

УДК 621.355

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ<sup>1</sup>

© 2024 г. С. И. Нефедкин\*, Я. В. Исаев, В. Д. Михневич,  
В. Е. Елецких, М. А. Климова

*Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия*

*\* e-mail: nefedkinsi@mpei.ru*

Поступила в редакцию 20.02.2024 г.

После доработки 29.08.2024 г.

Принята к публикации 24.09.2024 г.

Рассмотрены электрохимические преобразователи энергии, которые в зависимости от типа используются как для генерации электрической энергии, так и для ее накопления в виде химической энергии активных веществ. Рассмотрен пример альтернативной схемы гарантированного электро-теплоснабжения энергоизолированного объекта с высоким потенциалом ветровой энергии и водородным накоплением энергии без использования привозного или местного топлива. Схема содержит ветроэнергетический комплекс из парка ветрогенераторов, размещенных в точках с высоким потенциалом ветра, которые обеспечивают гарантированное электроснабжение даже в периоды слабого ветра. Для теплоснабжения потребителя весь избыток электроэнергии идет на термоэлектрический нагрев воды в баках накопителях, а также на получение водорода методом электролиза воды. Водород запасается или идет в энергоустановку на топливных элементах (используется в период безветрия или как резервный источник питания), также при дефиците теплоты в водородный конденсационный котел. Для реального автономного объекта (поселок Новиково, остров Сахалин) рассчитаны годовой баланс энергии в водороде, количество ветрогенераторов, параметры используемого в схеме оборудования, также коэффициенты использования установленной мощности. Показаны основные предпосылки для реализации альтернативной схемы электро-теплоснабжения без использования привозного топлива за счет энергии ветра и электрохимического преобразования энергии.

**Ключевые слова:** электрохимические преобразователи энергии, автономное электро-теплоснабжение, электролизер разложения воды, топливные элементы, водород

DOI: 10.31857/S0424857024120041, EDN: NNCPQR

## ELECTROCHEMICAL ENERGY CONVERTERS IN DECENTRALIZED POWER SYSTEMS<sup>2</sup>

© 2024 S. I. Nefedkin\*, Ya. V. Isaev, V. D. Mikhnevich, V. E. Yeletsky, and M. A. Klimova

*National Research University “MPEI”, Moscow, Russia*

*\* e-mail: nefedkinsi@mpei.ru*

Considered electrochemical energy converters, which are used depending on the type, both for the generation of electric energy and for its accumulation in the form of chemical energy of active substances. An example of an alternative scheme for guaranteed electricity and heat supply of an energy-isolated facility with high wind power potential and hydrogen energy storage without the use of imported or local fuel is considered. The scheme contains a wind power complex from a park of wind generators located in high-potential wind points, which provide guaranteed electricity supply even during periods of low wind. For the heat supply of the consumer all surplus electricity goes to thermoelectric heating of water in storage tanks, as well as hydrogen production by electrolysis of water. Hydrogen is stored or goes into the fuel cell power plant (used in a period

<sup>1</sup> Статья представлена участником Всероссийской конференции “Электрохимия-2023”, состоявшейся с 23 по 26 октября 2023 года в Москве на базе ИФХЭ РАН.

<sup>2</sup> The article was presented by a participant in the All-Russian Conference “Electrochemistry-2023”, held from October 23 to October 26, 2023 in Moscow at the Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry named after A.N. Frumkin RAS.

of calm or as a backup power source), also when the heat is lacking in the hydrogen condensing boiler. For a real autonomous facility (Novikovo village, Sakhalin island) the annual hydrogen energy balance is calculated, the number of wind generators, parameters used in the equipment scheme, also the installed capacity utilization factors. The main prerequisites for implementation of an alternative electricity and heat supply scheme without use of imported fuel at the expense of wind energy and electrochemical conversion of energy are shown.

**Keywords:** electrochemical energy converters, autonomous electricity and heat supply, water decomposition electrolyser, fuel cells, hydrogen

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие энергетики в мире сегодня подчиняется требованиям повышения ее эффективности, экологичности и сопровождается существенным изменением структуры генерации. По данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии, доля установленной мощности возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в 2023 г. в мире достигла уже 26.7% и составила 3870 ГВт (~2195 ГВт в 2017 г.) [1]. Гидроэлектростанции, которые еще недавно были единственными весомыми представителями ВИЭ в структуре мировой энергетики, сегодня покрывают лишь половину этой мощности. Драйверами роста ВИЭ стали солнечные (СЭ) и ветровые (ВЭ) электростанции. Установленная мощность только ветровой генерации в мире на 2023 г. составила около 1000 ГВт, что почти в 4 раза превосходит установленную мощность всей электрогенерации РФ. Мировая ветрогенерация в 2023 г. выработала почти 2.5 тераватт-часа электроэнергии. Она стала важным источником энергии в Европе. В 2023 г. доля ВИЭ от общего объема электрогенерации в Испании составила 50%. При этом доля ветрогенерации от общего объема электрогенерации в Испании составила 23%, в Великобритании – 29%, Дании 25%, в Бельгии – 10%, Нидерландах – 7% и Германии – 5% [2]. Россия также развивает свою энергетику в русле повышения ее экологичности, но основной упор сделан на рост доли использования природного газа на тепловых станциях, как наиболее дешевого и доступного энергоносителя. Ветровая генерация в РФ так же, как и в Европе, развивается путем создания подключенных к централизованной сети ветропарков, число которых достигло 15. Ведущую роль здесь играет ГК “Росатом” (АО “НоваяВинд”) за счет локализации в РФ производства ВЭУ 2.5 MW L 100 2.5 MW по лицензии Lagerwey [3, 4]. Суммарно подключенные к сети ветроэнергетические мощности в 2023 г. достигли 1 ГВт [4]. Вместе с тем, для РФ более актуально, на наш взгляд, использование ветрогенерации для энергоснабжения территорий, которые сегодня

активно развиваются, но не охвачены централизованным энергоснабжением. Проблемы использования ВИЭ при автономном энергоснабжении связаны с неравномерностью поступления энергии, а также с конфликтом между потреблением и генерацией энергии в различные периоды времени. В связи с этим возрастает роль накопителей электрической энергии, при этом роль электрохимических преобразователей энергии, которые могут выполнять как функцию генераторов энергетической энергии, так и функцию накопителей энергии, будет существенно возрастать [5–9].

Сегодня предлагаются различные решения для гарантированного электро-теплоснабжения энергоизолированных потребителей как на основе совершенствования существующих технологий (дизель-электростанции и котельные), так и новых (газотурбинные электростанции, плавучие атомные электростанции). Однако, на наш взгляд, для потребителей с высоким потенциалом ВИЭ наиболее универсальными и экологичными являются схемы энергоснабжения на основе солнечной и ветровой генерации с использованием электрохимических накопителей энергии.

### *Электрохимические преобразователи энергии*

Устройства электрохимической энергетики – это электрохимические преобразователи энергии (ЭХПЭ), в которых химическая энергия активных веществ (реагентов) преобразуется в электрическую энергию, либо электрическая энергия преобразуется в химическую энергию образующихся веществ. Основные типы устройств электрохимической энергетики представлены в табл. 1.

Рассмотрим возможности и примеры использования ЭХПЭ в различных схемах автономного энергоснабжения различных потребителей электрической энергии.

Первичные химические источники тока (ХИТ) используются для питания устройств малой мощности, а также там, где нужны высокая удельная энергия источника энергии (средства связи, кардиостимуляторы, пульта и т. п.) [10]. Электрохимические суперконденсаторы (ЭХСК) или ионисторы используются там,

Таблица 1. Электрохимические преобразователи энергии

Электрохимические преобразователи энергии	Реагенты внутри устройства	Реагенты подаются извне	Производят электрическую энергию	Вырабатывают активные вещества	Потребляют электрическую энергию
Топливные элементы	—	+	+	—	—
Первичные химические источники тока	+	+	+	—	—
Аккумуляторные батареи	+	—	+	+	+
Проточные редокс-батареи	—	+	+	+	+
Электрохимические суперконденсаторы	+	—	+	+	+
Электролизеры разложения воды	—	+	—	+	+
Регенеративные топливные элементы	—	+	+	+	+

где в течение короткого времени нужно запасти и отдать потребителю высокую мощность (в поездах, подъемных кранах, лифтах, в схемах резервного питания [11]). Разрабатываются также более энергоемкие гибридные суперконденсаторы [12].

В аккумуляторных батареях (АБ) или вторичных химических источниках тока на электродах происходят обратимые электрохимические превращения [10, 13, 14]. Носимые устройства (телефоны, ноутбуки, электрический инструмент и др.) используют АБ, в первую очередь литий-ионные АБ (ЛИА), которые также стали трендом в транспортных средствах. Доля электромобилей на ЛИА превышает 10% в структуре продаж новых легковых автомобилей [13]. Аккумуляторные батареи сегодня являются наиболее эффективными и удобными электрохимическими накопителями электрической энергии и широко используются, например, в системах резервного энергоснабжения, многих других применениях [15]. Однако АБ имеют и недостатки. Их емкость ограничена размерами самого аккумулятора. Их использование в гибридных схемах автономного энергоснабжения вместе с фотоэлектрическими панелями в суточном цикле накопления будет эффективным при условии, что годовой приток солнечной энергии является относительно равномерным. Однако для РФ даже в самых благоприятных для солнечной энергетики южных регионах приток солнечной энергии в зимние месяцы в 3–4 раза ниже, чем в летние месяцы [6]. Таким образом, для гарантированного энергоснабжения потребителя нужны более емкие, чем АБ, накопители энергии, которые имеют возможность накапливать электрическую энергию не в самом устройстве, а в энергоносителе, находящемся вне устройства.

В проточных редокс-батареях (ПРБ) в режиме генерации электрического тока активные вещества в составе жидких электролитов (анолита и католита) подаются на анод и катод извне устройства. Накопление или генерация электрической энергии происходит за счет изменения степени окисления, например иона ванадия [16, 17]. Объем активных электролитов ПРБ не ограничен, однако скорости электрохимических превращений на электродах более чем на порядок ниже, чем в современных топливных элементах и электролизерах. Тем не менее, проточные редокс-батареи могут рассматриваться для стационарного применения, в том числе в гибридных схемах энергоснабжения, как более экономичный вариант накопителя.

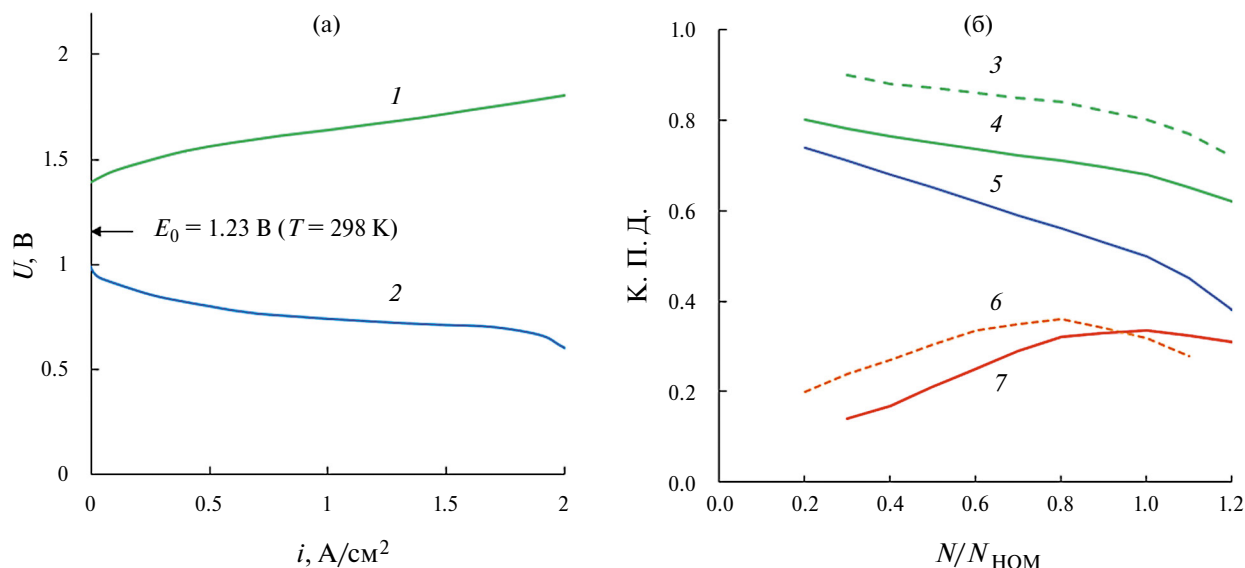
Для систем накопления электроэнергии в схемах автономного энергоснабжения потребителей, имеющих неравномерные годовые графики генерации энергии ВИЭ и графики потребления электрической и тепловой энергии, интерес представляет также водородное накопление энергии. Водород здесь производится в электролизерах разложения воды и накапливается за счет избытка электрической энергии от ВИЭ. Использование водорода в водородно-воздушных топливных элементах позволяет генерировать электрическую энергию по мере необходимости. Количество вырабатываемой электрической энергии ограничено только размерами систем хранения реагентов и их количеством и напрямую не связано с самим устройством [5–9]. В отличие от АБ, рынок топливных элементов сегодня не является объемным (десятки тыс. шт. в год). Однако энергоустановки на топливных элементах с протонообменной мембраной (ПОМ ТЭ, PEM FC) достигли высокого уровня технологического

развития, прежде всего в автомобильных применениях. За счет электрокатализа и правильной организации процессов отвода теплоты и управления потоками воды достигнуты высокие значения удельной мощности батареи топливных элементов ( $W_v = 5.4$  кВт/л), а также удельной плотности энергии единичного топливного элемента ПОМ ТЭ ( $1.2$  Вт/см<sup>2</sup>). Вольт-амперная характеристика таких ПОМ ТЭ имеет вид, представленный на рис. 1а, кривая 2 [18]. Перспективными применениями для топливных элементов являются не только электромобили на водороде, но и коммунальное электроснабжение, сетевые электростанции малой и средней мощности [5–9, 19].

Сегодня наиболее доступными для производства чистого водорода являются щелочные электролизеры (ЩЭ, АВЕ), которые, однако, по параметрам удельных энергозатрат, компактности и удобству эксплуатации имеют недостатки [5]. Более современные электролизеры разложения воды с протонообменной мембраной (ПОМ ЭВ, PEM WE) достигли высокого уровня технологического совершенства и сейчас выпускаются уже в виде установок с высокой производительностью до 200 кг H<sub>2</sub>/ч с выходным давлением 30 бар и удельными энергозатратами 53.2 кВт ч/кг H<sub>2</sub> [20, 21]. Такой водород, производимый ПОМ ЭВ, имеет высокую чистоту (99.995%) и может использоваться в ПОМ ТЭ без дополнительной очистки. В ПОМ ЭВ реализуются высокие плотности токов и пологие ВАХ (рис. 1а, кривая 1) [20]. Однако ПОМ ЭВ более дорогие, так как требуют использования катализаторов на основе драгоценных

металлов. Таким образом, вместе с более дешевыми, но менее компактными щелочными электролизерами ПОМ ЭВ сегодня рассматриваются как промышленные системы, интересные для зеленой энергетики [21]. Эффективное использование топливного элемента и электролизера в схемах энергоснабжения определяется, прежде всего, их вольт-амперными характеристиками (рис. 1а). Пологие ВАХ позволяют реализовать электрохимические устройства с повышенными удельными энергетическими характеристиками, меньшей материалоемкостью и более низкой стоимостью. Однако не менее важна зависимость коэффициента полезного действия (КПД) электрохимических преобразователей от нагрузки. Это важно для автономных потребителей, где суточный график нагрузки (СГН) не является равномерным и генерирующие устройства работают на режимах частичной мощности [5]. Как видно из рис. 1б, на частичных нагрузках КПД топливных элементов и электролизеров повышается, а у электростанций на двигателях внутреннего сгорания (ДВС) и газотурбинных установках (ГТУ), напротив снижается.

В регенеративных топливных элементах (РТЭ), например в регенеративных водородно-кислородных топливных элементах, в режиме генерации электрической энергии в самом топливном элементе на электроды извне подводятся и потребляются активные вещества (водород и кислород). В режиме накопления энергии вырабатываются активные вещества (водород и кислород), как при электролизе воды. При этом используются



**Рис. 1.** (а) Вольт-амперные характеристики электролизера ПОМ ЭВ 30 бар, 65°C (1) и топливного элемента ТЭ ПОМ (Mirai) (2), (б) Вид зависимости КПД энергетических установок от нагрузки: 3 – аккумуляторная батарея; 4 – электролизная установка; 5 – энергоустановка на топливных элементах; 6 – дизельная электростанция; 7 – газотурбинная электростанция.

одни и те же электроды, как в режиме работы топливного элемента, так и в режиме электролиза воды [22]. Однако до сих пор не удается создать коммерческие накопители и генераторы энергии на основе РТЭ. Это связано с различной кинетикой и сложностью подбора одних и тех же носителей и катализаторов, как для работы в режиме топливного элемента, так и в режиме электролизера.

*Электрохимические преобразователи энергии и возобновляемые источники энергии в схемах автономного энергоснабжения*

Электролиз воды — сегодня это промышленная технология для получения чистого водорода как технического газа с целью применения в целом ряде приложений в качестве агента—восстановителя (при химическом синтезе, в металлургии, электронной и стекольной промышленности, в электроэнергетике) [5]. Однако будущее так называемого “зеленого водорода”, как эффективного и экологичного энергоносителя, связывают с технологией электролиза воды и крупномасштабным его производством за счет электрической энергии возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в первую очередь крупных ветровых и солнечных электростанций. В связи с этим топливные элементы, как потребители этого “зеленого водорода” будут рассматриваться в качестве установок для крупномасштабного производства электрической энергии, а также в автомобилях на топливных элементах. Сегодня их использование ограничено отсутствием водородной инфраструктуры и локализовано по месту применения (например, складские погрузчики, коммунальное энергоснабжение), однако в будущем их применение в различных приложениях будет, безусловно, возрастать [5, 6].

В настоящее время имеются примеры расчетов, практических разработок и реализации схем автономного энергоснабжения, с использованием ВИЭ, например, на основе ветрогенераторов (ВГ, WT) или солнечных фотоэлектрических электростанций (СФЭЭ, PV). Автономная гибридная схема энергоснабжения на основе ВГ и водородного аккумулирования энергии рассмотрена в работе [23]. Моделирование режимов работы проводилось по различным сценариям, использовался часовой интервал времени для параметров генерации и потребления. Также был проведен экономический анализ. В работе [24] представлена почасовая система управления энергопотреблением (СУП) для автономной гибридной системы на основе ВИЭ. СУП состоит из ВГ и СФЭЭ в каче-

стве основных источников энергии, а также двух систем накопления энергии (водородная система и аккумулятор). Ветрогенератор и солнечные модули в данной схеме предназначены для работы на максимальной мощности, в то время как аккумулятор и водородная подсистема, состоящая из топливного элемента, электролизера и резервуара для хранения водорода, действуют как система поддержки и накопления. Схема использует нечеткое логическое управление для удовлетворения потребностей нагрузки в энергии и поддержания уровня заряда аккумулятора и уровня водорода в резервуаре в пределах определенных целевых значений. В качестве критериев оптимизации схемы выбраны стоимость использования и срок службы элементов схемы. В этой работе были учтены имеющиеся в продаже компоненты и ожидаемый срок службы оборудования в 25 лет. Существуют готовые программы для проектирования систем электроснабжения на основе солнечных фотоэлектрических панелей, в частности SOLARGIS PVPLANNER (Словакия), RETScreen (Канада), SAM(США), PV\*SOL (Германия), PVsyst (Швейцария) [25], также ветрогенераторов [26, 27]. В настоящее время существуют две основные промышленные группы, работающие в направлении развития универсальных моделей для использования в моделировании ветрогенераторов — Western Electricity Coordinating Council (WECC) Renewable Energy Modeling Task Force (REMTF) и International Electrotechnical Commission (IEC), Technical Committee (TC), Working Group (WG) [27, 28]. Решение ETAP GridCode используется для проектирования, анализа, оптимизации и технического обслуживания систем возобновляемой энергетики, в том числе и с использованием ветрогенераторов. Однако данные программы не содержат опций использования водородного накопления энергии, а также использования накопленного водорода для целей электроснабжения и теплоснабжения.

*Децентрализованное энергоснабжение и ВИЭ*

На наш взгляд, для РФ более актуально использование возобновляемых источников энергии, в частности ветрогенерации для энергоснабжения потребителей на территориях, которые не охвачены централизованным энергоснабжением. При этом электроснабжение и теплоснабжение должны рассматриваться в единой схеме энергоснабжения. Только в Дальневосточном федеральном округе (ДФО) 345 населенных пунктов с децентрализованным электроснабжением (рис. 2).

Сегодня электроснабжение здесь обеспечивается в основном за счет дизель-энергостанций и привозного органического топлива. Их общая мощность составляет около 531 МВт. С учетом дорогого привозного топлива стоимость электроэнергии на ряде автономных объектов превышает 200 руб/(кВт ч). Для теплоснабжения используется также привозное топливо и частично местное топливо.

Очевидно, что энергообеспечение и развитие северных и восточных территорий РФ должно быть тесно связано с решением проблем экологии и базироваться на новых энергетических технологиях, использующих возобновляемые энергоресурсы (ветроэлектростанции, солнечные фотоэлектрические электростанции, геотермальные тепловые электростанции) [31, 6].

Обзор микрогенерации в РФ на основе ВИЭ проведен в работе [29]. В работе [30] изложены результаты опытно-конструкторской разработки автономной ветро-дизельной электрической установки (ВДЭУ) мощностью 10 кВт для районов Севера и Дальнего Востока, где отсутствует

централизованное энергоснабжение. Особенно актуальна данная разработка для территорий с ежегодными “северными завозами”, где энергоснабжение осуществляется дизельными электростанциями [31, 6]. Однако подобные системы автономного энергоснабжения, как правило, рассматривают только электроснабжение потребителя и позволяют лишь снизить количество завозимого топлива.

#### *Ветропотенциал Дальнего Востока и Севера РФ*

Ветропотенциал является существенным энергетическим ресурсом в прибрежных районах Дальнего Востока и Севера РФ. Атлас ветров России указывает, что существует множество районов, где среднегодовая скорость ветра превышает 6.0 м/с, поэтому использование ветра как возобновляемого источника энергии является актуальной задачей. Наивысшие среднегодовые значения скорости ветра (6–7 м/с) зафиксированы вдоль берегов Баренцева, Карского, Берингова и Охотского морей. Другие районы с относительно



Рис. 2. Объекты децентрализованного электроснабжения в Дальневосточном федеральном округе РФ.

**Таблица 2.** Характерные диапазоны скорости ветра (в днях), зафиксированные за 5-летний период наблюдений на высоте 50 м [32, 33]

Местонахождение, поселок	Среднегодовая скорость ветра, м/с	Количество дней минимальной скорости ветра		Диапазон скорости ветра с максимальным количеством дней	
		м/с	дни	м/с	дни
<b>Камчатка:</b>					
Усть-Камчатск	6.0	1 ... 2.1	37	3.2 ... 4.3	186
Соболево	6.8	1.1 ... 2.1	28	4.4 ... 5.5	148
Усть-Большерецк	6.08	1.1 ... 2.2	35	4.1 ... 5.1	161
Вилучинск	5.77	1 ... 2	33	4 ... 5	158
Ключи	4.18	0.6 ... 1.39	19	2.8 ... 2.97	197
<b>Сахалин:</b>					
<b>Новиково</b>	<b>7.07</b>	<b>1.2 ... 2.3</b>	<b>14</b>	<b>4.5 ... 5.6</b>	<b>170</b>
Оха	<b>6.12</b>	0.9 ... 1.87	<b>10</b>	<b>4.78 ... 5.85</b>	180
Тымовское	5.43	1 ... 1.83	20	3.49 ... 4.32	181
<b>Север:</b>					
Тикси	<b>6.52</b>	1 ... 1.99	<b>11</b>	<b>5.95 ... 6.94</b>	153
Айон	4.51	0.8 ... 1.56	27	3.84 ... 4.6	172
Усть-Оленек	6.09	0.63 ... 2.15	25	<b>5.95 ... 6.91</b>	147

высокой скоростью ветра (5–6 м/с) включают побережья Восточно-Сибирского, Чукотского морей и моря Лаптевых на севере и Японского моря на востоке.

В табл. 2 представлены данные ветропотенциала ряда поселков на Востоке и Севере России [32, 33].

Как видно, и на Сахалине, и на Камчатке есть большое количество поселков с высоким ветропотенциалом, особенно в прибрежной зоне. Их энергоснабжение осуществляется на основе дизель-электростанций, котельных и привозного топлива. Приведем пример использования электрохимических преобразователей энергии электролизеров и топливных элементов в альтернативной схеме энергоснабжения на основе ветрогенераторов без использования привозного топлива.

#### *Альтернативная схема энергоснабжения автономных потребителей*

Нами предложена альтернативная схема снабжения электрической и тепловой энергией автономных потребителей на основе парка ветрогенераторов и водородного аккумулирования энергии [33]. Схема обеспечивает гарантированное снабжение электрической и тепловой энергией автономных потребителей в точках с высоким потенциалом ветровой энергии, экологична и не требует использования привозного органического топлива (рис. 3).

Альтернативная схема содержит парк ветрогенераторов, размещенных локально в точках с высоким потенциалом ветра. Электрическая мощность, вырабатываемая ветрогенератором в данный момент, определяется текущей скоростью ветра и рассчитывается по кривой мощности ветрогенератора ( $N-W$ ), и после электрических преобразований распределяется приоритетно (рис. 3). В первую очередь в период слабого ветра (режим 1) удовлетворяется потребность в электрической энергии (реактивная нагрузка) согласно суточному графику нагрузки потребителя ( $N-t$ ). Если в текущий момент времени имеется избыток электрической энергии от ВЭУ (режим 2, средний ветер), то он идет на питание электрического бойлера (активная нагрузка), который является основным источником тепловой энергии и работает на покрытие тепловой нагрузки ( $Q-t$ ). Если потребность в электрической энергии и тепловой энергии в данный момент времени удовлетворена (режим 3, сильный ветер), то весь избыток электрической энергии (после AC/DC преобразования) идет на электролизер (реактивная емкостная нагрузка). Такие режимы возможны в период сильного ветра и в летний период, когда потребность в тепловой энергии минимальна. На этом режиме электролизная установка потребляет избыточную электроэнергию ветрогенератора и вырабатывает водород на следующие нужды:



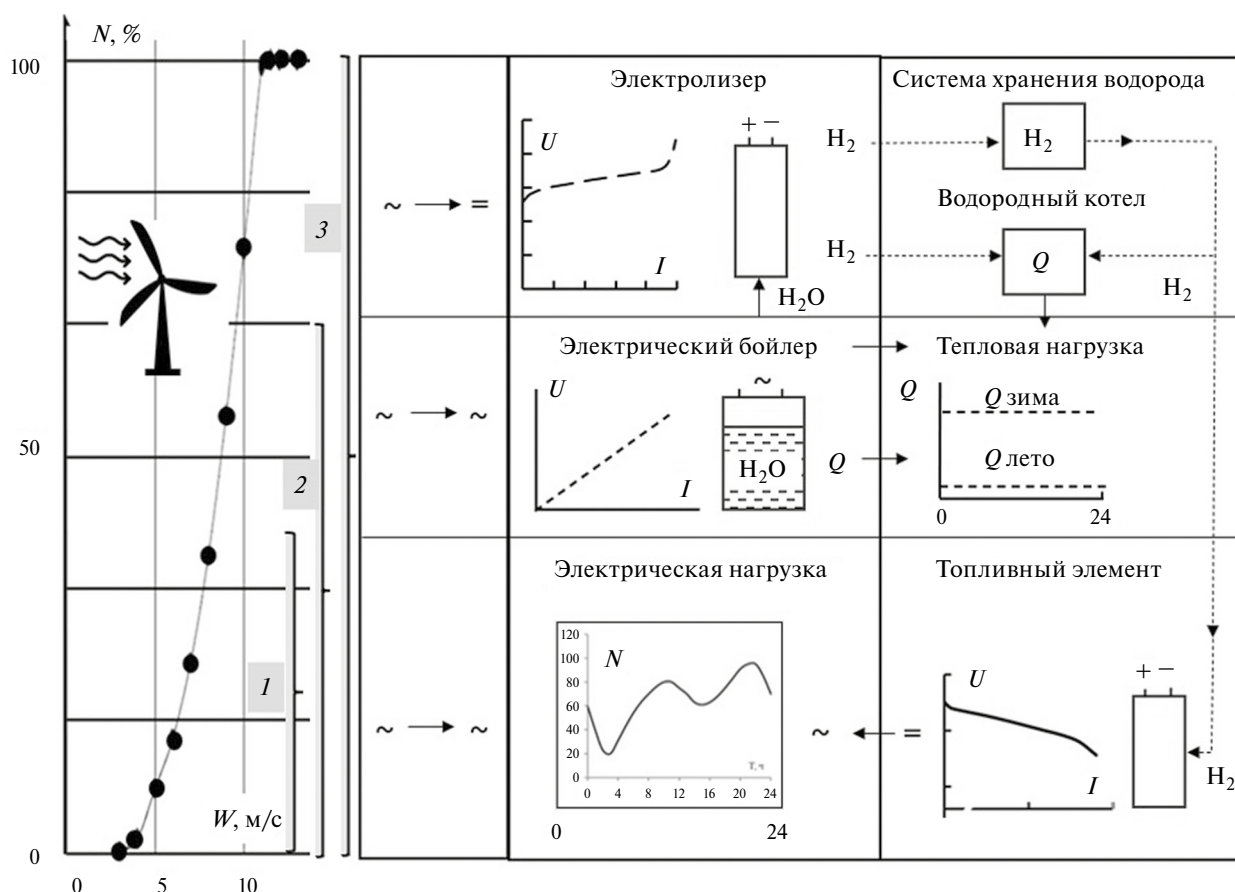


Рис. 3. Схема автономного электро-теплоснабжения на основе ветрогенератора, электрохимических преобразователей энергии и водородного накопления энергии. Режимы: 1 – слабый ветер; 2 – средний ветер; 3 – сильный ветер.

• “суточный водород” – накапливается в ресивере при давлении, совпадающем с рабочим давлением электролизера (как правило, 10–30 бар), или идет на топливный элемент для пополнения дефицита электрической энергии потребителя в период слабого ветра или безветрия;

• “сезонный водород” – накапливается в системе хранения водорода, когда текущая потребность в тепловой и электрической энергии удовлетворена. Также “сезонный” водород из системы хранения направляется в водородный котел для восполнения дефицита тепловой энергии в текущий момент времени. Такие режимы возможны в зимний период, когда дополнительная подача тепловой энергии осуществляется за счет сжигания запасенного водорода в конденсационных водородных котлах с КПД более 95%;

• “резервный водород” – накапливается в системе хранения водорода и расходуется для аварийного энергоснабжения потребителя с использованием топливных элементов и аварийного теплоснабжения с использованием водородного котла.

Исходные данные для расчета:

- ветропотенциал для данной географической точки для каждого часа текущих суток;
- суточные графики электрической и тепловой нагрузки потребителя;
- параметры используемого оборудования (ВЭУ, энергоустановок на топливных элементах, электролизных установок, компрессоров, систем хранения водорода, контроллеров, инверторов).

Для расчета схемы полного энергоснабжения автономного потребителя на основе ветрогенератора и водородного аккумулирования энергии важным является расчет с часовым лагом годового баланса энергии между генерируемой ВЭУ электрической энергией и потребляемой электрической и тепловой энергии:

$$\sum_{t=1}^{8760} \left( n_t^{wg} N_t^{wg} - N_t^{el} \eta^{in} - Q_t^{eb} / \eta^{eb} \right) \cdot \eta_t^{elz} t = \sum_{t=1}^{8760} \left( N_t^{fc} / \eta^{fc} + Q_t^{h2b} / \eta^{h2b} \right) t, \quad (1)$$

где:  $t = 8760$  ч (число часов в году);  $N_t^{wg}$  – средняя электрическая мощность, вырабатываемая одним ВГ в данный час, кВт;  $n_t^{wg}$  – количество



ветрогенераторов (определяется из расчета баланса энергии);  $N_t^{el}$  — средняя электрическая мощность, потребляемая в текущий час, кВт (определяется из суточного графика нагрузки потребителя);  $\eta^{in}$  — КПД инвертора;  $\eta_t^{elz}$  — КПД электролизера (с учетом зависимости КПД от текущей нагрузки);  $N_t^{fc}$  — средняя электрическая мощность, вырабатываемая топливным элементом в текущий час в период безветрия, кВт (определяется из суточного графика нагрузки потребителя);  $\eta^{fc}$  — КПД топливного элемента (с учетом зависимости КПД от текущей нагрузки);  $Q_t^{eb}$  — средняя тепловая мощность, потребляемая в текущий час электрическим бойлером, кВт (определяется из суточного графика тепловой нагрузки потребителя);  $\eta^{eb}$  — КПД электрического бойлера ( $\eta^Q > 0,98$ );  $Q_t^{h2b}$  — средняя тепловая мощность, потребляемая в текущий час водородным котлом, кВт (определяется из суточного графика тепловой нагрузки потребителя);  $\eta^{h2b}$  — КПД водородного конденсационного котла ( $\eta^Q > 0,95$ ).

В результате расчетов, проведенных по уравнению (1), можно найти необходимое количество ВЭУ  $n^{wg}$ , также количество и параметры оборудования, используемого в схеме энергоснабжения. При этом существенное влияние на расчет оказывают:

- вольт-амперные характеристики топливного элемента и электролизера (см. рис. 1а);
- учет зависимости КПД электрохимических преобразователей энергии от текущей нагрузки потребителя, которая в течение суток может меняться в широких пределах (см. рис. 1б);

- учет использования части накопленного водорода для получения потребителем дополнительной тепловой энергии (в водородной плите для приготовления пищи, либо в каталитическом водородном обогревателе);

- учет использования части накопленного водорода для получения потребителем электрической энергии в топливном элементе для восполнения дефицита в период безветрия и в случае необходимости для резервного энергоснабжения.

## РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

В качестве примера для расчета системы автономного энергоснабжения на основе ветрогенераторов и водородного аккумулирования энергии выбран реальный объект с. Новиково на о. Сахалин. Село расположено в 74 км от города Корсаков и в 130 км от города Южно-Сахалинск в южном направлении (рис. 4а). Население составляет 550 человек и занято в транспортной сфере, сфере услуг, в энергетике и рыбном промысле. По существующей схеме энергоснабжения село Новиково обеспечивается электроэнергией и теплом от энергоузла, не подключенного к общей энергосистеме острова Сахалин. Электроэнергия вырабатывается дизельной электростанцией (ДЭС). Себестоимость производимой электрической и тепловой энергии высока в связи с высокой стоимостью привозного закупаемого дизельного топлива.

Как показывает анализ табл. 1, исходя из климатических условий села Новиково, наибольший интерес для альтернативной схемы энергоснабжения представляет ветровая генерация

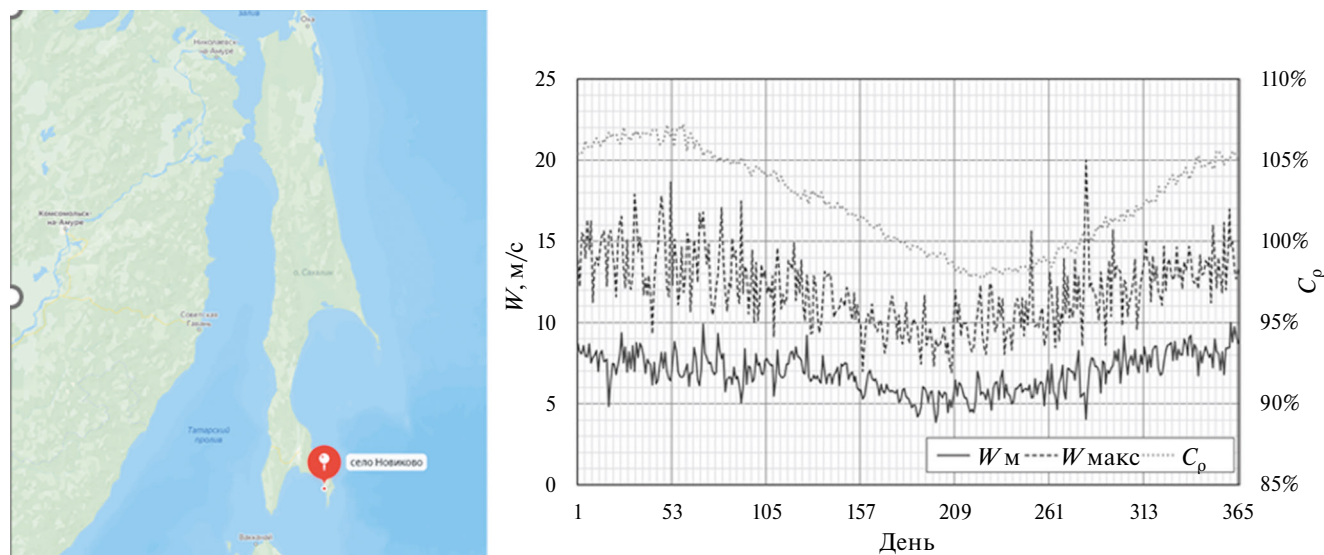


Рис. 4. Местонахождение автономного объекта п. Новиково и распределение скоростей ветра с поправкой на плотность воздуха (среднее за несколько лет).

электроэнергии. Важным является вопрос гарантированного снабжения электрической энергией поселка в часы безветрия, когда ветрогенератор не работает (скорость ветра — менее 3 м/с). Время безветрия для данной точки совокупно составляет всего 14 дней, т. е. примерно один день в месяц [33]. Для определения расчетных скоростей ветра в течение года использовали климатические базы данных NASA для высоты 50 метров [33]. Кроме этого, на значение генерируемой мощности вводилась поправка на плотность воздуха, которая зависит от температуры. Для этого использовалось распределение Вейбулла, хорошо себя зарекомендовавшее в описании вероятностных явлений метеорологии [34]. Поправка  $C_p$  (%) на плотность влажного воздуха  $\rho$  ( $\rho$  является функцией температуры, давления и относительной влажности) вычислялась при помощи библиотеки термодинамических свойств веществ CoolProp [35]. Для расчета бралась поправка  $C_p$  для каждого дня года, осредненная по всему периоду наблюдений. В результате обработки данных значения  $C_p$  были найдены для каждого дня календарного года. Данные значения представлены на рис. 46 в виде графика.

В расчете мощности ветропарка используются два вида скоростей:

- 1) скорость ветра  $W_{50}(d)$  по 50-му перцентилю (медиана), в зависимости от дня года  $d$ ;
- 2) максимальная скорость  $W_{95}$ , входящая в доверительный интервал  $P = 0.95$ .

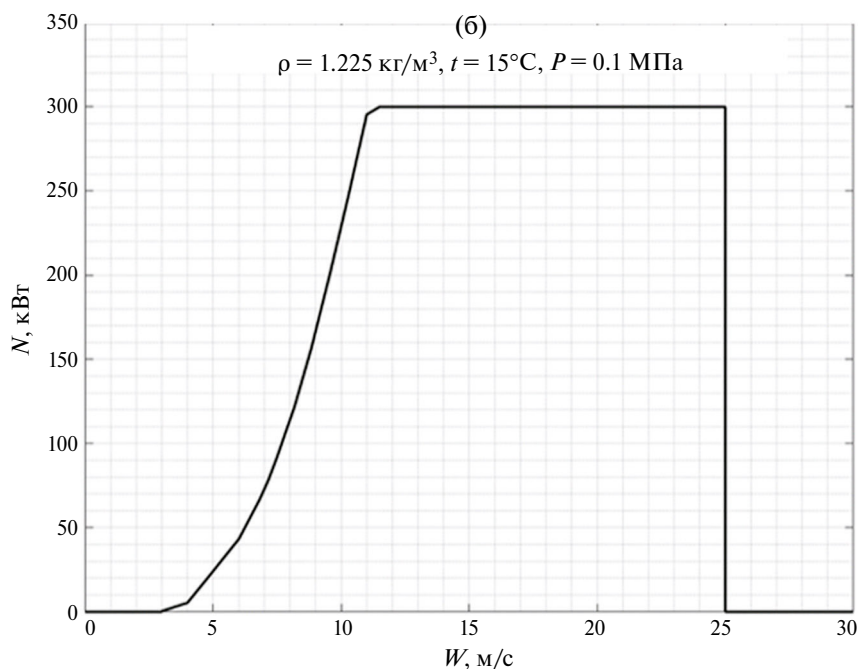


Рис. 5. Ветрогенератор KWT-300 (KOMAI HALTEC Inc.) для суровых климатических условий (а) и кривая мощности KWT-300 (б).

Из графиков видно, что значение поправки на плотность воздуха  $C_p$  меняется в течение года. Значение разницы между максимальными и минимальными значениями поправки, отнесенное к среднему значению за календарный год, равнялось 9.22%, что является весьма существенной величиной.

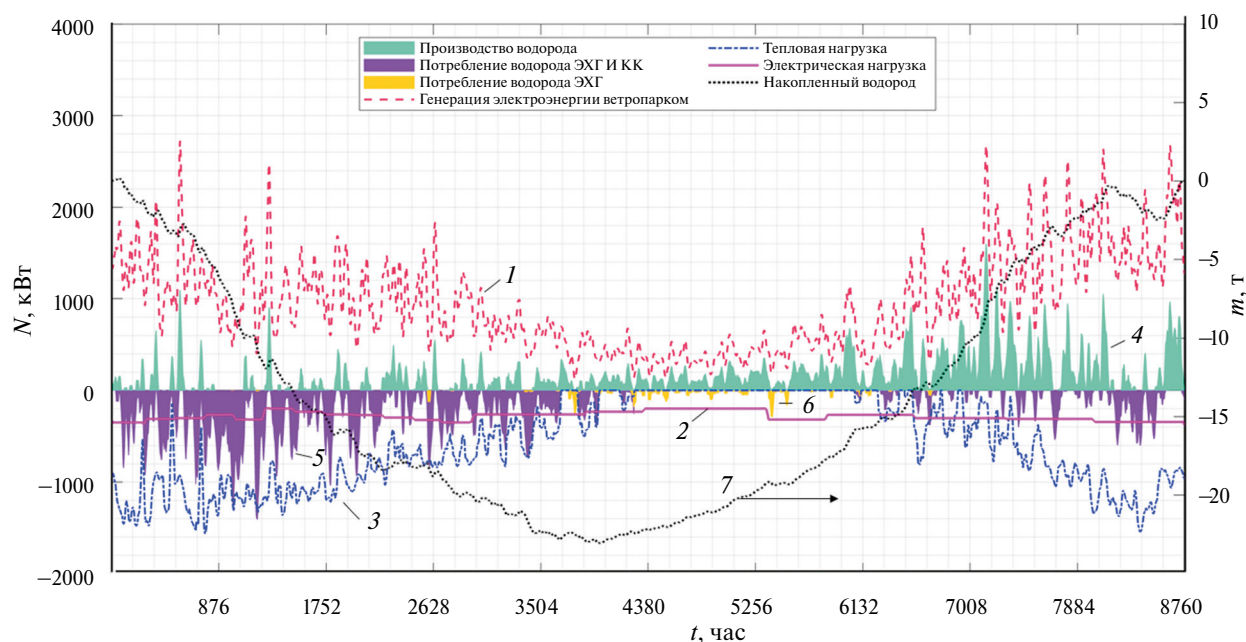
Из рис. 46 видно, что ветропотенциал в данной географической точке высокий, а в зимние месяцы существенно превосходит ветропотенциал летних месяцев.

Для расчета альтернативной схемы энергоснабжения выбран ветрогенератор KWT-300 (KOMAI HALTEC Inc.), разработанный специально для эксплуатации в суровых климатических условиях (рис. 5а). Его кривая мощности представлена на рис. 5б.

Высота башни ветрогенератора KWT-300 — 43 м, размах лопастей — 33 м. Данный ветрогенератор имеет значение скорости ветра страгивания (скорость, при которой начинается генерация)  $W = 3$  м/с. Генерирует максимальную мощность 300 кВт при  $W = 11.5$  м/с и выше. Предельная рабочая скорость ветра — 25 м/с. Выживаемость при скорости ветра по стандартам IEC Класс I  $W = 70$  м/с [36].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 6 приведены основные графики в годовом разрезе на основании расчета альтернативной схемы энергоснабжения с помощью балансного



**Рис. 6.** Годовые графики альтернативной схемы энергоснабжения с. Новиково (о. Сахалин). 1 – генерация электрической энергии ветропарком; 2 – электрическая нагрузка; 3 – тепловая нагрузка; 4 – производство водорода; 5 – потребление водорода ТЭ и КК; 6 – потребление водорода ТЭ; 7 – накопленный водород.

уравнения (1). В результате определено количество ветрогенераторов  $n^{wg}$ , необходимых для полного и гарантированного электроснабжения с. Новиково по альтернативной схеме. Также показано, какое количество электроэнергии генерируется ветропарком в течение года (кривая 1), показан типичный многолетний годовой график распределения электрической нагрузки (кривая 2) и тепловой нагрузки (кривая 3). Также приведен график суммарного потребления водорода в топливном элементе и водородном котле (кривая 5) и только в топливном элементе (кривая 6). Кривая 7 показывает распределение запасов и расходование накопленного водорода в течение года.

Анализ рис. 6. показывает, что распределение электрической нагрузки в течение года является равномерным и ее уровень существенно ниже, чем уровень тепловой нагрузки в зимние месяцы (почти в 4 раза). Для данного потребителя профиль годового графика распределения ветра совпадает с профилем тепловой нагрузки. Это является благоприятным фактором, т. к. позволяет в зимние месяцы больше избыточной электроэнергии от ветропарка направлять в электрические бойлеры для генерирования тепловой энергии и на электролизер для накопления водорода.

В результате расчета предложен вариант оборудования для реализации схемы:

1. Ветрогенератор KWT-300 по расчету  $n^{wg} = 14.7$  шт. Принимаем  $n^{wg} = 15$  шт. [36].

2. Электролизеры ПОМ ЭВ серии МС общей производительностью  $200 \text{ нм}^3 \text{ H}_2/\text{ч}$  (с учетом кратковременных режимов повышенной мощности ( $120\% \cdot N_{\text{ном.}}$ ) и ограничений в пиковые периоды) [21].

3. Энергоустановки на топливных элементах ПОМ ТЭ общей мощностью  $200 \text{ кВт}$  (с учетом кратковременных режимов повышенной мощности ( $120\% \cdot N_{\text{ном.}}$ ) [5].

4. Электробойлеры (локально) [37].

5. Водородные конденсационные котлы (локально) [38].

6. Система хранения водорода (ресивер при рабочем давлении электролизера, компримирование и баллонное хранение, металлгидридное хранение) [5, 6].

7. Система подготовки воды (обратный осмос, ионный обмен) [6].

Выбор оборудования для альтернативной схемы не является предметом статьи, он определяется исходя из конкретной реализации. Нужно также учитывать, что ветропотенциал в данной географической точке изменяется от года к году. В табл. 3 показано, как изменяется количество ветрогенераторов по результатам балансного расчета. Это нужно учитывать при выборе количества ветрогенераторов в конечной схеме. В данном расчете не учитывалась поправка  $C_p$ .

Как видно из табл. 2, количество ветрогенераторов в схеме для значений ветропотенциала различных лет ниже, чем для проведенного

**Таблица 3.** Количество ветрогенераторов в схеме для значений ветропотенциала различных лет

Год	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
$n^{wg}$	12.5	12.8	13.2	11.1	11.3	11.9	14.2	13.1	11.9	12.3	12.3	13.3
год	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	—
$n^{wg}$	11.8	12.7	12.3	12.2	13.7	13.5	13.0	13.9	12.4	11.2	12.4	

балансного расчета по формуле (1), в котором учитывалась поправка  $C_p$  на плотность влажного воздуха  $\rho$  при различных температурах ( $n^{wg} = 14.7$  шт.). Если среднегодовые температуры для другой географической точки будут существенно отрицательнее температур, при которых определена кривая мощности ветрогенератора (в данном случае  $\rho = 1.225 \text{ кг/м}^3$ ,  $t = 15^\circ\text{C}$ ,  $P = 0.1 \text{ МПа}$ ), то учет поправки  $C_p$  будет приводить к увеличению реального ветропотенциала и снижению необходимого количества ветрогенераторов.

Важным параметром, определяющим эффективность использования оборудования, предложенного в альтернативной схеме, является коэффициент использования установленной мощности (**КИУМ**) энергетического оборудования. КИУМ равен отношению фактической выработки энергоустановки за определенный период эксплуатации (обычно за 1 год) к максимальной теоретически возможной при работе без остановок на режиме номинальной мощности (в процентах) [6]. Проведенные расчеты для альтернативной схемы рассматриваемого автономного объекта показали следующие значения КИУМ: ветрогенератор — 27.8%, электрический бойлер — 57.2%, электролизер — 10.4%, водородный котел — 22.2%. Таким образом, используемое в альтернативной схеме оборудование работает периодически и также на режимах частичной мощности. Однако в данной альтернативной схеме энергоснабжения важно, что фактический КИУМ ветрогенератора существенно возрастает за счет использования вместе с ним электробойлера и электролизера, т. е. для генерации тепловой энергии. Для электрохимических преобразователей энергии (топливные элементы и электролизеры) режимы частичной мощности энергоэффективны, так как показывают более высокий КПД по сравнению с режимом номинальной мощности (см. рис. 1б). Все используемое оборудование альтернативной схемы экологично, так как не дает выбросов токсичных веществ, имеет низкий уровень шума. Это является существенным преимуществом перед традиционными схемами энергоснабжения на основе использования привозного топлива и его сжигания в дизель-электростанциях и котельных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время производство электрической энергии в изолированных и труднодоступных территориях Дальневосточного федерального округа осуществляется на дизельных электростанциях, работа которых связана с существенными затратами на закупку и завоз дизельного топлива. Цены на дизельное топливо растут темпом, в 2 раза опережающим темп роста инфляции.

В результате расчета схемы альтернативной электроснабжения с. Новиково на основе ветропарка и водородного аккумулированием энергии показано, что она может обеспечить основное и резервное электроснабжение, а также теплоснабжение за счет избытка электроэнергии ветрогенераторов и использование его в электрических бойлерах и водородных конденсационных котлах. Определены параметры и рассмотрен вариант используемого оборудования для реализации схемы.

Для эффективной реализации альтернативной схемы необходимо правильно выбрать энергоизолированный объект, в частности: 1) ветропотенциал должен быть высоким, и его внутригодовое распределение должно максимально совпадать с графиком нагрузки потребителя; 2) годовой график потребления электрической нагрузки не должен иметь максимумов в период минимального ветропотенциала; 3) потребитель должен находиться в зоне, где минимальны периоды слабого ветра, а сам график распределения ветра имел продолжительные периоды в диапазоне скоростей ветра 4–8 м/с; 4) целесообразно использовать конструкции ВЭУ, которые эффективно работают при малых скоростях ветра.

Схемы автономного энергоснабжения на основе ветрогенераторов являются более перспективными в прибрежных энергоизолированных районах РФ, в частности, на Дальнем Востоке.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность студентам и выпускникам НИУ МЭИ, которые принимали участие на ранней стадии исследования.



## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа проводилась в рамках ПНИ “Приоритет 2030: Технологии будущего” (ПНИ НИУ “МЭИ” 2024/26) секция 2.

Рукопись подготовлена по материалам приглашенного доклада на “Всероссийской конференции по электрохимии-2023”.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов

## ИНФОРМАЦИЯ О ВКЛАДЕ АВТОРОВ

Автор С.И. Нефедкин является автором идеи, провел теоретические расчеты, анализировал полученные результаты, написал текст; авторы В.Д. Михневич и Я.В. Исаев проводили расчеты и обрабатывали данные; авторы В.Е. Елецких и М.А. Климова обрабатывали результаты расчетов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/> IRENA. Accessed June 26, 2024.
2. <https://techxplore.com/news/2024-01-spain-generated-power-renewables.html>. Accessed June 26, 2024.
3. Nova Wind. <https://novawind.ru/production>. Accessed June 2, 2024.
4. Atomic expert. [https://atomicexpert.com/novawind\\_rosatom](https://atomicexpert.com/novawind_rosatom). Accessed June 26, 2023.
5. Водородная энергетика: учебник / Н.В. Кулешов, С.К. Попов, С.В. Захаров [и др.]; под ред. Н.В. Кулешова. М.: Изд-во МЭИ, 2021. 547 с. [Hydrogen energy: textbook / N.V. Kuleshov, S.K. Popov, S.V. Zakharov [and others]; edited by N.V. Kuleshov: MPEI Publishing House, 2021. — 547 p.] ISBN 978-5-7046-2438-7
6. Нефедкин, С.И. Автономные энергетические установки и системы: М.: Изд-во МЭИ, 2018. 220 с. ISBN 978-5-7046-1847-8 [Nefedkin, S.I., Autonomous power plants and systems: M.: MPEI Publishing House, 2018. 220 p.]
7. Коровин, Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки/ Н.В. Коровин. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 280 с. [Korovin, N.V. Fuel cells and electrochemical power plants: M.: MPEI Publishing House, 2005. 280 p.]
8. *Fuel Cell Systems Explained*, Third Edition. Andrew L. Dicks and David A.J. Rand. John Wiley & Sons Ltd. Published, 2018, 496 p. ISBN: 978-1-118-70696-1
9. Topley, J. and Lehmann J.(eds.), *Hydrogen and Fuel Cell*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016, 391 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44972-1>
10. Химические источники тока: Справочник. Под ред. Н.В. Коровина, А.М. Скундина. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 740 с. [Chemical sources of current: Handbook / Edited by N.V. Korovin, A.M. Skundin. M.: MPEI Publishing House, 2003. 740 p.] ISBN 5-7046-0899-x
11. Volfkovich, Yu.M., Supercapacitors: problems and prospects of development, *Russ. Chem. Rev.*, 2022, vol. 91(8), RCR5044. <https://doi.org/10.1070/RCR5044>
12. Afif, A., et al., Advanced materials and technologies for hybrid supercapacitors for energy storage, a review, *J. Energy Storage*, 2019, vol. 25, 100852. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100852>
13. Cicconi, P. and Kumar, P., Design approaches for Li-ion battery packs: A review, *J. Energy Storage*, 2023, vol.73, Part D, 109197. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109197>
14. Kulkarni, P., Jung, H., Ghosh, D., Jalalah, M., Alsaiari, M., Harraz, F.A., and Balakrishna, R. G., A comprehensive review of pre-lithiation/sodiation additives for Li-ion and Na-ion batteries, *J. Energy Chem.*, 2023, vol. 76, p. 479. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2022.10.001>
15. Попель, О.С. Современные виды электрохимических накопителей электрической энергии и их применение в автономной и централизованной энергетике. *Теплоэнергетика*. 2020. № 11. С. 2. [Popel, O.S., Modern types of electrochemical electrical energy storage devices and their application in autonomous and centralized energy, *Thermal power engineering*, 2020, no. 11, p. 2.]
16. Craddock, E., Cuéllar-Franca, R., Pérez-Page, M., The incorporation of 2D materials into membranes to improve the environmental sustainability of vanadium redox flow batteries (VRFBs): A critical review, *Curr. Opin. Chem. Eng.*, 2023, vol. 40, 100906. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2023.100906>
17. Lourenssen, K., Williams, J., Ahmadvour, F., Clemmer, R., and Tasnim, S., Vanadium redox flow batteries: a comprehensive review, *J. Energy Storage*, 2019, vol. 25, Article 100844. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100844>
18. Konno, N., Mizuno, S., Nakaji, H., and Ishikawa, Y., Development of Compact and High-Performance Fuel Cell Stack, SAE Int., *J. Alt. Power*, 2015, vol. 4 (1), p. 123. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1175>
19. Market Research Future Source. <https://www.marketresearchfuture.com>. Accessed June 12, 2023.
20. Grigoriev, S.A., Fateev, V.N., Bessarabov, D.G., and Millet, P., Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2020, vol. 45, p. 26036. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.109>
21. Nel hydrogen. <https://nelhydrogen.com>. Accessed March 2, 2024.
22. Григорьев, С.А. Обратимые электрохимические системы с твердым полимерным электролитом. *Электрохим. энергетика*. 2009. Т. 9. № 3. С. 128.

- [Grigoriev, S.A., Reversible electrochemical systems with solid polymer electrolyte, *Electrochemical energy*, 2009, vol. 9, no. 3, p. 128.]
23. Bernal-Agustin, J.L. and Dufo-Lopez, R., Hourly energy management for grid-connected wind-hydrogen systems, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2008, vol. 33, p. 6401.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.08.026>
  24. Garcia, P., Torreglosa, J.P., Fernandez, L.M., and Jurado, F., Optimal energy management system for stand-alone wind turbine/photovoltaic/hydrogen/battery hybrid system with supervisory control based on fuzzy logic, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2013, vol. 38, p. 14146.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.08.106>
  25. Solarpanel today. <https://solarpanel.today/top-5-programs-for-modeling-solar-power-plants>. Accessed March 1, 2024.
  26. <https://web.archive.org/web/20121002195722/http://alternativenenergy.ru/raschet-vetrogeneratora.html>. Accessed March 12, 2024.
  27. Etap. <https://etap.com/ru/product/wind-turbine-generator-software>. Accessed March 2, 2024.
  28. Etap. [https://etap.com/ru/solutions/grid co](https://etap.com/ru/solutions/grid-co). Accessed March 2, 2024.
  29. *Энергетический бюллетень*. М: Аналитический центр при Правительстве РФ, 2017. № 49. С. 27. [Energy Bulletin. M: Analytical Center under the Government of the Russian Federation, 2017, no. 49, 27 p.].  
<http://ac.gov.ru/files/publication/a/13570.pdf>
  30. Лазарев, А.Н., Захаренко, В.А., Меньшенин, А.Л., Гром, Ю.И., Сергеев, Г.С. Автономная ветродизельная электрическая установка мощность 10кВт. *Вопросы электромеханики*. 2015. Т. 148. С. 43. [Lazarev, A.N., Zakharenko, V.A., Menshenin, A.L., Grom, Yu.I., and Sergeev, G.S., Autonomous wind-diesel electric installation with a power of 10 kW, *Questions of electromechanics*, 2015, vol. 148, p. 43.]
  31. Попель, О.С. Возобновляемые источники энергии: роль и место в современной и перспективной энергетике. *Рос. хим. журн.* (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2008, Т. LII, № 6. С. 95. [Popel, O. S., Renewable energy sources: role and place in modern and promising energy, *Russian Chemical Journal* (J. Russian Chemical Society named after D.I. Mendeleev), 2008, vol. LII, no. 6, p. 95.]
  32. NASA. <https://power.larc.nasa.gov>. Accessed June 22, 2018.
  33. Нефедкин, С.И., Барсуков, А.О., Мозгова, М.И., Шичков, М.С., Климова, М.А. Автономное энергоснабжение с использованием ветроэнергетического комплекса и водородного аккумулирования энергии. *Альтернативная энергетика и экология* (ISJAE). 2019. Т. 16–18. С. 12. [Nefedkin, S.I., Barsukov, A.O., Mozgova, M.I., Shichkov, M.S., and Klimova, M.A., Autonomous energy supply using a wind energy complex and hydrogen energy storage, *Alternative Energy and Ecology* (ISJAE), 2019, vol. 16–18, p. 12.]  
<https://doi.org/10.15518/isjaee>
  34. Беляков, П.Ю. Ветроэнергетика: теоретические основы и технические решения: Учеб. пособие. Изд-во: Международный институт компьютерных технологий. Воронеж. 2007. 121 с. [Belyakov, P. Yu., Wind energy: theoretical foundations and technical solutions. Tutorial. Publisher: International Institute of Computer Technologies. Voronezh, 2007, 121 p.] ISBN: 5-98858-012-2
  35. «Welcome to Cool Prop – cool Prop 6.4.3 documentation”. <http://www.coolprop.org/index.html>. Accessed June 22, 2023.
  36. <https://www.komaihaltec.co.jp/> Accessed June 22, 2018.
  37. Heat leader. <https://lidertepla.ru>. Accessed July 29, 2023.
  38. Giacomini. [https://static.giacomini.com/giacomini.com/catalog/technical\\_documentation/CCF01.pdf](https://static.giacomini.com/giacomini.com/catalog/technical_documentation/CCF01.pdf). Accessed July 20, 2023.