

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.96>**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА И ХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Научная статья

Щеклеин С.Е.^{1,*}, Дубинин А.М.²¹ORCID : 0000-0003-2140-0321;^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (s.e.shcheklein[at]urfu.ru)

Аннотация

Водород является эффективным энергоносителем для теплоэнергетических технологий и электрохимических источников электрического тока. Предлагаемая технология исключает необходимость хранения и транспортировки водорода, а обеспечивает его производство в объеме, необходимом для непосредственного использования на электростанциях. В данной работе, на примере натрия, рассматривается возможность использования щелочного металла, как наиболее эффективного метода получения водорода при реакции с водой. Продукт реакции (щелочь) повторно восстанавливается до чистого металла электролизом за счет энергии (в период ночного провала энергопотребления ТЭС и АЭС) или за счет энергии ВИЭ в период её природного наличия (ГЭС, ФЭС, ВЭС). Расчетные исследования показали, что процесс восстановления воды натрием экзотермический с выделением теплоты в количестве $12,38 \cdot 10^3$ кДж/кг натрия. При расходе воды 0,39 кг/ кг Na из 1 кг натрия получается 0,48 м³ водорода. Затраты электрической энергии на получение 1 кг Na электролизом NaOH составляют 3,64 кВт·ч. Продуктами реакции электролиза кроме натрия являются вода в количестве 0,225 кг/кг Na, и кислород 0,2 м³ / кг Na.

Ключевые слова: неравномерность энергопотребления, водород, натрий, электролиз, вода, кислород, возобновляемые источники энергии.

THE USE OF ALKALINE METALS IN POWER PRODUCTION AND STORAGE TECHNOLOGIES IN ELECTRIC POWER GENERATION AND ENERGY STORAGE

Research article

Shcheklein S.Y.^{1,*}, Dubinin A.M.²¹ORCID : 0000-0003-2140-0321;^{1,2} Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (s.e.shcheklein[at]urfu.ru)

Abstract

Hydrogen is an efficient energy carrier for heat and power technologies and electrochemical sources of electric current. The proposed technology eliminates the necessity of hydrogen storage and transportation, and provides its production in the volume necessary for direct use at power plants. In this work, using sodium as an example, the possibility of utilizing an alkali metal as the most efficient method of hydrogen production by reaction with water is reviewed. The reaction product (alkali) is repeatedly reduced to pure metal by electrolysis at the expense of energy (during the period of night power failure of TPPs and NPPs) or at the expense of RES energy during the period of its natural availability (HPPs, FES, WPPs). Calculated studies have shown that the process of water reduction by sodium is exothermic, with heat release in the amount of $12.38 \cdot 10^3$ kJ/kg of sodium. At a water flow rate of 0.39 kg/kg Na, 0.48 m³ of hydrogen is obtained from 1 kg of sodium. The electrical energy consumption to produce 1 kg Na by electrolysis of NaOH is 3.64 kW·h. Besides sodium, the products of the electrolysis reaction are water in the amount of 0.225 kg/kg Na, and oxygen 0.2 m³ / kg Na.

Keywords: irregular energy consumption, hydrogen, sodium, electrolysis, water, oxygen, renewable energy sources.

Введение

Характерной особенностью электрической энергии является неравномерный характер её потребления, как в суточном, так и в годовом циклах, что связано с циклом жизнедеятельности человека и большей части адаптированных к нему промышленных технологий [1], [2]. Неравномерность энергопотребления вызывает необходимость регулирования мощности энергоисточников, либо накопления энергии для переноса её производства из временного диапазона избыточности (ночной период) в зону «пикового» потребления (дневной период) [3], [4], [5], [6]. В настоящее время из многочисленных технологий крупномасштабного накопления энергии нашла применение лишь технология гидро-аккумулирования, возможности которой ограничены условиями рельефа местности и водной обеспеченности территории [7], [8].

Получившие широкое развитие в последние десятилетия новые – возобновляемые источники энергии- в первую очередь солнечная и ветровая, потенциал которых имеет переменный во времени (циклический с высоким уровнем стохастической составляющей) характер требует синхронизации их энерговыработки с графиками потребления, что снижает привлекательность их использования в крупномасштабной энергетике [9], [10], [11], [12]. На рисунке 1 приведен суточный график энергопотребления, характерный для промышленно развитых регионов Уральского федерального округа.

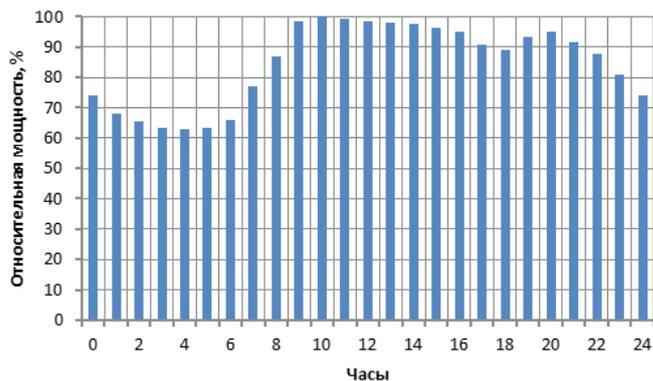


Рисунок 1 - Суточный график энергопотребления региона
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.96.1>

Очевидно, что неравномерность энергопотребления требует принятия дополнительных решений экономического (дифференцированные тарифы), технического (наличие маневренных источников, гидроаккумулирование и пр.), географического (передача энергии в другие часовые зоны) характера.

Вовлечение в энергетическое производство возобновляемых источников энергии создает новые проблемы, связанные с их временной изменчивостью. На рисунках 2, 3 приведены графики суточного и сезонного изменения приходов и энерговыработки солнечной электростанции в условиях Уральского федерального округа.

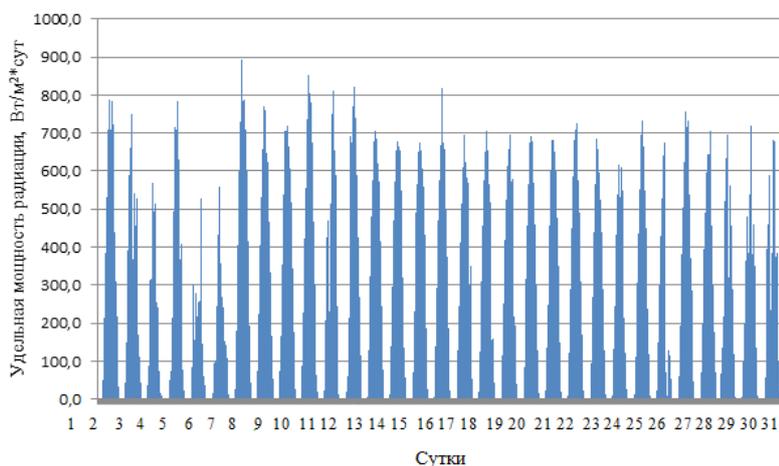


Рисунок 2 - Удельная мощность солнечной инсоляции в месячном цикле
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.96.2>

Примечание: источник [13]

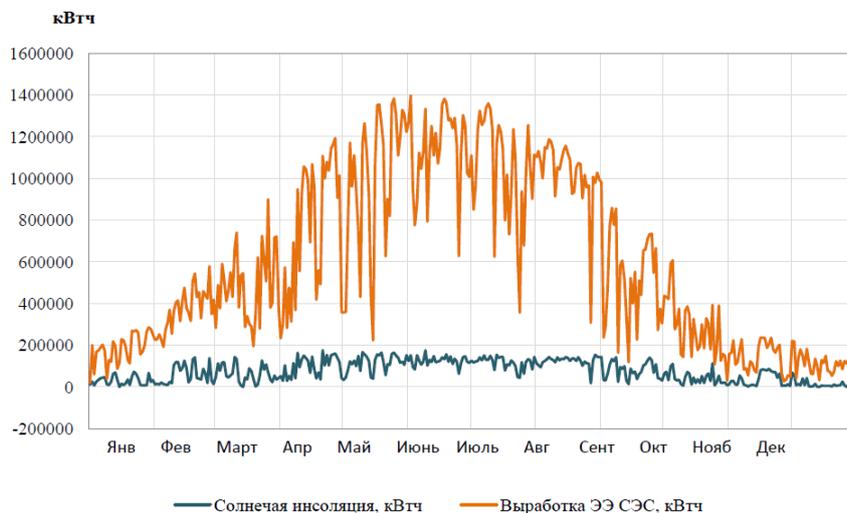


Рисунок 3 - Годовая выработка электроэнергии Орской солнечной электростанцией
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.96.3>

Примечание: источник [13]

Изменение прихода солнечной энергии от 0 (ночь) до 100% (день) в суточных циклах, изменчивость по дням месяца и месяцам года ставят задачу – организации производства энергии в климатически оптимальном периоде – сохранения её и использование в требуемый период времени. Интеграция установок ВИЭ в существующие энергосистемы требует создания крупномасштабных технологий накопления энергии [14], [15].

Повышение доли возобновляемой энергии в общей структуре энергоисточников делает эту задачу неразрешимой при помощи традиционных методов, с существенными экономическими и экологическими негативными последствиями.

В то же время современные успехи в развитии электрохимических технологий получения электрической энергии позволяют ставить задачу использования ЭХГ в качестве маневренных источников большой мощности при наличии накопленного водородного топлива и атмосферного воздуха с образованием воды, как основного продукта реакции [16], [17], [18]. С этой целью разрабатываются разнообразные технологии получения, хранения и транспортировки водорода (по аналогии с природным газом) к электрогенерирующим установкам. Учитывая специфические особенности водорода (пожар и взрывоопасность, сверхтекучесть и др.) данные решения являются крайне сложными и рискованными [19].

Методология исследования

В данной работе, на примере натрия, рассматривается возможность использования щелочного металла, как наиболее эффективного метода получения водорода при реакции с водой. Продукт реакции (щелочь) повторно восстанавливается до чистого металла электролизом за счет энергии (в период ночного провала энергопотребления ТЭС и АЭС) или за счет энергии ВИЭ в период её природного наличия (ГЭС, ФЭС, ВЭС).

На рисунке 3 приведена концептуальная схема предлагаемого энергетического комплекса.



Рисунок 4 - Концептуальная схема предлагаемого энергетического комплекса
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.96.4>

В данной схеме щелочной металл не расходуется, а является промежуточным энергоносителем, позволяющим производить водород для электрохимической части в темпе, необходимом для выработки энергии по графику потребления. Хранение щелочных металлов в длительных (включая многолетние) циклах не имеет технических ограничений в отличие от хранения водорода.

Физико-химия процесса получения водорода с использованием натрия

Восстановительная реакция получения водорода при взаимодействии натрия с водой [20]:



Теплота реакции (1) $\Delta H^0 = 2(\Delta H_{\text{NaOH}}) - 2(\Delta H_{\text{Na}}) - (\Delta H_{\text{H}_2\text{O}})$, где теплота образования NaOH в жидком состоянии $\Delta H_{\text{NaOH}} = -425,5 \cdot 10^3$ кДж/кмоль, Na в жидком состоянии $\Delta H_{\text{Na}} = -286,2 \cdot 10^3$ кДж/кмоль, воды в жидком состоянии $\Delta H_{\text{H}_2\text{O}} = -286,2 \cdot 10^3$ кДж/кмоль [21].

$$\Delta H^0 = [2(-425,5) - 2(+2,41) - (-286,2)] \cdot 10^3 = -569,62 \cdot 10^3 \text{ кДж.}$$

Реакция экзотермическая. В расчете на 1 кг Na $\Delta H^* = \Delta H^0 / 2 \cdot \mu_{\text{Na}} = -569,62 \cdot 10^3 / 2 \cdot 23 = -12,38 \cdot 10^3$ кДж/кг натрия.

В расчете на 1 кг продуктов реакции (1) $\Delta H^{**} = \Delta H^0 / (\mu_{\text{H}_2} + 2\mu_{\text{NaOH}}) = -\frac{569,62 \cdot 10^3}{2+2(23+16+1)} = -7,12 \cdot 10^3$ кДж/кг продуктов реакции.

Теоретическая температура продуктов реакции (1)

Уравнение теплового баланса

$$\Delta H^* = C_p^t \cdot t - C_p^{20} \cdot 20,$$

где:

$C_p^t = g_{\text{NaOH}} \cdot C_{\text{NaOH}}^t + g_{\text{H}_2} \cdot C_{\text{H}_2}^t$ – истинная изобарная удельная теплоемкость продуктов реакции (1) при температуре t ;

$g_{\text{NaOH}}, g_{\text{H}_2}$ – массовые доли компонентов в продуктах реакции (1);

$C_{\text{NaOH}}^t, C_{\text{H}_2}^t$ – истинные изобарные удельные теплоемкости продуктов реакции (1) при температуре t , кДж/кг [22], [23];

C_p^{20} – истинная изобарная удельная теплоемкость продуктов реакции (1) при температуре 20°C .

Для определения теоретической температуры продуктов реакции используется графический метод. Строится график зависимости энтальпии продуктов реакции $C_p^t \cdot t$ от температуры t , далее откладывается на оси ординат теплоту ΔH^* и по точке пересечения определяют теоретическую температуру продуктов реакции [24]. Для натрия она равняется 1800°C .

Расход воды на 1 кг Na по реакции (1) 0,39 кг.

Из 1 кг натрия получается 0,48 м³ водорода.

Удельный расход H₂ на производство электроэнергии [22].

$$b_{\text{э}} = \frac{3600}{\Delta H_1^0 \cdot \eta_{\text{исп}}} = \frac{3600}{121,01 \cdot 10^3 \cdot 0,952} = 0,031 \frac{\text{Кг} \cdot \text{H}_2}{\text{КВТ} \cdot \text{ч}^2}.$$

Удельный объем, вырабатываемой электрической энергии 1,69 кВт ч/кг Na.

Затраты электроэнергии на электролиз гидроксида натрия

Затраты электрической энергии на получение 1 кг Na электролизом NaOH по реакции (2) без учета тепловых потерь



Затраты тепловой энергии на получение 1 кг Na по реакции (2)

$$\Delta H = [2(\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}) + 4(\Delta H_{\text{Na}}) - 4(\Delta H_{\text{NaOH}})] / 4 \cdot \mu_{\text{Na}} =$$

$$= [2(-242,02) + 4(+2,41) - 4(-420,5)] \cdot 10^3 / 4 \cdot 23 = 13,1 \cdot 10^3$$

кДж/кг натрия, компенсируются теплотой экзотермической реакции (1).

Затраты электрической энергии на получение 1 кг Na электролизом NaOH по реакции (2) $\Theta = \Delta H / 3600 = 13,1 \cdot 10^3 / 3600 = 3,64 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{кг} \cdot \text{Na}$, компенсируются избыточной энергией выработанной ТЭС и АЭС в период спада энергопотребления и энергией ГЭС, СЭС и ВЭС в периоды активной генерации.

Важным экологическим обстоятельством является образование по реакции (2) воды в количестве 0,225 кг/кг Na, и кислорода 0,2 м³/кг Na.

Заключение

Расчетные исследования показали, что процесс восстановления воды натрием экзотермический с выделением теплоты в количестве $12,38 \cdot 10^3$ кДж/кг натрия. Расход воды 0,39 кг/кг Na. Из 1 кг натрия получается 0,48 м³ водорода.

Затраты электрической энергии на получение 1 кг Na электролизом NaOH составляют 3,64 кВт·ч. Продуктами реакции электролиза кроме натрия являются вода в количестве 0,225 кг/кг Na, и кислород 0,2 м³/кг Na.

Высокие температуры продуктов реакций (1) позволяют рассматривать возможность дополнительного производства электрической энергии на основе термодинамических циклов Ренкина или Брайтона, что существенно повысит энергетическую эффективность рассмотренной технологии.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Программа развития Уральского федерального университета в рамках Программы «Приоритет-2030». Номер гранта: FEUZ-2022-0031.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Пикулев А.Н., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.96.5>
Нуриев М.Г., Казанский государственный энергетический университет, Казань, Российская Федерация, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.96.6>

Funding

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Development Programme of the Ural Federal University under the Priority-2030 Programme) Grant number: FEUZ-2022-0031.

Conflict of Interest

None declared.

Review

Pikulev A.N., Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.96.5>
Nuriev M.G., Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.96.6>

Список литературы / References

1. Дзюба А.П. Повышение энергетической эффективности экономики России на основе комплексного управления спросом на электроэнергию и газ / А.П. Дзюба // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. — 2019. — № 9 (177). — С. 38–50.
2. Лямбель А.Н. Об электроотоплении многоквартирного дома в комплексе «энергосистема-дом» / А.Н. Лямбель, В.М. Пахалуев, С.Е. Щеклеин // Альтернативная энергетика и экология (ISJAE). — 2018. — № 19–21. — С. 91–100.
3. Сомова Е.В. Расширение регулировочного диапазона энергоблоков: проблемы и их решение / Е.В. Сомова // Теплоэнергетика. — 2024. — № 4. — С. 40–51.
4. Калимуллин Л.В. Приоритетные направления, ключевые технологии и сценарии развития систем накопления энергии / Л.В. Калимуллин, Д.К. Левченко, Ю.Б. Смирнова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2019. — № 1. — С. 42–54.
5. Лушников О.Г. О потребностях энергосистемы в регулирующих мощностях и направлениях работы ОАО "РусГидро" по строительству ГАЭС / О.Г. Лушников // Гидротехническое строительство. — 2015. — № 7. — С. 31–41.
6. Дудолин А.А. Внедрение высокоманевренных газотурбинных теплоэлектроцентралей как способ повышения тепловой и экологической эффективности ЕЭС России / А.А. Дудолин // Вестник Московского энергетического института. — 2023. — № 2. — С. 86–97.
7. Елистратов В.В. Использование принципов гидроаккумулирования при работе ветроэлектростанций / В.В. Елистратов // Энергетическая политика. — 2009. — № 5. — С. 12–17.
8. Беликов В.В. Численные исследования нестационарных гидравлических режимов работы совмещенного нижнего бассейна Загорских ГАЭС-1 и ГАЭС-2 / В.В. Беликов, В.В. Кочетков, Е.С. Третьюхина // Безопасность энергетических сооружений. Научно-технический и производственный сборник. — Москва, 2007. — С. 112–127.
9. Белобородов С.С. Влияние суточной и сезонной неравномерности выработки электроэнергии солнечными и ветровыми электростанциями на структуру генерирующих мощностей в энергосистеме Германии / С.С. Белобородов // Электрические станции. — 2020. — № 5 (1066). — С. 2–7.
10. Волошин Е.А. Исследование балансов мощности при внедрении возобновляемых источников энергии и накопителей электрической энергии в электрическую сеть / Е.А. Волошин, О.А. Онисова, А.А. Наволочный // Вестник Московского энергетического института. — 2022. — № 3. — С. 11–22.
11. Лосева И.Г. Оценка динамики снижения мощности источников нетрадиционной и возобновляемой электроэнергии (СЭС, ВЭС, далее — ВИЭ). Использование величины снижения мощности ВИЭ в качестве нормативного возмущения / И.Г. Лосева, М.Д. Перышкин, Е.Г. Какушина [и др.] // Энергетические установки и технологии. — 2020. — Т. 6. — № 4. — С. 51–56.
12. Ершов С.В. Перспективные схемы ветро-дизельных установок / С.В. Ершов, С.О. Смолин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2018. — № 12. — С. 49–54.
13. Обухова Н.В. Режимы работы Сакмарской солнечной электростанции Оренбургской энергосистемы / Н.В. Обухова, К.И. Башкатова, А.О. Егоров // Электроэнергетика глазами молодежи — 2018. Материалы IX Международной молодежной научно-технической конференции. — 2018. — С. 139–142.
14. Какоуров М.А. Анализ процесса интеграции ВИЭ в энергосистемы / М.А. Какоуров // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. — 2021. — С. 174–178.

15. Шамсиев Б.Х. Анализ перспектив развития ОЭС Центральной Азии с учетом интеграции ВИЭ / Б.Х. Шамсиев, Х.А. Шамсиев // Известия НТЦ Единой энергетической системы. — 2022. — № 1 (86). — С. 78–86.
16. Везируглу Т.Н. Энергетика 21-го века: водородная энергетика / Т.Н. Везируглу, Ш. Сахин // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. — 2014. — № 2 (142). — С. 12–28.
17. Малышенко С.П. Исследования и разработки ОИВТ РАН в области технологий водородной энергетики (к 50-летию ОИВТ РАН) / С.П. Малышенко // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. — 2011. — № 3 (95). — С. 10–34.
18. Филиппов С.П. Топливные элементы и водородная энергетика / С.П. Филиппов, А.Э. Голодницкий, А.М. Кашин // Энергетическая политика. — 2020. — № 11 (153). — С. 28–39.
19. Литвиненко В.С. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики / В.С. Литвиненко [и др.] // Записки Горного института. — 2020. — Т. 244. — С. 428–438.
20. Варавва Н.Э. Химия в схемах и таблицах / Н.Э. Варавва. — Москва : Эксмо, 2016. — 208 с.
21. Карапетьянц М.Х. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ / М.Х. Карапетьянц, М.Л. Карапетьянц. — Москва : Химия, 1968. — 270 с.
22. Халяпов К.М. Использование водорода в электрохимическом генераторе на базе установки с твердооксидным топливным элементом / К.М. Халяпов, С.Е. Щеклеин, А.М. Дубинин // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика. Даниловские чтения. — Екатеринбург, 2023. — С. 464–471.
23. Королев В.Н. Техническая термодинамика / В.Н. Королев, Е.М. Толмачев. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2001. — 180 с.
24. Мунц В.А. Основы теории горения / В.А. Мунц, Е.Ю. Павлюк. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2005. — 102 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Dzyuba A.P. Povyshenie jenergeticheskoy jeffektivnosti jekonomiki Rossii na osnove kompleksnogo upravlenija sprosom na jelektroenergiju i gaz [Improving the energy efficiency of the Russian economy based on integrated demand management for electricity and gas] / A.P. Dzyuba // Problemy jekonomiki i upravlenija neftegazovym kompleksom [Problems of Economics and Management of the Oil and Gas Complex]. — 2019. — № 9 (177). — P. 38–50. [in Russian]
2. Lambel A.N. Ob jelektrotoplenii mnogokvartirnogo doma v komplekse «jenergosistema-dom» [On electric heating of an apartment building in the Energosystem-dom complex] / A.N. Lambel, V.M. Pakhaluev, S.E. Shcheklein // A'l'ternativnaja jenergetika i jekologija (ISJAE) [Alternative Energy and Ecology (ISJAE)]. — 2018. — № 19-21. — P. 91–100. [in Russian]
3. Somova E.V. Rasshirenie regulirovochnogo diapazona jenergoblokov: problemy i ih reshenie [Expansion of the control range of power units: problems and their solution] / E.V. Somova // Teplojenergetika [Thermal Power Engineering]. — 2024. — № 4. — P. 40–51. [in Russian]
4. Kalimullin L.V. Prioritetnye napravlenija, kljuचेvyе tehnologii i scenarii razvitija sistem nakoplenija jenerгии [Priority areas, key technologies and scenarios for the development of energy storage systems] / L.V. Kalimullin, D.K. Levchenko, Yu.B. Smirnova // Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta [Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University]. — 2019. — № 1. — P. 42–54. [in Russian]
5. Lushnikov O.G. O potrebnostjah jenergosistemy v regulirujushhijh moshhnostyah i napravlenijah raboty OAO "RusGidro" po stroitel'stvu GAJeS [On the needs of the energy system in regulating capacities and areas of work of JSC RusHydro for the construction of hydropower plants] / O.G. Lushnikov // Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic Engineering Construction]. — 2015. — № 7. — P. 31–41. [in Russian]
6. Dudolin A.A. Vnedrenie vysokomanevrennyh gazoturbinnnyh teplojelektrocentralej kak sposob povyshenija teplovoj i jekologicheskoy jeffektivnosti EJeS Rossii [Introduction of highly maneuverable gas turbine thermal power plants as a way to increase the thermal and environmental efficiency of the UES of Russia] / A.A. Dudolin // Vestnik Moskovskogo jenergeticheskogo instituta [Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute]. — 2023. — № 2. — P. 86–97. [in Russian]
7. Elistratov V.V. Ispol'zovanie principov gidroakkumulirovanija pri rabote vetrojelektrostantsij [The use of principles of pumped storage in the operation of wind farms] / V.V. Elistratov // Jenergeticheskaja politika [Energy Policy]. — 2009. — № 5. — P. 12–17. [in Russian]
8. Belikov V.V. Chislennye issledovaniya nestacionarnykh gidravlicheskih rezhimov raboty sovmeshhennogo nizhnego bassejna Zagorskijh GAJeS-1 i GAJeS-2 [Numerical studies of unsteady hydraulic modes of operation of the combined lower basin of the Zagorsk HPP-1 and HPP-2] / V.V. Belikov, V.V. Kochetkov, E.S. Tret'juhina // Bezopasnost' jenergeticheskijh sooruzhenij. Nauchno-tehnicheskij i proizvodstvennyj sbornik [Safety of Energy Facilities. Scientific, technical and industrial collection]. — Moscow, 2007. — P. 112–127. [in Russian]
9. Beloborodov S.S. Vlijanie sutochnoj i sezonnoj neravnomernosti vyrabotki jelektroenergii solnechnymi i vetrovymi jelektrostantsijami na strukturu generirujushhijh moshhnostej v jenergosisteme Germanii [The influence of daily and seasonal unevenness of electricity generation by solar and wind power plants on the structure of generating capacities in the German energy system] / S.S. Beloborodov // Jelektricheskije stancii [Electric Stations]. — 2020. — № 5 (1066). — P. 2–7. [in Russian]
10. Voloshin E.A. Issledovanie balansov moshhnosti pri vnedrenii vozobnovljaemykh istochnikov jenerгии i nakopitelej jelektricheskoy jenerгии v jelektricheskuju set' [Investigation of power balances during the introduction of renewable energy sources and electric energy storage devices into the electric grid] / E.A. Voloshin, O.A. Onisova, A.A. Navolochnyj // Vestnik Moskovskogo jenergeticheskogo instituta [Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute]. — 2022. — № 3. — P. 11–22. [in Russian]
11. Loseva I.G. Ocenka dinamiki snizhenija moshhnosti istochnikov netradicionnoj i vozobnovljaemoj jelektroenergii (SJeS, VJeS, dalee — VIJe). Ispol'zovanie velichiny snizhenija moshhnosti VIJe v kachestve normativnogo vozmushhenija

[Assessment of the dynamics of reducing the capacity of sources of unconventional and renewable electricity (SES, WPP, hereinafter referred to as RES). Using the magnitude of the reduction in renewable energy capacity as a regulatory disturbance] / I.G. Loseva, M.D. Peryshkin, E.G. Kakushina [et al.] // *Jenergeticheskie ustanovki i tehnologii* [Energy Installations and Technologies]. — 2020. — Vol. 6. — № 4. — P. 51–56. [in Russian]

12. Yershov S.V. Perspektivnye shemy vetro-dizel'nyh ustanovok [Promising schemes of wind-diesel installations] / S.V. Yershov, S.O. Smolin // *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]. — 2018. — № 12. — P. 49–54. [in Russian]

13. Obukhova N.V. Rezhimy raboty Sakmarskoj solnechnoj jelektrostantsii Orenburgskoj jenergosistemy [Operating modes of the Sakmar solar power plant of the Orenburg power system] / N.V. Obukhova, K.I. Bashkatova, A.O. Egorov // *Jelektrojenergetika glazami molodezhi* — 2018. Materialy IX Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii [Electric power industry through the eyes of youth — 2018. Proceedings of the IX International Youth Scientific and Technical Conference]. — 2018. — P. 139–142. [in Russian]

14. Kakourov M.A. Analiz processa integracii VIJe v jenergosistemy [Analysis of the process of integrating renewable energy sources into energy systems] / M.A. Kakourov // *Povyshenie jeffektivnosti proizvodstva i ispol'zovanija jenerгии v uslovijah Sibiri. Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* [Improving the efficiency of energy production and use in Siberia. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation]. — 2021. — P. 174–178. [in Russian]

15. Shamsiev B.H. Analiz perspektiv razvitiya OJeS Central'noj Azii s uchedom integracii VIJe [Analysis of the prospects for the development of the ECO of Central Asia, taking into account the integration of renewable energy sources] / B.H. Shamsiev, H.A. Shamsiev // *Izvestija NTC Edinoj jenergeticheskoy sistemy* [Izvestiya STC Unified Energy System]. — 2022. — № 1 (86). — P. 78–86. [in Russian]

16. Veziroglu T.N. Jenergetika 21-go veka: vodorodnaja jenergetika [Energy of the 21st century: hydrogen energy] / T.N. Veziroglu, S. Sahin // *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaja jenergetika i jekologija* [International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology]. — 2014. — № 2 (142). — P. 12–28. [in Russian]

17. Malysenko S.P. Issledovaniya i razrabotki OIVT RAN v oblasti tehnologij vodorodnoj jenergetiki (k 50-letiju OIVT RAN) [Research and development of the Institute of Nuclear Physics of the Russian Academy of Sciences in the field of hydrogen energy technologies (on the occasion of the 50th anniversary of the Institute of Nuclear Physics of the Russian Academy of Sciences)] / S.P. Malysenko // *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaja jenergetika i jekologija* [International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology]. — 2011. — № 3 (95). — P. 10–34. [in Russian]

18. Filippov S.P. Toplivnye jelementy i vodorodnaja jenergetika [Fuel cells and hydrogen energy] / S.P. Filippov, A.E. Golodnitsky, A.M. Kashin // *Jenergeticheskaja politika* [Energy Policy]. — 2020. — № 11 (153). — P. 28–39. [in Russian]

19. Litvinenko V.S. Bar'ery realizacii vodorodnyh iniciativ v kontekste ustojchivogo razvitiya global'noj jenergetiki [Barriers to the implementation of hydrogen initiatives in the context of sustainable global energy development] / V.S. Litvinenko [et al.] // *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute]. — 2020. — Vol. 244. — P. 428–438. [in Russian]

20. Varavva N.E. Himija v shemah i tablicah [Chemistry in diagrams and tables] / N.E. Varavva. — Moscow : Eksmo, 2016. — 208 p. [in Russian]

21. Karapetyants M.H. Osnovnye termodinamicheskie konstanty neorganicheskikh i organicheskikh veshhestv [Basic thermodynamic constants of inorganic and organic substances] / M.H. Karapetyants, M.L. Karapetyants. — Moscow : Khimiya Publ., 1968. — 270 p. [in Russian]

22. Khalyapov K.M. Ispol'zovanie vodoroda v jelektrohimicheskom generatore na baze ustanovki s tverdooksidnym toplivnym jelementom [The use of hydrogen in an electrochemical generator based on a plant with a solid oxide fuel cell] / K.M. Khalyapov, S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin // *Jenergo- i resursoberezhenie. Jenergoobespechenie. Netradicionnye i vozobnovljaemye istochniki jenerгии. Atomnaja jenergetika. Danilovskie chtenija* [Energy and resource conservation. Energy supply. Non-traditional and renewable energy sources. Nuclear power engineering. The Danilovsky readings]. — Yekaterinburg, 2023. — P. 464–471. [in Russian]

23. Korolev V.N. Tehnicheskaja termodinamika [Technical thermodynamics] / V.N. Korolev, E.M. Tolmachev. — Yekaterinburg : UGTU—UPI, 2001. — 180 p. [in Russian]

24. Munts V.A. Osnovy teorii gorenija [Fundamentals of gorenje theory] / V.A. Munts, E.Y. Pavlyuk. — Yekaterinburg : UGTU—UPI, 2005. — 102 p. [in Russian]