

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 620.9

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-3-198-205

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

Тахавиев Т.М., Дмитриев А.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com

timur.tahaviev@mail.ru

Резюме: Применение топливных элементов на природном газе может значительно увеличить устойчивость и эффективность энергоснабжения частных домов, обеспечить важные экологические преимущества и снизить затраты на энергоресурсы. Однако широкое использование топливных элементов на природном газе в жилых домах ограничено рядом факторов, среди которых наиболее значимым является высокая стоимость топливного элемента. В исследовании проведен анализ потребления энергоресурсов для двух систем энергообеспечения, стандартной системы на основе двухконтурного газового котла и системы с применением твердооксидного топливного элемента на природном газе. **ЦЕЛЬ.** Определить экономическую целесообразность применения твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) на природном газе в частных жилых домах. **МЕТОДЫ.** Сбор данных о потреблении энергоресурсов анализируемого здания проводился с помощью показаний счетчиков. На основании этих данных создавались годовые графики потребления электроэнергии и природного газа. Схема системы энергообеспечения частного дома с использованием ТОТЭ, а также уравнение математической модели потребления природного газа системой с ТОТЭ строились на основе законов сохранения энергии и массы, а также с применением статистических методов анализа существующих исследований в области применения топливных элементов. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В ходе проведения исследования был составлен график динамики цен на энергоресурсы по месяцам для двух сравниваемых систем. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Внедрение систем энергоснабжения на основе твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), работающих на природном газе, в жилых домах может быть многообещающим решением. Сравнение системы на основе двухконтурного газового котла без ТОТЭ и системы с ТОТЭ на природном газе показало, что ежемесячная экономия колеблется от 24 % до 47 %, при среднем годовом значении в 34,5 %. Для семьи из трех человек, проживающей в двухэтажном кирпичном доме в Казани, Республика Татарстан, это означает ежегодную экономию в размере 25 080 рублей.

Ключевые слова: твердооксидный топливный элемент; экономическая эффективность; энергоэффективность; рекуперация тепла; когенерационная система.

Для цитирования: Тахавиев Т.М., Дмитриев А.В. Экономическая эффективность систем с применением твердооксидных топливных элементов на природном газе // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 198 -205. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-198-205.

ECONOMIC EFFICIENCY OF SYSTEMS USING SOLID OXIDE FUEL CELLS POWERED BY NATURAL GAS

Takhaviev T.M., Dmitriev A.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

timur.tahaviev@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com

Abstract: The use of natural gas fuel cells can significantly increase the sustainability and efficiency of energy supply to private homes, provide important environmental benefits and reduce energy costs. However, the widespread use of natural gas fuel cells in residential buildings is limited by a number of factors, among which the most significant is the high cost of a fuel cell. The study analyzes energy consumption for two energy supply systems, a standard system based on a double-circuit gas boiler and a system using a solid oxide fuel cell powered by natural gas. purpose. To determine the economic feasibility of using solid oxide fuel cells (TTE) on natural gas in private residential buildings. METHODS. Data on energy consumption of the analyzed building was collected using meter readings. Based on these data, annual schedules of electricity and natural gas consumption were created. The scheme of the energy supply system of a private house using TTE, as well as the equation of the mathematical model of natural gas consumption by the system with TTE, were based on the laws of conservation of energy and mass, as well as using statistical methods for analyzing existing research in the field of fuel cell applications. results. During the study, a graph of the dynamics of energy prices by month was compiled for the two compared systems. conclusion. The introduction of energy supply systems based on solid oxide fuel cells (TTE) powered by natural gas in residential buildings may be a promising solution. A comparison of a system based on a double-circuit gas boiler without a TTE and a system with a TTE on natural gas showed that monthly savings range from 24% to 47%, with an average annual value of 34.5%. For a family of three living in a two-storey brick house in Kazan, Republic of Tatarstan, this means an annual savings of 25,080 rubles.

Keywords: solid oxide fuel cell; economic efficiency; energy efficiency; heat recovery; cogeneration system.

For citation: Takhaviev T.M., Dmitriev A.V. Economic efficiency of systems using solid oxide fuel cells powered by natural gas. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (3): 198-205. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-198-205.

Введение (Introduction)

Использование когенерационных систем для снижения потребления электроэнергии и тепла в жилых домах может стать актуальным и востребованным решением [1]. Среди различных инновационных путей, доступных для использования в строительстве, в том, что касается производства тепловой энергии и электроэнергии, топливные элементы считаются наиболее перспективным направлением.

Применение твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) на природном газе предполагает использование тепловой энергии, образующейся при сжигании метана, для нужд отопления, подогрева воды и выработки электроэнергии.

Использование ТОТЭ на природном газе в жилом доме может быть актуально по нескольким причинам, связанным с энергоэффективностью, экологическими преимуществами, удобством эксплуатации и экономией ресурсов.

Топливные элементы, особенно в системе когенерации (совместное производство тепла и электричества), могут значительно повысить эффективность использования энергии по сравнению с традиционными методами генерации. В отличие от обычных газовых котлов и электростанций, которые теряют большое количество энергии в виде тепла, топливные элементы используют химическую энергию природного газа для производства как электричества, так и тепла, что позволяет достичь общего КПД до 80–85% [2]. Данное решение позволяет сократить затраты на энергию для отопления и электроснабжения.

Процесс сжигания природного газа сопровождается меньшим выделением углекислого газа и других загрязняющих веществ, нежели сжигание угля и нефти. В связи с этим работа топливных элементов несет меньшую антропогенную нагрузку на биоценозы по сравнению с традиционными методами сжигания топлива. В дополнение, использование высокоэффективных топливных элементов позволяет минимизировать выбросы CO₂, что способствует снижению углеродного следа [3].

ТОТЭ на природном газе позволяют дому стать частично или полностью независимым от внешней сети электроснабжения. Это особенно актуально для удаленных или пригородных районов, где обеспечение бесперебойного энергоснабжения может быть затруднено.

Высокая эффективность работы топливных элементов обеспечивает низкие эксплуатационные расходы, снижает потребность в закупке большого количества топлива, а также сокращает затраты на электроэнергию и отопление. В случае, если система работает в

режиме когенерации, дом может получить возможность продавать излишки электричества в сеть или перенаправлять электроэнергию на других потребителей (питание электромобилей).

В топливных элементах отсутствуют механические детали, которые находятся в движении, что обеспечивает их бесшумную работу и снижает уровень вибрации по сравнению с традиционными системами производства энергии, такими как двигатели внутреннего сгорания. Это важно для комфортного проживания в жилых домах, где шум и вибрации могут доставлять неудобства. Также отсутствие подвижных частей уменьшает износ системы и требует относительно малого обслуживания по сравнению с традиционными системами отопления и генерации электричества.

Топливные элементы могут быть эффективно интегрированы с другими технологиями, например, с солнечными панелями или ветряными установками. В таких системах топливные элементы могут работать как резервный источник энергии, а в солнечные или ветреные дни могут использовать избыточную электроэнергию для зарядки аккумуляторов.

В условиях стремительного развития технологий «умных» домов применение топливных элементов может стать частью комплексной системы энергоснабжения, которая самостоятельно регулирует расход энергии в соответствии с нуждами дома. Это может подразумевать автоматическую регулировку температуры, контроль за потреблением электроэнергии и оптимизацию работы системы отопления.

Основные факторы, препятствующие использованию ТОТЭ на природном газе в жилых домах – высокая стоимость, проблема осаждения аморфного углерода на аноде и его последующая деактивация, проблема значительного падения генерируемой мощности при наличии сероводорода в топливе.

Осаждение аморфного углерода на аноде может быть решено путем применения стойких к углеродной и сероводородной деградации материалов для анода, а падение генерируемой мощности при наличии сероводорода в топливе решается развитием системы очистки топлива от сероводородных включений [4].

Материалы и методы (Materials and methods)

Эффективность системы с использованием топливного элемента напрямую зависит от выбора схемы преобразования тепловой энергии в электрическую. Так отмечается, что самый низкий КПД наблюдается в системах прямой термоэлектрической генерации, где используется прямое сжигание метана для создания высокой температуры 600 – 1000 °C [5] на горячей стороне термоэлектрического элемента, в то время как его холодная сторона охлаждается естественным или принудительным образом. В таких системах КПД не превышает 15% [6]. Более выгодная схема, при которой энергетическая эффективность системы достигает 50% и 56,9% [7], предполагает комбинированное использование тепла и электроэнергии (когенерация). В этой схеме используется как электроэнергия, так и тепло, выделяемое при сжигании метана и работе ТОТЭ. Также действенным решением в увеличении общего КПД системы может стать применение рекуперации. После прохождения через основной термоэлектрический генератор горячие газы направляются в теплообменник или дополнительный термоэлектрический элемент для рекуперации остаточного тепла. При такой схеме электрическая эффективность системы составит 50 – 60 % [8], а общая эффективность системы может достигать 90 % [2]. Когенерационная система на основе ТОТЭ и теплового насоса, работающая на природном газе, достигает высокой энергоэффективности 93,04 %, при этом эффективность выработки электроэнергии 44,48 %, эффективность использования эксергии 39,13 %, эффективность нагрева 48,65% [9]. Система с использованием газотурбинного преобразования перед ТОТЭ позволяет достичь общий КПД в 40 – 70 % [10]. В этой схеме сжигание метана используется для вращения газовой турбины, которая генерирует электричество. Выходные горячие газы из турбины затем направляются на термоэлектрические преобразователи для дополнительной генерации электроэнергии.

При использовании систем с ТОТЭ на природном газе в жилых домах необходимо учитывать неравномерность в потреблении энергоресурсов, нагрузка на систему будет изменяться в течении суток. Для сглаживания колебаний в работе системы и поддержания её эффективности необходимо использовать литий-ионные аккумуляторы, которые будут обеспечивать накопление и регулирование энергии [11]. Такая комбинация улучшает стабильность и гибкость системы. Литий-ионные аккумуляторы обладают рядом достоинств: они отличаются высокой энергетической ёмкостью, обладают длительным сроком службы (3000–5000 циклов), быстро откликаются на команды и имеют компактные габариты.

В качестве объекта для сравнительного анализа выбран двухэтажный кирпичный частный дом с сопротивлением теплопередачи ограждающих конструкций не менее

требуемых значений, $R_0^{\text{тп}}$, ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт, для Республики Татарстан города Казани. Требуемые сопротивления теплопередачи для ограждающих конструкций [12]: наружные стены $R_0^{\text{тп}} = 3,18$ ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт, кровля $R_0^{\text{тп}} = 4,76$ ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт, окна $R_0^{\text{тп}} = 0,68$ ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт, дверь $R_0^{\text{тп}} = 0,84$ ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт, пол по грунту по зонам I – $R_0^{\text{тп}} = 2,1$ ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт, II – $R_0^{\text{тп}} = 3,8$ ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт, III – $R_0^{\text{тп}} = 5,2$ ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт, IV – $R_0^{\text{тп}} = 7,7$ ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт.

В доме проживает семья, состоящая из трех человек, установлен газовый двухконтурный котел на отапливаемую площадь 240 м^2 . На рис. 1 представлен годовой график потребления электроэнергии. Данные приняты на основе показаний счетчика электроснабжения «Энергомера ЕМ112».

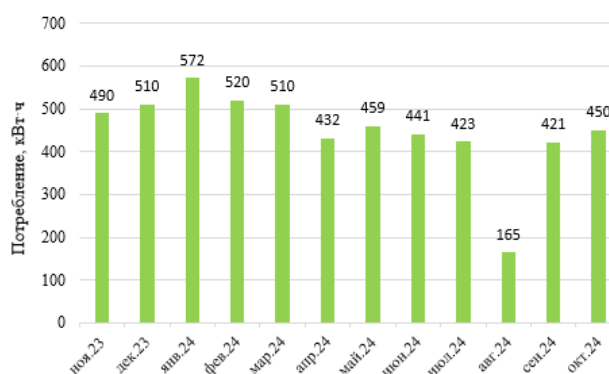


Рис. 1. Годовой график потребления электроэнергии Fig. 1. Annual electricity consumption schedule

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

На рисунке 2 представлен годовой график потребления природного газа. Данные приняты на основе показаний счетчика учета природного газа «СГ-1».

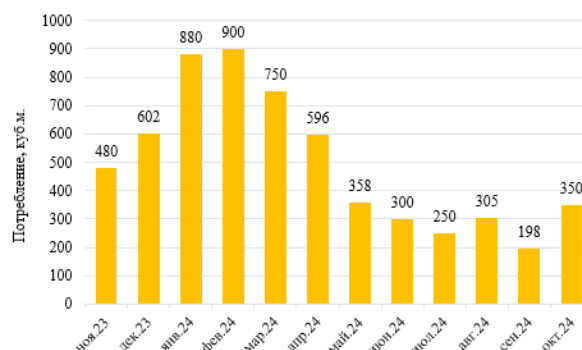


Рис. 2. Годовой график потребления природного газа Fig. 2. Annual schedule of natural gas consumption

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

В качестве альтернативной системы энергообеспечения частного дома принята схема с использованием твердооксидного топливного элемента (ТОТЭ) на природном газе и рекуперацией остаточного тепла. Данное решение предполагает применение ТОТЭ на природном газе для выработки электроэнергии. Выделяемое в результате химической реакции тепло утилизируется в рекуператоре, обеспечивая подпитку теплоносителя для нужд отопления и горячего водоснабжения, что позволит снять часть нагрузки с газового котла. Двухконтурный газовый котел необходим для нужд отопления и горячего водоснабжения. Мощность котла рассчитывается с учетом тепловой мощности ТОТЭ. Схема системы энергообеспечения дома с использованием ТОТЭ на природном газе представлена на рисунке 3.

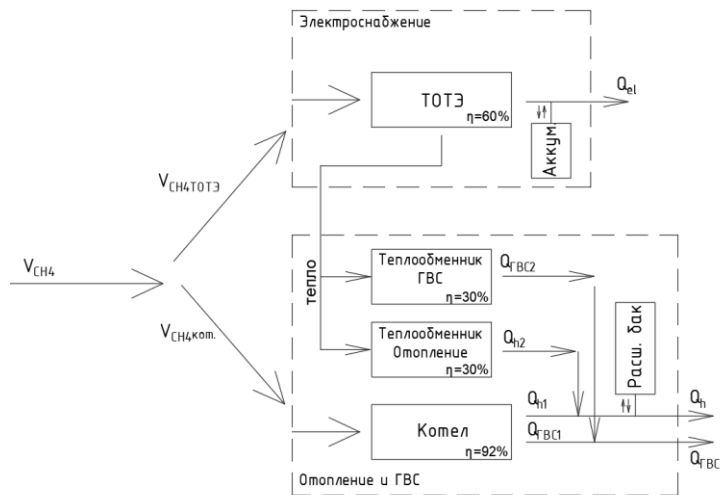


Рис. 3. Схема системы энергообеспечения дома с использованием ТЭОТЭ на природном газе Fig. 3. Diagram of the energy supply system for a house using a natural gas heating element

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При данной схеме энергообеспечения в здание необходимо завести только природный газ, электричество вырабатывается системой. Поступающий природный газ в объеме V_{CH_4} разделяется на два потока объемами $V_{CH_4котл}$ и $V_{CH_4TOTЭ}$. Поток с объемом $V_{CH_4котл}$ обеспечивает питание двухконтурного газового котла. Мощность системы отопления, вырабатываемая газовым котлом Q_{h1} , мощность системы горячего водоснабжения $Q_{ГВС1}$.

Поток с объемом $V_{CH_4TOTЭ}$ обеспечивает питание твердооксидного топливного элемента. Природный газ и ограниченное количество кислорода подаются в реактор ТЭОТЭ, где происходит реакция частичного окисления (1), в результате которой образуются водород и оксид углерода.



Выработанный водород участвует в электрохимической реакции с кислородом (2), генерируя электрическую энергию Q_{el} , воду и теплоту Q_h .



Полученная теплота Q_h утилизируется в процессе рекуперации в теплообменниках систем отопления и ГВС, нагревая теплоноситель в контурах подпитки Q_h и $Q_{ГВС1}$. Контур подпитки обеспечивают качественное регулирование систем отопления и горячего водоснабжения.

При совместной работе газового котла и ТЭОТЭ с рекуперацией тепла система вырабатывает электроэнергию Q_{el} , а также тепло на нужды отопления Q_h и горячее водоснабжение $Q_{ГВС}$.

Объем потребляемого природного газа системой можно определить по формуле (3):

$$V_{CH_4} = V_{CH_4TOTЭ} + V_{CH_4котл} = \frac{A_{el} \cdot 3,6}{\eta_{el} \cdot Q_{н.з}} + V_{CH_4котл} \quad (3)$$

где V_{CH_4} – объем потребляемого природного газа системой, $м^3$; $V_{CH_4TOTЭ}$ – объем потребляемого природного газа ТЭОТЭ, $м^3$; $V_{CH_4котл}$ – объем потребляемого природного газа двухконтурным газовым котлом, $м^3$. Данные принимаются согласно годовому графику потребления природного газа рис.2.; A_{el} – количество электроэнергии, потребляемой системой, кВт·ч. Данные принимаются, согласно годовому графику потребления электроэнергии рис.1; η_{el} – КПД электрический топливного элемента, 60 % [8]. Данный показатель измеряет, насколько эффективно устройство преобразует химическую энергию топлива в электрическую энергию; Q_{el} – низшая теплота сгорания природного газа,

31,8 МДж/м³. Низшая теплота сгорания природного газа при стандартных условиях должна быть не менее 31,8 МДж/м³ [13].

Годовой график потребления природного газа системой, использующей ТОТЭ и рекуперацию тепла представлен на рисунке 4.

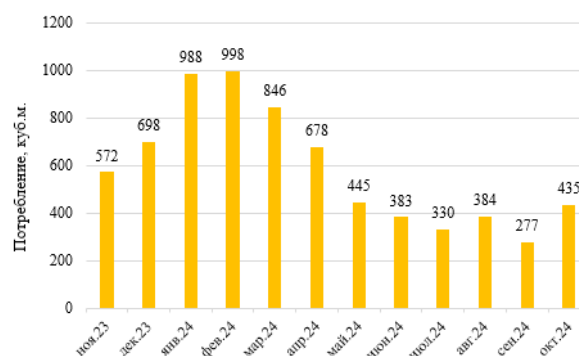


Рис. 4. Годовой график потребления природного газа системой с ТОТЭ Fig. 4. Annual schedule of natural gas consumption by the CTE system

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Для расчёта стоимости потребления энергоресурсов используются следующие коэффициенты: для электроэнергии принят расчетный коэффициент в размере 5,85 руб./кВт·ч [14], для природного газа принят расчетный коэффициент в размере 7,47 руб./м³ [15]. На рисунке 5 представлен график динамики цен на энергоресурсы по месяцам для двух систем: традиционной системы без ТОТЭ и системы с ТОТЭ на природном газе.

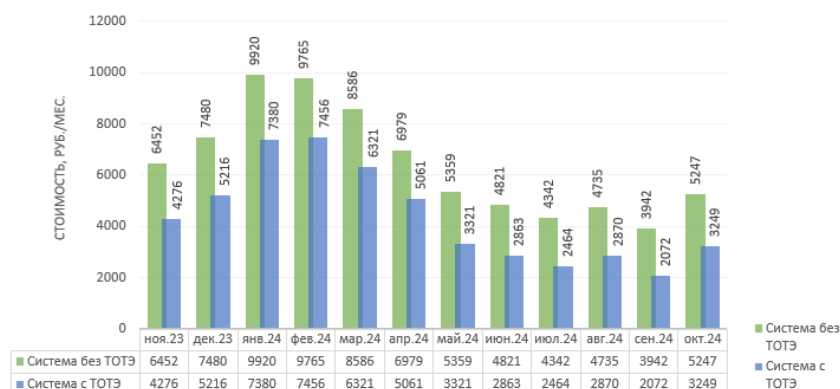


Рис. 5. График динамики цен на энергоресурсы по месяцам для двух систем: традиционной системы без ТОТЭ и системы с ТОТЭ на природном газе Fig. 5. Graph of the dynamics of energy prices by month for two systems: a traditional system without TOC and a system with TOC on natural gas

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В результате сравнения стоимости энергоресурсов по месяцам для двух систем, традиционной системы без ТОТЭ и системы с ТОТЭ на природном газе, выяснилось, что применение технологии, основанной на использовании твердооксидного топливного элемента (ТОТЭ) на природном газе в сочетании с рекуперацией тепла, является эффективным решением, так как позволяет сократить расходы на оплату энергоресурсов в среднем на 34,5 % ежемесячно. Годовая экономия составляет двадцать пять тысяч восемьдесят рублей.

Заключение (Conclusion)

Использование в жилых домах систем энергоснабжения на основе твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), работающих на природном газе, может стать перспективным решением. Такие системы обладают рядом преимуществ: снижение расхода энергии, высокая эффективность преобразования энергии, экологичность, энергетическая автономность, экономическая выгода.

Сравнение двух систем, традиционной системы без ТОТЭ и системы с ТОТЭ на природном газе показало, что ежемесячная экономия составляет от 24 % до 47 %, а в среднем за год 34,5 %. Для семьи из трех человек, которая живёт в двухэтажном кирпичном доме в Республике Татарстан, городе Казани, экономия в денежном выражении составит 25080 рублей в год.

Одной из главных причин, по которой системы с ТОТЭ на природном газе не используются, может быть высокая стоимость топливного элемента. На сегодняшний день стоимость ТОТЭ варьируется от 1000\$ до 5000\$ за 1 кВт. Важно отметить, что данная цена будет снижаться с увеличением объема производства и внедрением новых технологий. Прогнозируется, что стоимость снизится на 20 – 50 % в течение следующих 5 – 10 лет. Государственная поддержка может дополнительно снизить стоимость на 10 – 30 % в зависимости от программы. Таким образом цена твердооксидного топливного элемента (ТОТЭ) на природном газе мощностью 400 Вт, подходящего для установки в частные жилые дома, может достигнуть 12 – 20 тыс. рублей. При этом срок окупаемости такого оборудования не превысит одного года.

Литература

1. Roy D., Samanta S., Roy S., Smallbone A., Roskilly A.P. Technoeconomic and environmental performance assessment of solid oxide fuel cell-based cogeneration system configurations // *Energy*. 2024. Vol. 310, №133145.
2. Липилин А.С., Нефедкин С.И., Чухарев В.Ф., Киселев И.В., Козлов С.И., Юдин А.Л. Энергоснабжение малоэтажных домов на основе эффективного использования природного газа в технологии ТОТЭ // *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2010. № 883.
3. Singla M., Nijhawan P., Oberoi A. Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. pp. 15607-15626.
4. Смородова О.В., Китаев С.В., Ерилин И.С. К проблемам использования природного газа в качестве топлива для твердооксидных топливных элементов // *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2018. № 4-1. с. 51-54.
5. Choudhary T., Kumar Sahu M., Sanjay. CFD modeling of SOFC cogeneration system for building application // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 109. pp. 361-368.
6. Собянин В.А. Высокотемпературные твердооксидные топливные элементы и конверсия метана // *Российский химический журнал*. 2003. т. XLVII. №6.
7. Ahmadi S., Ghaebi H., Shokri A. A comprehensive thermodynamic analysis of a novel CHP system based on SOFC and APC cycles // *Energy*. 2019. Vol. 186. № 115899.
8. Heidarshenas B., Abdullah M.M., Sajadi S.M., Yuan Y., Malekshah E.H., Aybar H. Exergy and environmental analysis of SOFC-based system including reformers and heat recovery approaches to establish hydrogen-rich streams with least exergy loss // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 52. pp. 845-853.
9. Roy D., Samanta S., Roy S., Smallbone A., Roskilly A.P. Technoeconomic and environmental performance assessment of solid oxide fuel cell-based cogeneration system configurations // *Energy*. 2024. Vol. 310. № 133145.
10. Филимонова А.А., Чичириков А.А., Чичирова Н.Д., Печенкин А.В. Обзор проектных схем гибридных систем с твердооксидным топливным элементом и газовой турбиной для комбинированного производства тепла и электроэнергии // *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2022, 15(7). С. 812–834.
11. Baldi F., Wang L., Perez-Fortes M., Marechal F. A Cogeneration system based on solid oxide and proton exchange membrane fuel cells with hybrid storage for off-grid applications // *Frontiers in energy research*. 2019. Vol. 6. № 139.
12. СП 50.13330.2024 «СНИП 23-02-2003 Тепловая защита зданий».
13. ГОСТ 5542-2014 «Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия».
14. Постановление Государственного комитета РТ по тарифам от 15.12.2023 №682-24/з-2023.
15. Постановление Государственного комитета РТ по тарифам от 19.12.2023 № 818-1/г-2023.

Авторы публикации

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств», Казанский государственный энергетический университет.

Тахавиев Тимур Маратович – аспирант Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Roy D., Samanta S., Roy S., Smallbone A., Roskilly A.P. Technoeconomic and environmental performance assessment of solid oxide fuel cell-based cogeneration system configurations // *Energy*. 2024. Vol. 310, №133145. DOI: 10.1016/j.energy.2024.133145.
2. Lipilin A.S., Nefedkin S.I., Chukharev V.F., Kiselev I.V., Kozlov S.I., Yudin A.L. Energy supply of low-rise housing based on the efficient use of natural gas in the TTE technology // *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2010. № 883.
3. Singla M., Nijhawan P., Oberoi A. Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. pp. 15607-15626. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12231-8>.
4. Smorodova O.V., Kitaev S.V., Erilin I.S. On the possibilities of using primary gas as fuel for solid oxide components // *Norwegian Journal for the Development of International Science*. 2018. № 4-1. c. 51-54.
5. Choudhary T., Kumar Sahu M., Sanjay. CFD modeling of SOFC cogeneration system for building application // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 109. pp. 361-368. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.087.
6. Sobyenin V.A. High-temperature solid oxide fuel cells and methane conversion // *Russian Chemical Journal*. 2003. vol. XLVII. No. 6.
7. Ahmadi S., Ghaebi H., Shokri A. A comprehensive thermodynamic analysis of a novel CHP system based on SOFC and APC cycles // *Energy*. 2019. Vol. 186. № 115899. DOI: 10.1016/j.energy.2019.115899.
8. Heidarshenas B., Abdullah M.M., Sajadi S.M., Yuan Y., Malekshah E.H., Aybar H. Exergy and environmental analysis of SOFC-based system including reformers and heat recovery approaches to establish hydrogen-rich streams with least exergy loss // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 52. pp. 845-853. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.243.
9. Roy D., Samanta S., Roy S., Smallbone A., Roskilly A.P. Technoeconomic and environmental performance assessment of solid oxide fuel cell-based cogeneration system configurations // *Energy*. 2024. Vol. 310. № 133145. DOI: 10.1016/j.energy.2024.133145.
10. 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 generation // *Journal of Siberian Federal University. un-ta. Machinery and technology*. 2022, 15(7). pp. 812-834.
11. Baldi F., Wang L., Perez-Fortes M., Marechal F. A Cogeneration system based on solid oxide and proton exchange membrane fuel cells with hybrid storage for off-grid applications // *Frontiers in energy research*. 2019. Vol. 6. № 139. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00139>.
12. SP 50.13330.2024 "SNIP 23-02-2003 Thermal protection of buildings".
13. GOST 5542-2014 "Natural combustible gases for industrial and municipal purposes. Technical specifications".
14. Resolution of the State Committee of the Republic of Tatarstan on Tariffs dated 12/15/2023 No. 682-24/E-2023.
15. Resolution of the State Committee of the Republic of Tatarstan on Tariffs dated 12/19/2023 No. 818-1/g-2023.

Authors of the publication

Andrey V. Dmitriev – Kazan State Power Engineering University.

Timur M. Takhaviev – Kazan State Power Engineering University.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **06.02.2025 г.**

Отредактировано **21.02.2025 г.**

Принято **27.03.2025 г.**