

EDN: PAYALD

УДК 621.31

Analysis of the Possibility of Using Decentralized Power Supply Systems in the Conditions of the Republic of Tatarstan

Antonina A. Filimonova*,
Aleksandr S. Cherkasov and Natalia D. Chichirova
*Kazan State Power Engineering University
Kazan, Russian Federation*

Received 01.04.2024, received in revised form 06.04.2024, accepted 06.06.2024

Abstract. This article provides a qualitative and quantitative analysis of the possibility of using various decentralized energy systems in the Republic of Tatarstan. The cost of generated electricity for such installations as: gas piston unit, solid oxide fuel cell, wind generator, diesel generator and solar photovoltaic panels was calculated. The advantages and disadvantages of the considered power plants are revealed.

Keywords: decentralized power supply, mini-CHP, solid oxide fuel cell, gas piston unit, wind generator, diesel generator, photovoltaic panel.

Acknowledgements. The results were obtained with the financial support of the Ministry of Education and Science “Study of processes in a hybrid power plant fuel cell-gas turbine” (project code: FZSW-2022–0001).

Citation: Filimonova A. A., Cherkasov A. S., Chichirova N. D. Analysis of the possibility of using decentralized power supply systems in the conditions of the Republic of Tatarstan. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(4), 447–463. EDN: PAYALD



Анализ возможности применения децентрализованных систем энергоснабжения в условиях Республики Татарстан

А. А. Филимонова, А. С. Черкасов, Н. Д. Чичирова
*Казанский государственный энергетический университет
Российская Федерация, Казань*

Аннотация. В данной статье произведен качественный и количественный анализ возможности применения различных децентрализованных энергосистем в условиях Республики Татарстан. Произведен расчет себестоимости вырабатываемой электрической энергии для таких установок, как газопоршневой агрегат, твердооксидный топливный элемент, ветрогенератор, дизельный генератор и солнечные фотоэлектрические панели. Выявлены преимущества и недостатки рассматриваемых энергетических установок.

Ключевые слова: децентрализованное энергоснабжение, мини-ТЭЦ, твердооксидный топливный элемент, газопоршневой агрегат, ветрогенератор, дизельный генератор, фотоэлектрическая панель.

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

Цитирование: Филимонова А. А. Анализ возможности применения децентрализованных систем энергоснабжения в условиях Республики Татарстан / А. А. Филимонова, А. С. Черкасов, Н. Д. Чичирова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(4). С. 447–463. EDN: PAYALD

Введение

Развитие цивилизации непосредственно зависит от технического прогресса. Вследствие этого постоянно увеличивается энергопотребление как промышленными предприятиями, так и социальной инфраструктурой, и объектами ЖКХ. Отсюда вытекает необходимость искать все новые источники энергии, которые при этом удовлетворяли бы требованиям высокой надежности, экономичности и обладали бы высокими экологическими характеристиками, то есть наносили окружающей среде минимальный ущерб. В настоящее время в энергетике развиваются как энергетические установки большой мощности, работающие в системе централизованного производства электрической и тепловой энергии, так и децентрализованные энергетические системы с источниками энергии малой мощности. К перспективным мощным энергоустановкам централизованной выработки электрической и тепловой энергии можно отнести парогазовые установки (ПГУ) и ядерную энергетику.

На нынешнем уровне развития ПГУ имеют высокую единичную мощность блоков (дубль-блоков) до 800 МВт, низкие выбросы вредных веществ в атмосферу, по сравнению с сжиганием угля или мазута в энергетических котлах [1]. Кроме того, парогазовые установки имеют большую маневренность, по сравнению с обычными паротурбинными установками, а высокий уровень автоматизации позволяет обеспечить более надежную и безаварийную работу по ведению режима и сократить численность оперативного персонала, задействованного при эксплуатации энергетической установки.

Ядерная энергетика развивается по пути увеличения единичной мощности энергоблоков с водо-водяными реакторами на тепловых нейтронах и реакторами на быстрых нейтронах

с жидким металлическим теплоносителем 1-го контура, с целью замыкания ядерного цикла, что, в свою очередь, позволит получить практически безотходный технологический процесс по выработке электрической энергии [2]. К слову, необходимо заметить, что также идет процесс разработки ядерных реакторов малой мощности, но область их применения будет ограничена вследствие высоких требований к безопасности эксплуатации.

Однако прогресс и инновации в области энергетики, как уже ранее было упомянуто, не ограничиваются только централизованными системами. Децентрализованные энергосистемы способны обеспечивать электрической и тепловой энергией небольшие производственные предприятия, отдалённые населённые пункты, отдельные домохозяйства или объекты ЖКХ, а также быть резервным источником питания для жизненно необходимых объектов, запитанных от централизованного энергоснабжения.

Актуальность

Республика Татарстан входит в перечень наиболее экономически и технологически развитых регионов России. Энергетика как одна из фундаментальных отраслей экономики также находится на передовых позициях. Так, например, на всех ТЭЦ столицы Татарстана города Казани установлены парогазовые установки, являющиеся одной из наиболее современных тенденций в развитии комбинированной выработки тепловой и электрической энергии [3]. На Нижнекамской ТЭЦ-1 используется газотурбинная установка, работающая на смеси природного газа и отходов промышленного предприятия Нижнекамскнефтехим, таким образом, достигается высокий экономический и экологический эффект при производстве электроэнергии [4]. Также развивается атомная и водородная энергетика, в республике к 2035 г. планируется строительство АЭТС (атомной электротехнологической станции), которая будет с применением атомной энергии производить более 400 000 тонн водорода высокой чистоты с улавливанием углекислого газа, что, в свою очередь, поспособствует развитию уже водородной энергетики [5]. В области энергетики ЖКХ в Казани большая часть зданий переведена на отопление с применением индивидуальных тепловых пунктов взамен центральных [6]. Это позволяет увеличить экономичность для жильцов и обеспечить более качественное регулирование тепловой нагрузки здания. В рамках имеющейся траектории развития энергетики Татарстана замечается и высокий интерес к децентрализованным системам энергоснабжения. Применение таковых может быть направлено на энергоснабжение отдельных жилых и общественных зданий как в качестве основного, так и в качестве резервного источника энергии. Поскольку имеются различные варианты децентрализованных источников энергии, то необходимо проанализировать различные из них с точки зрения эффективного применения в условиях Республики Татарстан.

Обзор литературы

1. Твердооксидные топливные элементы

Так, одним из перспективных направлений развития децентрализованных источников энергоснабжения являются топливные элементы и различные комбинированные энергоустановки на их основе или с их использованием. Твердооксидный топливный элемент (ТОТЭ) обеспечивает выработку электрической энергии электрохимическим путем, используя в качестве топлива кислород и водород. Водород необходимый для работы ТОТЭ можно получить из раз-

личных иных видов топлива, например путем паровой конверсии метана. В процессе функционирования топливного элемента, где газообразный кислород попадает на участок топливного элемента катод/электролит, происходит взаимодействие атомов со свободными электронами в катоде, благодаря чему создаются заряженные ионы кислорода. Затем данные ионы кислорода проникают через слой электролита к аноду, чтобы начать реакцию с окисленным топливом, которая ведет к высвобождению большого числа электронов и выделению чистой воды в качестве побочного продукта. В итоге электрическая энергия образуется за счет прохождения электронов по внешнему проводу, а вода ликвидируется через выходное отверстие. Границы раздела между уложенными друг на друга материалами обязаны быть прочными и химически и механически совместимыми для протекания окислительно-восстановительных реакций. Кроме обеспечения поддержки и усиления поверхностных химических реакций материалы анода и катода должны обеспечивать проводящий путь для собирания электрических зарядов, выделяющихся во время реакций. Для этого в качестве электродов в основном встраиваются термостойкие металлические решетки для удаления зарядов от анода элемента к катоду через выбранную нагрузку. Электролитом служит твердый цирконий, стабилизированный иттрием [7]. Кроме того, существуют топливные элементы с протонообменной мембраной на основе ортофосфорной / фосфорной кислоты, на основе расплавленного карбоната лития и натрия, щелочные, с прямым окислением метанола, с прямым окислением этанола, воздушно-цинковый ТЭ и др. Однако они на данном этапе развития не являются столь перспективными и имеют ряд ограничений по сравнению с ТОТЭ [8].

Мощность твердооксидных топливных элементов на данный момент может достигать 250 кВт. Электрический КПД такого источника энергии может быть до 50 %, а при комбинированной выработке электрической и тепловой энергии превысить 65 %. Рабочая температура будет определяться в промежутке от 600 до 1000 С° [9].

Примером комбинированной энергетической установки на основе твердооксидного топливного элемента может стать его использование совместно с газовой турбиной. В установке данного типа будут иметься следующие узлы: система подготовки топлива, преформер газообразных углеводородов с буферной емкостью для водорода, блок ТОТЭ с силовой электролитом, газовая микротурбина, блок аккумуляторных батарей, установка утилизации теплоты и блок декарбонизации отходов. Данная система будет вырабатывать как электрическую, так и тепловую энергию, то есть будет когенерационной. В качестве топлива может быть использован как природный газ (метан), так и побочные продукты нефтехимического производства, так как после прохождения парового риформинга из исходного топлива выделяется необходимый для работы ТОТЭ водород. Пример принципиальной тепловой схемы одной из возможных компоновок такой установки приведен на рис. 1.

Основная цель заключается в том, чтобы оценить эффективность применения децентрализованной системы энергоснабжения с применением энергоустановки на основе топливного элемента по сравнению с применением какого-либо иного генерирующего оборудования. Так, для сравнения возьмем следующие модели децентрализованных систем энергоснабжения: энергоустановка на основе ТОТЭ, газопоршневой агрегат (ГПА), дизель-генератор, ветрогенератор, солнечные панели и тепловой насос. Для начала сравним общие пределы характеристик, предельных значений, особенностей эксплуатации, а затем уже перейдем

Топливом для таких установок служит природный газ. В процессе сжигания газа происходит расширение продуктов сгорания, при этом продукты сгорания совершают механическую работу по перемещению поршней, которые посредством механических связей с ротором генератора передают ему механическую энергию, которая в электрогенераторе по закону электромагнитной индукции позволяет получить переменный электрический ток. Так как в процессе сжигания топлива образуются дымовые газы высокой температуры, а также выделяется тепло при механической работе подвижных элементов установки, с установки можно получить и тепловую энергию путем нагрева теплоносителя сначала в теплообменнике контура охлаждения механизмов, а затем в газо-водяном теплообменнике утилизации теплоты продуктов сгорания топлива. Данные агрегаты применяются в различных децентрализованных энергосистемах, таких как резервные или основные источники небольших промышленных предприятий, в отдаленных населенных пунктах в условиях Крайнего Севера и т.д. Необходимо отметить, что для функционирования такого источника энергии необходимо наличие магистрального газопровода для подвода топливного газа и газорегуляторного пункта.

ГПА имеют следующие преимущества:

- Доступность на рынке;
- Быстрый пуск/останов;
- Возможность автономной работы;
- Комбинированная выработка электрической и тепловой энергии.

Недостатками являются:

- При отсутствии выработки теплоты требуется охлаждение;
- Высокая громкость шума низкой частоты;
- Высокое соотношение массы и установленной мощности;
- Относительно малая единичная мощность агрегата.

3. Дизельные генераторы

Далее обратим внимание на такой децентрализованный источник энергии, как дизель-генератор. Данные устройства уже давно получили широкое распространение для энергообеспечения удаленных объектов в качестве резервных источников питания, при выполнении строительных работ для питания электроинструмента, в качестве резервного источника для важных социальных объектов (больницы, детские учреждения и т.д.) и в том числе для бытовых нужд. Доступность на рынке различных по мощности зарубежных и отечественных агрегатов делает их достаточно доступными для потребителей. Основным элементом такой установки является двигатель внутреннего сгорания, работающий на дизельном топливе по одноименному термодинамическому циклу. Двигатель имеет механическую связь с электрогенератором. Установки имеют, как правило, блочное исполнение, блок оборудуется кроме основного оборудования системой охлаждения, топливным хозяйством и автоматикой. Бывают стационарные и мобильные дизель-генераторные установки [11].

Топливо можно хранить в канистрах или более крупных специализированных емкостях, и оно может быть доставлено любым видом транспорта, что делает такой источник энергии достаточно независимым.

4. Ветрогенераторы

Возобновляемые источники энергии также нашли свое место в децентрализованных энергосистемах. Особо привлекательными их делает отсутствие необходимости какого-либо топлива, и как следствие, затрат на него. Так, одним из перспективных возобновляемых источников может быть энергия ветра. В Республике Татарстан проводились исследования по возможностям использования ветрового потенциала региона для генерации электрической энергии. Исследования проводил Казанский государственный энергетический университет. Установка системы анализа ветровых потоков при помощи устройства NiMast класса 1 высотой 100 м (производства ООО АГИС-Инжиниринг) осуществлялась в Камско-Устьинском (с. Красновидово), в Спасском (с. Измери) и в Рыбно-Слободском (с. Малая Елга) районах Республики Татарстан. Одна вышка монтируется на гладкой поверхности, две другие на поверхности с не очень ровной структурой рельефа. Далее изучается результат со всех вышек и проводится сравнение результатов исследования движения воздушных масс (ветров). На основании измерений был выявлен самый мощный по энергопотенциалу Спасский район РТ вблизи с. Измери, где имеется потенциал для размещения ветропарка большей мощности – до 150 МВт. Меньшей мощности ветропарк предполагается построить в Рыбно-Слободском районе (с. Малая Елга) и еще меньшей – в Камско-Устьинском районе (с. Красновидово) [12].

Физические основы работы и устройство ветрогенератора крайне просты. Турбина, приводимая в движение энергией ветра, воздействует на электрогенератор, который производит электрическую энергию. Поскольку работа такой установки зависит от погодных условий, вытекает проблема невозможности контролировать режим работы данной энергетической установки. Для компенсации провалов мощности в безветренный период необходимо использование аккумуляторных батарей (АКБ). Для контроля работы батарей необходим контроллер заряда, а для применения энергии из АКБ необходим выпрямитель для заряда батарей, а также инвертор, чтобы получить из постоянного тока аккумуляторных батарей ток переменный, потребляемый большинством электроприборов. Кроме того, установка такого вида источника децентрализованного энергоснабжения требует учета климатических условий региона, а именно учета розы ветров [13].

5. Солнечная энергетика

Еще одним распространённым возобновляемым источником может быть солнечная энергия. Так, в Татарстане среднегодовое количество часов, когда солнце обеспечивает достаточное для работы фотоэлектрических панелей, количество излучения находится в диапазоне 2,8–3,3 кВт · ч/м². В то время как среднее значение той же величины для Подмоскovie составляет только 2,3 кВт · ч/м² [14]. Как видим, имеется потенциал и для становления солнечной энергетикой в Татарстане. Принципиально данный вид возобновляемой энергетикой основан на преобразовании энергии падающих солнечных лучей в электрический ток при помощи фотоэлектрических панелей. Их принцип действия основан на применении кремния с разной валентностью, в результате чего при поглощении светового излучения происходит переход электронов с одних атомов к другим, у которых имеются свободные энергетические уровни, в результате чего возникает электрический ток. Особенностью работы такой энергоустановки также является зависимость от погодных условий, в данном случае – от времени суток. Та-

ким образом, при внедрении солнечных панелей необходимо учитывать особенность региона, а именно число солнечных дней в году и продолжительность светового дня. Невозможность постоянной работы и контроля режима выработки электрической энергии приводит к необходимости использования аккумуляторных батарей и сопутствующего оборудования, такого как инвертор и контроллер заряда АКБ.

Материалы и методы

Решение задачи по выбору источника децентрализованного энергоснабжения имеет как качественную, так и количественную составляющую. Под качественной составляющей данной задачи подразумевается качественный анализ различных децентрализованных источников энергии с точки зрения и достоинств, и недостатков.

Количественный анализ, представленный в табл. 1, подразумевает сравнение средних количественных технических характеристик для различных децентрализованных систем электроснабжения и расчет себестоимости электрической энергии, вырабатываемой данной энергосистемой.

Расчет данного показателя выполнялся в программе MS Excel. Так, для определения себестоимости использовалась следующая формула:

$$S = \frac{(\text{капитальные затраты} + \text{эксплуатационные затраты}) \cdot 1000000}{8760 \cdot t \cdot \text{КИУМ} \cdot N_s},$$

где 8760 – число часов в году, t – время эксплуатации оборудования в годах, КИУМ – коэффициент использования установленной мощности, N_s – установленная электрическая мощность в кВт.

В качестве условия решаемой технической задачи была принята номинальная электрическая мощность децентрализованной энергоустановки, равная 50 МВт.

Результаты исследования

Исходя из теоретического исследования, проведенного в обзоре литературы, были получены выводы о преимуществах и недостатках различных децентрализованных источников энергоснабжения. Данные результаты представлены в табл. 2.

В ходе расчетного исследования была определена себестоимость электрической энергии, вырабатываемой различными децентрализованными энергосистемами. Для определения се-

Таблица 1. Количественный анализ децентрализованных систем энергоснабжения

Table 1. Quantitative analysis of decentralized energy supply systems

Наименование источника энергии	№, кВт	КПД (электрический)	КПД (тепловой)	Срок эксплуатации, лет	Время работы ч/год	КИУМ
ТОТЭ	0,05–250	До 50 %	До 65 %	10	7884	0,9
ГПА	50–20000	До 45 %	До 50 %	20	7884	0,9
Ветроэнергетическая установка	5–8000	До 40 %	-	15–25	2628	0,3
Фотоэлектрические панели	0,1–0,56	До 21 %	-	25	1664	0,19
Дизель-генератор	20–3000	До 40 %	-	20	7884	0,9

Таблица 2. Качественный анализ децентрализованных систем энергоснабжения

Table 2. Qualitative analysis of decentralized energy supply systems

Наименование источника энергии	Преимущества	Недостатки
Фотоэлектрические панели [14]	<ol style="list-style-type: none"> 1) общедоступность и неисчерпаемость солнечной энергии; 2) длительный срок службы без ухудшения эксплуатационных характеристик; 3) не требуют дополнительного топлива; 4) наличие возможности модульного наращивания мощности 	<ol style="list-style-type: none"> 1) невысокий КПД (средний – 12 %); 2) зависимость от погодных условий и географического расположения; 3) требует установки дополнительного оборудования; 4) необходимость в свободных площадях, особенно при масштабном генерировании энергии; 5) отсутствует режим когенерации
Ветрогенератор [15]	<ol style="list-style-type: none"> 1) возобновляемый и практически неисчерпаемый источник энергии; 2) ветряные турбины занимают мало места, что позволяет размещать их совместно с другими строениями и объектами; 3) относительно высокий КПД (до 35 %); 4) не требуют топлива 	<ol style="list-style-type: none"> 1) зависимость от погодных условий и географического расположения; 2) требует установки дополнительного оборудования; 3) высокий уровень шума (может превышать 100 дБ); 4) генерация низкочастотных вибраций и радиопомех; 5) отсутствие режима когенерации
Дизель-генератор [16]	<ol style="list-style-type: none"> 1) доступность на рынке большого количества агрегатов; 2) надежность эксплуатации; 3) быстрота пуска; 4) независимость от внешних природных факторов; 5) наличие возможности модульного наращивания мощности 	<ol style="list-style-type: none"> 1) необходимость регулярных поставок дизельного топлива и резервуаров для его хранения; 2) наличие выхлопных газов; 3) отсутствует режим когенерации
Газопоршневой агрегат [17]	<ol style="list-style-type: none"> 1) доступность на рынке большого количества агрегатов; 2) надежность эксплуатации; 3) быстрота пуска; 4) независимость от внешних природных факторов; 5) возможность режима когенерации; 6) наличие возможности модульного наращивания мощности 	<ol style="list-style-type: none"> 1) необходимость наличия централизованного газоснабжения (газопровода и ГРП); 2) наличие выхлопных газов
Твердоокисный топливный элемент [18]	<ol style="list-style-type: none"> 1) независимость от природных факторов; 2) возможность утилизации побочных продуктов нефтехимических предприятий; 3) наличие возможности модульного наращивания мощности; 4) высокий КПД при его использовании в комбинированной установке (до 65 %); 5) возможность режима когенерации 	<ol style="list-style-type: none"> 1) труднодоступность на рынке; 2) низкая единичная мощность отдельных топливных элементов (до 250 кВт); 3) необходимость постоянной подачи топлива в виде метана (при наличии паровой конверсии) или водорода

бестоимости также были определены капитальные и операционные затраты для каждого вида децентрализованных энергосистем.

Так, для твердооксидного топливного элемента капитальные затраты приведены в табл. 3.

Эксплуатационные затраты для твердооксидного топливного элемента приведены в табл. 4.

Себестоимость электроэнергии для ТОТЭ составит 59 рублей 62 копейки за кВт · ч. Высокая себестоимость обусловлена высокими капитальными затратами, связанными с тем, что данная технология на рынке достаточно недавно и в связи с этим имеет большую стоимость.

Для ветрогенераторной установки капитальные затраты приведены в табл. 5.

Эксплуатационные затраты составят 0,5 млн рублей в год, а себестоимость 11 рублей 31 копейку за кВт · ч электроэнергии. При этом имеется существенный недостаток – это зависимость от погодных условий, что может потребовать дополнительного резервного источника питания, стоимость которого не учитывалась при данном расчете.

Таблица 3. Капитальные затраты для твердооксидного топливного элемента

Table. 3. Capital costs for a solid oxide fuel cell

Твердооксидный топливный элемент N=5кВт (10 шт.), млн руб. [19]	13,65
Парогенератор, млн руб.	0,30
Прериформер топлива, млн руб.	2,80
Блок очистки топлива, млн руб.	0,36
Блок удаления CO ₂ , млн руб.	2,95
Блок автоматики и силовой электроники, млн руб.	17,63
Суммарные затраты на закупку оборудования, млн руб.	37,69
Проектно-изыскательские работы, млн руб.	4,40
Строительно-монтажные работы, млн руб.	18,84
Прочие затраты, млн руб.	1,88
Суммарные капитальные затраты, млн руб.	62,81

Таблица 4. Эксплуатационные затраты для твердооксидного топливного элемента

Table. 4. Operating costs for a solid oxide fuel cell

Затраты на эксплуатацию ТОТЭ, млн руб./год	1,02
Затраты на эксплуатацию парогенератора, млн руб./год	0,04
Затраты на эксплуатацию прериформера топлива, млн руб./год	0,34
Затраты на эксплуатацию блока отчистки топлива, млн руб./год	0,04
Затраты на эксплуатацию удаления углекислого газа, млн руб./год	13,64
Затраты на эксплуатацию блока автоматики и силовой электроники, млн руб./год	1,59
Стоимость топлива, руб./м ³	6,78
Расход топлива, м ³ /ч	12,00
Траты на топливо за время эксплуатации (10 лет) млн руб.	5,70
Суммарные эксплуатационные расходы млн руб.	172,22

Таблица 5. Капитальные затраты для ветрогенераторной установки

Table. 5. Capital expenditures for a wind turbine

Ветрогенератор 50 кВт "Condor Air 50", млн руб. [20]	2,85
Выпрямитель, млн руб. [21]	0,01
Контроллер заряда АКБ EPSolar Tracer MPPT 3215BN 12/24В 30А (14 шт), млн руб. [22]	0,29
Аккумуляторные батареи SUNWAYS CARBON 12–100 (42 шт.), млн руб.	1,60
Инвертор ROSVETRO TLS-50KW, млн руб. [23]	1,20
Суммарные затраты на закупку оборудования, млн руб.	5,94
Проектно-изыскательские работы, млн руб.	0,69
Строительно-монтажные работы, млн руб.	2,97
Прочие затраты, млн руб.	0,30
Суммарные капитальные затраты, млн руб.	9,90

Таблица 6. Капитальные затраты для солнечно-энергетической установки

Table. 6. Capital costs for a solar power plant

Капитальные затраты:	
Солнечная фотоэлектрическая DELTA NXT 500–66/2 M10 HC (100 шт), млн руб. [24]	2,06
Контроллер заряда АКБ EPSolar Tracer MPPT 3215BN 12/24В 30А (14 шт), млн руб.	0,29
Аккумуляторные батареи SUNWAYS CARBON 12–100 (42 шт.), млн руб.	1,14
Инвертор ROSVETRO TLS-50KW, млн руб.	1,20
Суммарные затраты на закупку оборудования, млн руб.	4,69
Проектно-изыскательские работы, млн руб.	0,55
Строительно-монтажные работы, млн руб.	2,35
Прочие затраты, млн руб.	0,23
Суммарные капитальные затраты, млн руб.	7,82

Для солнечно-энергетической установки капитальные затраты приведены в табл. 6.

Эксплуатационные затраты составят 0,39 млн рублей в год, а себестоимость 14 рублей 9 копеек за кВт · ч электроэнергии. При этом так же, как и для ветрогенератора, остается недостаток в виде зависимости от погодных условий, что может потребовать дополнительного резервного источника питания, стоимость которого не учитывалась при данном расчете.

Для газопоршневого агрегата капитальные затраты приведены в табл. 7.

Эксплуатационные затраты приведены в табл. 8.

Себестоимость электроэнергии для ГПА составит 2 рубля 45 копеек за кВт · ч. Данный вариант децентрализованной энергетической установки наиболее предпочтителен, так как является наиболее экономически выгодным, имеет возможность регулирования нагрузки, а также, кроме того, может работать в режиме комбинированной выработки тепловой и электрической энергии.

Для дизель-генератора капитальные затраты приведены в табл. 9.

Эксплуатационные затраты для дизель-генератора приведены в табл. 10.

Себестоимость электроэнергии для дизель-генератора составит 14 рублей 99 копеек за кВт · ч. Как видим, несмотря на малые капитальные затраты по сравнению с другими де-

Таблица 7. Капитальные затраты для газопоршневого агрегата

Table 7. Capital costs for a gas piston unit

ГПА ГПУ – 50, млн руб. [25]	1,45
Проектно-изыскательские работы, млн руб.	0,17
Строительно-монтажные работы, млн руб.	0,73
Прочие затраты, млн руб.	0,07
Суммарные капитальные затраты, млн руб.	2,42

Таблица 8. Эксплуатационные затраты для газопоршневого агрегата

Table 8. Operating costs for a gas piston unit

Операционные затраты, млн руб./год	0,12
Стоимость топлива, топлива, руб./м ³	6,78
Расход топлива, м ³ /ч	15,00
Траты на топливо за время эксплуатации (10 лет), млн руб.	7,13
Суммарные эксплуатационные расходы, млн руб.	7,25

Таблица 9. Капитальные затраты для дизель-генератора

Table 9. Capital costs for a diesel generator

Дизель-генератор ТСС АД-50С-Т400–1РМ16ТТд 69ТS 038151, млн руб. [26]	0,56
Проектно-изыскательские работы, млн руб.	0,07
Строительно-монтажные работы, млн руб.	0,28
Прочие затраты, млн руб.	0,03
Суммарные капитальные затраты, млн руб.	0,93

Таблица 10. Эксплуатационные затраты для дизель-генератора

Table 10. Operating costs for a diesel generator

Операционные затраты, млн руб./год	0,05
Стоимость топлива, руб./л	64,80
Расход топлива, л/ч	12,80
Траты на топливо за время эксплуатации (10 лет), млн руб.	58,13
Суммарные эксплуатационные расходы, млн руб.	58,17

централизованными энергоустановками, применение дизель-генератора оказывается дорогим вследствие высокой стоимости дизельного топлива.

Кроме того, были проанализированы прогнозы по динамике цен на одну из наиболее перспективных технологий, рассмотренных в данной статье, а именно на твердооксидные топливные элементы. Так, эксперты прогнозируют удешевление этой технологии в 4 раза уже к 2030 году [27]. Исходя из прогнозов была проанализирована динамика себестоимости электрической энергии, вырабатываемой твердооксидным топливным элементом. Результаты данного прогноза показаны на рис. 3.

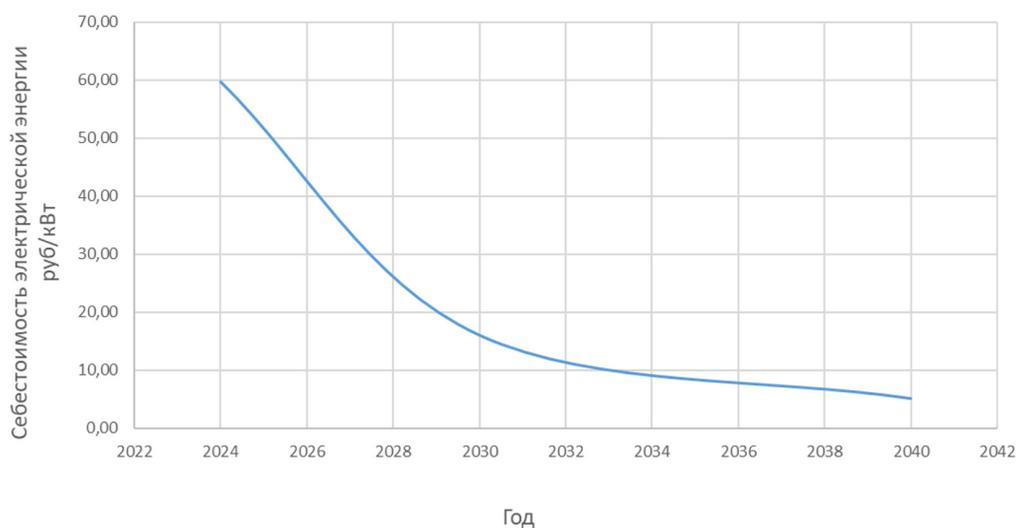


Рис. 3. Предполагаемая динамика себестоимости выработки электроэнергии ТОТЭ

Fig. 3. The estimated dynamics of the cost of electricity generation of SOFC

Выводы

Исходя из всего вышесказанного, можно судить об эффективности применения того или иного децентрализованного источника энергоснабжения. В силу экономических соображений наиболее предпочтительным является мини-ТЭЦ с применением газопоршневого агрегата, поскольку себестоимость вырабатываемой электрической энергии в таком случае будет минимальной – 2 рубля 45 копеек за кВт · ч. Кроме того, данная установка позволяет вырабатывать еще и тепловую энергию. В дальнейшей перспективе представляют интерес твердооксидные топливные элементы, так как в будущем прогнозируется снижение цен на данный вид источников энергии и увеличение единичной мощности, что позволит значительно сократить себестоимость выработки электроэнергии, которая пока что остается самой большой из всех рассмотренных источников энергии – 59 рублей 62 копейки за кВт · ч. Дизельные генераторы имеют высокие операционные затраты в силу дороговизны дизельного топлива, что делает их экономически не выгодными в качестве постоянных децентрализованных источников энергии. Так, себестоимость электрической энергии составит 14 рублей 99 копеек за кВт · ч, отсюда рекомендуется их применять только в качестве аварийного резерва. Возобновляемые источники

энергии по себестоимости производства электроэнергии занимают промежуточные позиции между газопоршневыми агрегатами и твердооксидными топливными элементами с 14 рублей 9 копеек за кВт · ч для солнечных фотоэлектрических панелей и 11 рублей 31 копейку за кВт · ч для ветрогенератора. Однако зависимость от погодных условий ограничивает сферу их применения и не обеспечивает достаточную надежность электроснабжения даже с учетом запаса энергии в аккумуляторных батареях. То есть газопоршневые агрегаты на сегодняшний день остаются наиболее предпочтительными для децентрализованных энергосистем, но в дальнейшей перспективе потенциально могут быть вытеснены твердооксидными топливными элементами или же комбинированными энергоустановками на их основе.

Список литературы / References

- [1] Кудинов А. А., Хусаинов К. Р. Оценка эффективности ПГУ-800 Киришской ГРЭС с трехконтурным котлом-утилизатором. *Энергосбережение и водоподготовка*. 2016. 4(102). 16–22. [Kudinov A. A., Khusainov K. R. Evaluation of the efficiency of PGU-800 Kirishskaya GRES with a three-circuit heat recovery boiler. *Energy saving and water treatment*. 2016. 4(102). 16–22. (in Rus.)]
- [2] Першуков В. А., Тихомиров Г. В. Замкнутый ядерный топливный цикл. *Актуальные проблемы энергетики – 2023: Материалы студенческой научно-технической конференции Минск: БНТУ*, 2023. 69–75. [Pershukov V. A., Tikhomirov G. V. Closed nuclear fuel cycle. *Actual problems of energy – 2023: materials of the student scientific and technical conference Minsk: BNTU*, 2023. 69–75. (in Rus.)]
- [3] Загидуллина З. Ф. Развитие теплоэнергетики в Татарстане. *XXV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика: материалы конференции*, Казань, 2021. 3. 218–221. [Zagidullina, Z. F. Development of thermal power engineering in Tatarstan. *XXV All-Russian postgraduate and Master's scientific seminar dedicated to the Day of the Power engineer: conference materials*, Kazan, 2021. 3. 218–221. (in Rus.)]
- [4] Филимонова А. А., Чичириов А. А., Чичирова Н. Д., Филимонов А. Г., Печенкин А. В. Перспективы развития водородной энергетики в Татарстане. *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2020. (6). [Filimonova A. A., Chichirov A. A., Chichirova N. D., Filimonov A. G., Pechenkin A. V. Prospects for the development of hydrogen energy in Tatarstan. *Izvestiya vuzov. Energy problems*. 2020. (6). (in Rus.)]
- [5] Мотавалов Д. Ф., Минибаев А. И. Применение атомных энерготехнологических станций. *Мировая наука на пути к устойчивому развитию: естественнонаучные исследования, технический прогресс: Материалы IV Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону*, 2023. 234–235. [Motavalov, D. F., Minibaev, A. I. The use of nuclear power technology plants. *World science on the way to sustainable development: natural science research, technical progress: Materials of the IV International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don*, March 31, 2023. 234–235. (in Rus.)]
- [6] Кокулин И. А., Сударкин Е. И. Влияние погодозависимого регулирования на систему теплоснабжения г. Казани. *Теплоэнергетика: Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: Материалы конференции. В 6 томах*, Иваново, 2020 года. 1. 29. [Kokulin, I. A., Sudarkin E. I. The influence of weather-dependent regulation on the heat supply system of Kazan. *Thermal Power engineering:*

The Fifteenth All-Russian (seventh International) Scientific and Technical Conference of students, postgraduates and young scientists: conference materials. In 6 volumes, Ivanovo, 2020. Volume 1. 29. (in Rus.)]

[7] Mandeep Singh, Dario Zappa, Elisabetta Comini Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives and challenges. *International journal of hydrogen energy* 46 (2021) 27643–27674

[8] Верхожина Ю. А. Твердоокисдные топливные элементы. *Молодежный вестник ИрГТУ.*– 2020. 10(4). 59–63. [Verkhozina, Yu. A. Solid oxide fuel cells. *Youth Bulletin of IrSTU.*– 2020. 10 (4). 59–63. (in Rus.)]

[9] Филимонова А. А., Чичиров А. А., Чичирова Н. Д., Печенкин А. В. Обзор проектных схем гибридных систем с твердоокисдным топливным элементом и газовой турбиной для комбинированного производства тепла и электроэнергии. *Журнал СВУ. Техника и технологии.* 2022. (7). [Filimonova A. A., Chichirov A. A., Chichirova N. D., Pechenkin A. V. Review of design schemes of hybrid systems with a solid oxide fuel cell and a gas turbine for combined heat and power production. *Journal of SibFU. Engineering and technology.* 2022. (7) (in Rus.)]

[10] Карачев А. И., Кузнецов Д. А. Газопоршневые установки для малой энергетики России. *Энергоэксперт.* 2023. 2(86). 18–21. [Karashev A. I., Kuznetsov D. A. Gas piston installations for small-scale energy in Russia, *Energoexpert.* 2023. 2(86). 18–21. (in Rus.)]

[11] Крюков К. А., Липатов М. С. К вопросу об использовании дизельных генераторов в качестве источника энергоснабжения. *Инновационная наука.* 2020. (6). [Kryukov K. A., Lipatov M. S. On the use of diesel generators as a source of energy supply *Innovative science.* 2020. (6). (in Rus.)]

[12] Насырова Е. В., Тимербаев Н. Ф., Леухина О. В., Мазаров И. Ю. Анализ данных ветромониторинга в Республике Татарстан. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.* 2019. 21(6). 39–50. [Nasyrova E. V., Timerbaev N. F., Leukhina O. V., Nazarov And Yu. Analysis of wind monitoring data in the Republic of Tatarstan. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems.* 2019. 21(6). 39–50. (in Rus.)]

[13] Сайфутдинова Г. Б., Яфизов Р. Р., Усачев С. С. Энергосберегающие технологии в российской энергетической отрасли. Региональный аспект. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук.* 2016. (4–2). [Sayfutdinova G. B., Yafizov R. R., Usachev S. S. Energy-saving technologies in the Russian energy industry. The regional aspect. *Actual problems of the humanities and natural sciences.* 2016. (4–2) (in Rus.)]

[14] Яринский Б. А., Яринский Г. А. Настоящее и будущее солнечных батарей. *Электронные системы и технологии: Сборник материалов 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР,* Минск, 2023. 482–484. [Yarinsky B. A., Yarinsky G. A. The present and future of solar panels. *Electronic systems and technologies: collection of materials of the 59th scientific conference of graduate students, undergraduates and students of BSUIR,* Minsk. 2023. 482–484. (in Rus.)]

[15] Садова В. А. Развитие ветроэнергетики в России. *Поколение будущего: Взгляд молодых ученых-2023: Сборник научных статей 12-й Международной молодежной научной конференции. В 4 томах,* Курск, 2023. 293–297. [Sadova, V. A. Development of wind energy in Russia. *Generation of the future: The view of young scientists-2023: Collection of scientific articles of the 12th International Youth Scientific Conference. In 4 volumes,* Kursk, 2023. 293–297 (in Rus.)]

[16] Бояринов Е. Дизель – генераторы, основные принципы работы, назначение и устройство. *Вестник науки*. 2023. 62(5). [Boyarinov E. Diesel generators, basic principles of operation, purpose and device. *Bulletin of Science*. 2023. 62(5). (in Rus.)]

[17] Дейнека В.Д. Виды газопоршневых электростанций и установок для автономного энергоснабжения. Принцип работы и тенденции в использовании. *Инновационная наука*. 2021. (1). [Deineka V.D. Types of gas-piston power plants and installations for autonomous power supply. The principle of operation and trends in use. *Innovative Science*. 2021. (1) (in Rus.)]

[18] Жук А.З., Иванов П.П. Характеристики твердооксидного топливного элемента для термодинамического моделирования энергетических установок. *Теплофизика высоких температур*. 2023. 61(5). 777–782. [Zhuk A.Z., Ivanov P.P. Characteristics of a solid oxide fuel cell for thermodynamic modeling of power plants Thermophysics of high temperatures. 2023. 61(5). 777–782. (in Rus.)]

[19] Топливный элемент WB-101 [Электронный ресурс] – Режим доступа https://russian.alibaba.com/p-detail/Best-1600966492572.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.7cea3ab4hycKx1 – Заглавие с экрана. Fuel cell WB-101 [Electronic resource] – Access mode https://russian.alibaba.com/p-detail/Best-1600966492572.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.7cea3ab4hycKx1 – Title from the screen.

[20] Green technology group Ветрогенератор 50 кВт [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://greentec-group.ru/catalog/vetrogenerator/vetrogenerator-condor-air/vetrogenerator-50-kvt/> – Заглавие с экрана. Green technology group 50 kW Wind generator [Electronic resource] – Access mode <https://greentec-group.ru/catalog/vetrogenerator/vetrogenerator-condor-air/vetrogenerator-50-kvt/> – Title from the screen.

[21] Двойной комплект выпрямителей РМА мощностью 90 Ампер для ветряных турбин [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://windandsolar.com/double-90-amp-pma-rectifier-kit-for-wind-turbines/> – Заглавие с экрана. A double set of 90 Ampere PMA rectifiers for wind turbines [Electronic resource] – Access mode <https://windandsolar.com/double-90-amp-pma-rectifier-kit-for-wind-turbines/> – Title from the screen.

[22] Контроллер заряда EPSolar Tracer MPPT 3215BN 12/24В 30А [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://enpartner.ru/kontroller-epsolar-tracer-mppt-3215bn-12-24v-30a> – Заглавие с экрана. EPSolar Tracer MPPT 3215BN 12/24V 30A Charge Controller [Electronic resource] – Access mode <https://enpartner.ru/kontroller-epsolar-tracer-mppt-3215bn-12-24v-30a> – Title from the screen.

[23] ROSVETRO TLS-50KW [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://rosvetrogenerator.ru/products/rosvetro-tls-50kw.html> – Заглавие с экрана. ROSVETRO TLS-50KW [Electronic resource] – Access mode <https://rosvetrogenerator.ru/products/rosvetro-tls-50kw.html> – Title from the screen.

[24] Солнечная панель DELTA NXT 500–66/2 M10 HC [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://enpartner.ru/solnechnaya-panel-delta-nxt-500-66-2-m10-hc> – Заглавие с экрана. DELTA NXT 500–66/2 M10 HC solar panel [Electronic resource] – Access mode <https://enpartner.ru/solnechnaya-panel-delta-nxt-500-66-2-m10-hc> – Title from the screen

[25] ГАЗОПОРШНЕВАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ ГПУ – 50 кВт [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://gaz-electrogenerator.ru/catalog/gazoporshnevaya-elektrostanciya-gpu-50> – Заглавие с экрана. GAS PISTON POWER PLANT GPU – 50 kW [Electronic resource] – Access mode

<https://gaz-electrogenerator.ru/catalog/gazoporshnevaya-elektrostantsiya-gpu-50> – Title from the screen

[26] Дизельный генератор ТСС АД-50С-Т400–1РМ16ТТд 69ТS 03815 [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://www.vseinstrumenti.ru/product/dizelnyj-generator-ad-50s-t400-1rm16-dizelnyj-generator-ttd-69ts-tss-038151-8885786/#description> – Заглавие с экрана. Diesel generator TSS AD-50S-T400–1RM16TTd 69TS 03815 [Electronic resource] – Access mode <https://www.vseinstrumenti.ru/product/dizelnyj-generator-ad-50s-t400-1rm16-dizelnyj-generator-ttd-69ts-tss-038151-8885786/#description> – Title from the screen

[27] Перспективы замещения традиционных видов топлива в России к 2030 г. 03815 [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://yakov.partners/publications/the-prospects-of-traditional-fuels-substitution-in-russia-by-2030/> – Заглавие с экрана. Prospects for the replacement of traditional fuels in Russia by 2030. 03815 [Electronic resource] – Access mode <https://yakov.partners/publications/the-prospects-of-traditional-fuels-substitution-in-russia-by-2030/> – Title from the screen.