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/3-Minlesxoz-Nats.-plan-po-adaptatsii.pdf> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
17. *Strategy of Adaptation of Belarusian Agriculture to Climate Change*. Available at: <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/4-Minselxozprod-Strategija-adaptatsii-s-x.pdf> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
18. *On Approval of the Climate Doctrine of the Russian Federation*. Decree of the President of the Russian Federation of October 26, 2023 No 812. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310260009> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
19. *On Reducing Greenhouse Gas Emissions*. Decree of the President of the Russian Federation of November 04, 2020 No 666. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202011040008> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
20. *On Approval of the Strategy of Socio-Economic Development of the Russian Federation with Low Greenhouse Gas Emissions until 2050*. Order of the Government of the Russian Federation of October 29, 2021 No 3052-r. Available at: <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtlpyzWfHaiUa.pdf> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
21. Presentation at the Seminar on the Implementation of the Emissions Trading System in the Republic of Belarus. Republican scientific research unitary enterprise “Bel SIC “Ecology”. Available at: <https://www.ecoinfo.by/post/10180.html> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
22. Mayakov M. A. (2023) The Impact of the Sakhalin Experiment on the Promotion of the Concept of Sustainable Development in the Russian Federation. *Aktual'nye problemy obshchestva, ekonomiki i prava v kontekste global'nykh vyzovov: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Orel, 19 apr. 2023 g.* Orel, Kartush Publ., 61–65 (in Russian).
23. *Paris Agreement*. Available at: [https://unfccc.int/sites/default/files/russian\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf) (accessed 02 May 2024) (in Russian).
24. Frikano F. (2023) Possible Approaches to Cooperation under Article 6 of the Paris Agreement. Seventh High-Level EU-Central Asia Conference, Rome, February 22-24, 2023. Available at: <https://wecoop.eu/wp-content/uploads/2023/01/Session-5-Pres-1-Federica-Fricano-MASE-RU.pdf> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
25. Aleksandrova J. P., Kat S. A. (2022) Achieving Carbon Neutrality Through the Implementation of Taxation Tools. *Kronos*, 6 (10), 92–95 (in Russian).
26. TKP-17.09-06–2022 (33140). *Rules for Calculation of Greenhouse Gas Emissions by Organizations Engaged in Economic and Other Activities*. Minsk, Minprirody, 2023. Available at: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2023/03/3-TKP-17.09-06-2022.pdf> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
27. The list of Greenhouse Gases for which the State Accounting of Greenhouse Gas Emissions and the Maintenance of a Greenhouse Gas Inventory Is Carried out. Order of the Government of the Russian Federation of 22.10.2021 № 2979-r. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202110260021> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
28. *On Conducting an Experiment to Limit Greenhouse Gas Emissions in Certain Subjects of the Russian Federation*. Federal Law of March 06, 2022 No 34-FZ. Available at: <http://pub>

- lication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202203060003 (accessed 02 May 2024) (in Russian).
29. Sitnikov S. L. (2023) Certain Aspects of Carbon Pricing and its Peculiarities. *Courier of Kutafin Moscow State Law University (MSAL)*, (9), 188–198. <https://doi.org/10.17803/2311-5998.2023.109.9.188-198> (in Russian).
  30. Kuzevanov V. S., Zakozhurnikov S. S., Zakozhurnikova G. S., Kaverin A. A. (2023) Electrical and Heat Energy Production Strategy in Conditions of Limited Amount of Fuel. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (3), 273–288. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-273-288> (in Russian).
  31. *On Limiting Greenhouse Gas Emissions*. Federal Law of July 02, 2021 No 296-FZ. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
  32. *On Criteria for Attributing Legal Entities and Individual Entrepreneurs to Regulated Organizations*. Resolution of the Government of the Russian Federation of March 14, 2022, No 355. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202203150019> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
  33. *Register of Greenhouse Gas Emissions*. Available at: <https://co2.gisee.ru> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
  34. Lukeryanova A. V. (2023) Carbon Footprint: International and Russian Experience in Reduction. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, (5–4), 11–14 (in Russian).
  35. *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*. Available at: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf> (accessed 02 May 2024).
  36. *On Amendments to the Law of the Republic of Belarus*. On Environmental Protection Law of the Republic of Belarus of July 17, 2023 No 294-Z. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=H12300294> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
  37. TKP 17.08-03–2006 (02120). *Environmental Protection and Nature Management. Atmosphere. Emissions of Pollutants and Greenhouse Gases into Atmospheric Air. Rules for Calculation of Emissions by Motor Vehicles in Populated Areas*. Minsk, Minprirody, 2006. Available at: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2022/07/17.08-03-2006.pdf> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
  38. TKP 17.08-11–2008 (02120). *Environmental Protection and Nature Management. Atmosphere. Emissions of Pollutants and Greenhouse Gases into Atmospheric Air. Rules for Calculating Emissions from Livestock Complexes, Fur Farms and Poultry Farms*. Minsk, Minprirody, 2008. Available at: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2022/07/17.08-11-2008.pdf> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
  39. Marfina E. A. (2021) Fundamentals of Quantitative Assessment of Greenhouse Gas Emissions. *Forum SNIPI: sb. tez. dokl. nauch.-tekhn. foruma OOO «SamaraNIPIneft'», Samara, 20–29 Sent. 2021 g.* [SRDI Forum: Collection of Abstracts of Scientific and Technical Forum of LLC “SamaraNIPIneft”, Samara, September 20–29, 2021]. Samara, LLC “Portal of Innovations”, 139–140 (in Russian).
  40. *On Approval of Methods for Quantitative Determination of Greenhouse Gas Emissions and Greenhouse Gas Absorptions*. Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation of May 27, 2022 No 371. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
  41. *On approval of methodological guidelines for quantitative determination of the volume of indirect energy emissions of greenhouse gases*. Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation of June 29, 2017. No 330. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201710230028?ysclid=lgvxetnru432991376> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
  42. Pinaev V. E., Ukhova V. N., Ledashcheva T. N. (2023) Directions, Experience and Prospects for the Implementation of Carbon Projects in Russia. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*, 10 (2). Available at: <https://resources.today/PDF/17ECOR223.pdf>. <https://doi.org/10.15862/17ecor22343> (in Russian).

43. *On Approval of Criteria and Procedure for Attributing Projects Implemented by Legal Entities, Individual Entrepreneurs or Individuals to Climate Projects, the Form and Procedure for Submitting a Report on the Implementation of the Climate project.* Order of the Ministry of Economic Development of Russian Federation of May 11, 2022 No 248. Available at: [https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/prikaz\\_minekonomrazvitiya\\_rossii\\_ot\\_11\\_maya\\_2022\\_g\\_248.html](https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/prikaz_minekonomrazvitiya_rossii_ot_11_maya_2022_g_248.html) (accessed 02 May 2024) (in Russian).
44. *On Approval of the Rules of Verification of the Results of the Implementation of Climate Projects.* Resolution of the Government of the Russia of March 24, 2022 N 455. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202203250027> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
45. Liubchik V. A., Belskaya G. V., Malkevich N. G. (2023) Development of Renewable and Nuclear Energy Production as a Direction for Greenhouse Gas Emissions Reducing and Environmental Safety Ensuring. *Sakharov Readings 2023: Environmental Problems of the XXI Century: Materials of the 23rd International Scientific Conference, May 18–19, 2023, Minsk. Part 1.* Minsk, IVC of the Ministry of Finance, 52–55 (in Russian).
46. Prokhorov V. B., Kirichkov V. S., Chernov S. L., Fomenko M. V. (2023) Assessment of the Possibility of Transition Power Boilers to Alternative Solid Fuels by Modeling Combustion Processes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (6), 536–551. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-536-551> (in Russian).
47. *On Accreditation in the National Accreditation System.* Federal Law of December 28, 2013 No 412-FZ. Available at: <https://fsa.gov.ru/documents/5328/> (accessed 02 May 2024) (in Russian).
48. *On Approval of Accreditation Criteria and the List of Documents Confirming the Compliance of the Applicant, Accredited Person with the Criteria of Accreditation.* Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation from October 26, 2020 N 707. Available at: <https://fsa.gov.ru/documents/15721/> (accessed 02 May 2024) (in Russian).

Received: 21 May 2024

Accepted: 23 July 2024

Published online: 30 September 2024