

Научная статья

УДК 504.75/620.9

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31204>



Ю.В. Можегорова , Г.В. Ильиных, В.Н. Коротаев

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет», Пермь, Россия

[juliagubaha@mail.ru](mailto:juliagubaha@mail.ru)

## УГЛЕРОДНЫЙ СЛЕД ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ТВЕРДООКСИДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

**Аннотация.** В настоящее время вырос интерес к энергетическим установкам на основе твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) как объектам малой генерации. Для оценки углеродного следа использования топлива в энергоустановке на основе ТОТЭ необходимо учитывать этапы жизненного цикла топлива и энергоустановки. В статье представлен комплексный подход для оценки жизненного цикла энергоустановок на основе ТОТЭ и анализ их воздействия на окружающую среду. Приведены основные параметры, характеристики, ресурсы, применяемые для оценки этапов жизненного цикла энергетических установок на основе ТОТЭ, а также проведена оценка вклада материалов в углеродный след производства энергоустановки. Для исследований была использована опытная энергетическая установка на основе ТОТЭ мощностью 2,5 кВт, разработанная в России. На основании оценки углеродного следа рассматриваемой энергоустановки на основе ТОТЭ было определено, что основной вклад вносит этап эксплуатации (около 70%), при этом общий углеродный след составил 516,9 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт\*ч. Определено, что углеродный след рассматриваемой энергоустановки на основе ТОТЭ мощностью 2,5 кВт сопоставим с углеродным следом других энергоустановок, что свидетельствует о ее эффективности в части выбросов парниковых газов.

**Ключевые слова:** твердооксидный топливный элемент, энергетические установки малой генерации, углеродный след, оценка жизненного цикла.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Водородная энергетика. Материалы и технологии хранения, транспортировки и применения водорода и водородсодержащих смесей» (FSNM-2023-0004).

**Для цитирования:**

Можегорова Ю.В., Ильиных Г.В., Коротаев В.Н. Углеродный след энергетической установки на основе твердооксидного топливного элемента // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. 42–56. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31204>



*Yu.V. Mozzhegorova*✉, *G.V. Ilinikh*, *V.N. Korotaev*

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
"Perm National Research Polytechnic University", Perm, Russia

✉ [juliagubaha@mail.ru](mailto:juliagubaha@mail.ru)

## CARBON FOOTPRINT OF A SOLID OXIDE FUEL CELL POWER PLANT

*Abstract.* Currently, interest in solid oxide fuel cell (SOFC) power plants as small-scale generation facilities has increased. To assess the carbon footprint of fuel use in a SOFC power plant, it is necessary to take into account the stages of the fuel and power plant life cycles. The article presents an integrated approach to assessing the life cycle of SOFC power plants and analyzing their environmental impact. The main parameters, characteristics, and resources used to assess the life cycle stages of SOFC power plants are presented, and the contribution of materials to the carbon footprint of power plant production is assessed. A 2.5 kW SOFC pilot power plant developed in Russia was used for the research. Based on the carbon footprint assessment of the SOFC power plant under consideration, it was determined that the main contribution is made by the operation stage (about 70%), while the total carbon footprint was 516.9 g CO<sub>2</sub>-eq./kWh. It was determined that the carbon footprint of the considered power plant based on SOFC with a capacity of 2.5 kW is comparable to the carbon footprint of other power plants, which indicates its efficiency in terms of greenhouse gas emissions.

*Keywords:* solid oxide fuel cell, small generation power plants, carbon footprint, life cycle assessment.

*Acknowledgements:* The work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment "Hydrogen energy. Materials and technologies for storage, transportation and use of hydrogen and hydrogen-containing mixtures" (FSNM-2023-0004).

*Citation:*

Mozzhegorova Yu.V., Ilinikh G.V., Korotaev V.N., Carbon footprint of a solid oxide fuel cell power plant, Global Energy, 31 (02) (2025) 42–56, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31204>

**Введение.** В связи со сложностью территориальной структуры российской энергетики важным направлением ее развития становится децентрализованное производство энергии, когда электроэнергия и/или тепло вырабатываются непосредственно в месте потребления, а мощность генераторов определяется потребностями конкретных пользователей.

В настоящее время вырос интерес к энергетическим установкам (ЭУ) на основе твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), которые могут эксплуатироваться в различных территориальных и климатических условиях. Себестоимость генерируемой ими электроэнергии ниже, чем у других типов топливных элементов, в которых используются дорогостоящие катализаторы (платина и пр.) [1].

Энергоустановки на основе ТОТЭ могут работать на различных видах топлива: природный газ, метан, пропан, диметиловый эфир, дизельное топливо, биотопливо и т.д. В настоящее время разработкой и выпуском энергоустановок на основе ТОТЭ на низкоуглеродных видах топлива занимается множество компаний: "General Electric", "Mitsubishi Power", "Bloom Energy", "Doosan Fuel Cell Co.", "Nedstack Fuel Cell Technology", "Elcogen" и пр. К примеру, компания "H2e Power Systems Inc." (США) производит микро-ТЭЦ на основе ТОТЭ "Galileo" (1,5 кВт),



которая может работать на метано-водородном топливе<sup>1</sup>. Компанией “Elcogen” (Эстония) разработаны топливные ячейки “elcocell” и батарея ТОТЭ “elcoStack”, которая может работать на природном газе, метаноле, этаноле, биогазе, с возможностью работы на водороде<sup>2</sup>. Топливные элементы “Elcogen” используются в энергоустановке, работающей на биогазе, для производства электроэнергии на ферме по выращиванию креветок, расположенной в Бенче (Вьетнам)<sup>3</sup>. Имеются серийные производства энергоустановок на основе ТОТЭ, работающих на водородном топливе. Компания “PowerCell” (Швеция) выпускает батареи ТОТЭ малой мощности (2–3 кВт) с его использованием<sup>4</sup>. Энергетическая установка на основе ТОТЭ (300 кВт), разработанная компанией “Bloom Energy” (США), позволяет работать на 100%-ном водородном топливе<sup>5</sup>. Компания “Electric Works” выпустила новый генератор на основе ТОТЭ на водороде в Австралии, Европе и Китае. Когенерационная система “H2 KIBOU” производит около 8,2 кВт тепла и до 10 кВт электроэнергии<sup>6</sup>.

В России крупнейшим источником парниковых газов (ПГ) является топливно-энергетическая отрасль. 7% мировых выбросов углекислого газа приходится на энергетику [2]. ТОТЭ ввиду высокого КПД (до 70% по выработке электроэнергии) способствуют снижению выбросов ПГ на единицу произведенной энергии. Однако важно учитывать также косвенные выбросы ПГ от производства самой установки. Для оценки углеродного следа электроэнергии, генерируемой в ТОТЭ, необходимо учитывать этапы жизненного цикла топлива и энергоустановки [3].

Оценка выбросов ПГ энергоустановок на основе ТОТЭ является довольно сложной задачей. Это обусловлено большим количеством материалов, необходимых для производства, а также трудоемкими технологическими процессами, включающими обработку и многоэтапную технологию изготовления батарей ТОТЭ. Энергетические установки на основе ТОТЭ – сложные технические устройства, что затрудняет проведение оценки их жизненного цикла на каждом этапе. Для решения такой задачи необходимо установить, какие этапы, материалы, ресурсы целесообразно учитывать, а какие можно исключить из оценки жизненного цикла. В связи с этим актуальным является разработка комплексного методического подхода к оценке жизненного цикла энергоустановок на основе ТОТЭ и анализ их воздействия на окружающую среду.

### Методы и материалы

Оценка жизненного цикла представляет собой методологическую базу для анализа и оценки экологического воздействия, связанного с полным жизненным циклом продукта (изделия). Основные положения по оценке жизненного цикла представлены в ГОСТ Р ИСО 14040-2022<sup>7</sup> [3].

Для энергетических установок на основе топливных элементов, предназначенных для тепло- и электроснабжения жилых помещений, разработан ГОСТ Р 56188.9.102-2023<sup>8</sup>. Ввиду того, что энергоустановки на основе ТОТЭ можно отнести к сложным техническим устройствам, оценка жизненного цикла выполнялась на основании ранее опубликованной методологии [4].

<sup>1</sup> Solid Oxide Fuel Cell. Режим доступа: <https://www.h2epower.net/solid-oxide-fuel-cell/> (дата обращения: 15.03.2025).

<sup>2</sup> Solid oxide stacks for fuel cell systems. Режим доступа: <https://elcogen.com/products/solid-oxide-stacks-for-fuel-cell-systems/> (дата обращения: 10.03.2025).

<sup>3</sup> Power generation from biogas with fuel cell technology in Vietnam. Режим доступа: <https://elcogen.com/casestudies/power-generation-from-biogas-with-fuel-cell-technology-in-vietnam/> (дата обращения: 12.03.2025).

<sup>4</sup> Hydrogen Fuel Cell Stacks. Режим доступа: <https://powercellgroup.com/fuel-cell-stacks/> (дата обращения: 18.03.2025).

<sup>5</sup> Hydrogen Fuel Cell. Bloom Energy. Режим доступа: <https://www.bloomenergy.com/wp-content/uploads/hydrogen-data-sheet.pdf> (дата обращения: 18.03.2025).

<sup>6</sup> Panasonic Launches 10 kW Pure Hydrogen Fuel Cell Generator in Europe, Australia, and China. Режим доступа: <https://news.panasonic.com/global/press/en240425-1> (дата обращения: 20.03.2025).

<sup>7</sup> Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура. ГОСТ Р ИСО 14040–2022. 2022. 24 с.

<sup>8</sup> Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Технологии топливных элементов. Часть 9-102. Методология оценки экологических характеристик энергетических установок на основе топливных элементов в рамках обзора жизненного цикла. Стационарные когенерационные энергетические установки на основе топливных элементов для жилых помещений. Правила группы однородной продукции для разработки экологической декларации. ГОСТ Р 56188.9.102–2023. 2023. 32 с.

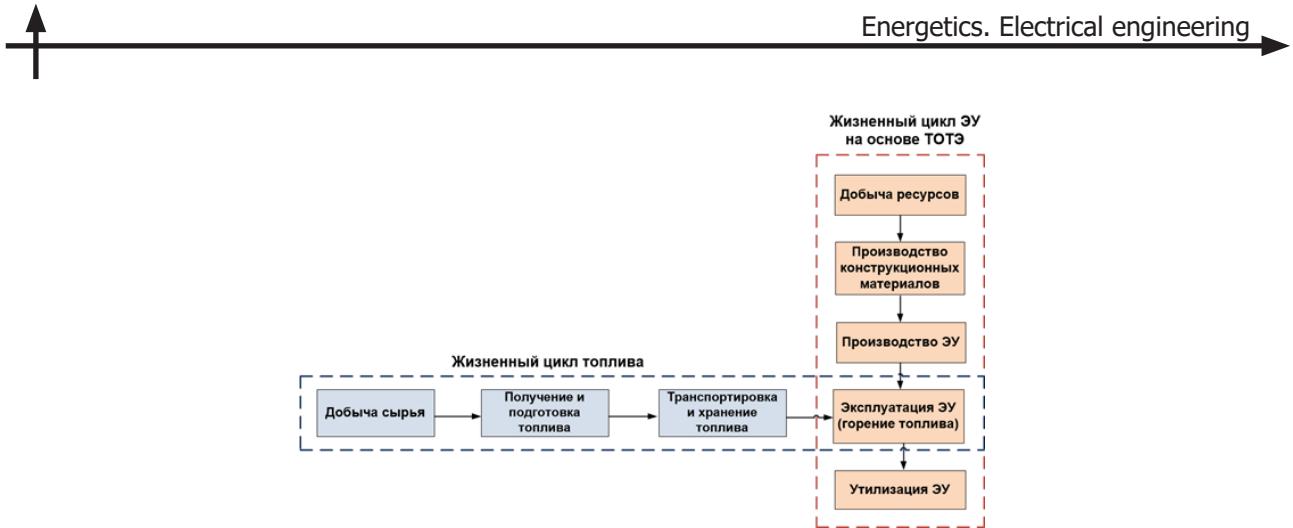


Рис. 1. Жизненный цикл топлива и энергоустановки на основе ТОТЭ

Fig. 1. Life cycle of the fuel and a SOFC power plant

Согласно анализу исследований [5–9] и требований ГОСТ Р 56188.9.102-2023, в качестве функциональной единицы для расчета углеродного следа энергоустановки на основе ТОТЭ используется г СО<sub>2</sub>-экв./кВт\*ч.

На рис. 1 представлена совмещенная схема жизненных циклов топлива и энергоустановки на основе ТОТЭ, пересекающиеся на этапе эксплуатации, обозначены границы жизненного цикла, использованные в данном исследовании. При проведении оценки жизненного цикла энергетической установки на основе ТОТЭ необходимо учитывать этапы ее производства, производства топлива и электрической энергии, а также эксплуатации и окончания срока службы<sup>7,8</sup>. Все этапы жизненного цикла в совокупности влияют на выбросы ПГ.

Обзор научных исследований по оценке жизненного цикла энергоустановок на основе ТОТЭ позволил выявить общие принципы оценки жизненного цикла таких устройств. При оценке жизненного цикла в составе энергоустановки на основе ТОТЭ обычно выделяют 4–20 материалов (металлы, керамика, пластик и пр.) [1, 5–24], учитывают обработку материалов (литье, формование, спекание, резка для производства батареи ТОТЭ, листовой прокат стали и т.д.). Дополнительно могут учитываться растворители, связующие, катализаторы, деионизированная вода и др. [5–7, 13–15, 18, 23]. На этапе эксплуатации энергоустановки учитывается расход топлива. При оценке жизненного цикла редко учитывают технологии обработки материалов, транспортировку материалов/конструкций и их техническое обслуживание.

Оценка воздействия на окружающую среду энергетической установки на основе ТОТЭ проводилась по выбросам ПГ [4].

#### *Рассматриваемая энергетическая установка на основе ТОТЭ*

В качестве объекта исследования была выбрана опытная энергетическая установка на основе ТОТЭ мощностью 2,5 кВт, разработанная и изготовленная в Российской Федерации. Энергоустановка предназначена для использования в удаленных населенных пунктах и промышленных объектах (например, предприятиях нефтегазового сектора). На рис. 2 представлен общий вид разработанной энергетической установки на основе ТОТЭ мощностью 2,5 кВт.

Энергетическая установка на основе ТОТЭ состоит из корпуса, высокотемпературного блока (ВТБ), системы управления, прочего вспомогательного оборудования (система подачи газа, насосы, фильтры, счетчики и т.д.) [26]. КПД с учетом собственных нужд составляет не менее 48%.

В качестве основного топлива для энергетической установки рассматривается природный газ. ВТБ энергоустановки включает топливный процессор, внутри которого происходит генерация синтез-газа методом парового реформинга природного газа (метана) [27]. Энергоустановка может использовать, помимо природного газа, и другие виды топлива, например водород



Рис. 2. Общий вид энергетической установки на основе ТОТЭ мощностью 2,5 кВт [25]

Fig. 2. General view of a SOFC power plant with a capacity of 2.5 kW

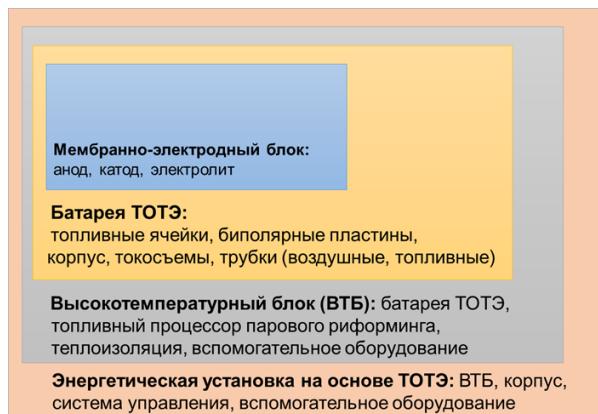


Рис. 3. Элементы оценки жизненного цикла энергетической установки на основе ТОТЭ

Fig. 3. Elements of life cycle assessment of a SOFC power plant

или биогаз. Использование низкоуглеродного или биогенного топлива позволит снизить углеродный след генерируемой энергии.

При оценке жизненного цикла энергетической установки на основе ТОТЭ были учтены следующие компоненты (рис. 3): собственно энергетическая установка на основе ТОТЭ, состоящая из корпуса, ВТБ, системы управления и вспомогательного оборудования. ВТБ содержит топливный процессор, батарею ТОТЭ, состоящую из топливных ячеек.

## Результаты

Оценка углеродного следа энергоустановки на основе ТОТЭ при ее производстве и использовании в условиях Российской Федерации была проведена согласно методологии, описанной в [4]. Границы системы жизненного цикла энергоустановки включали производство материалов, в том числе их обработку, сборку и монтаж, эксплуатацию и утилизацию отходов после окончания службы энергоустановки.

Инвентаризационный анализ при производстве энергоустановки на основе ТОТЭ включал сбор информации об основных потоках сырья и материалов. При определении расхода сырья

и материалов для энергетической установки на основе ТОТЭ использовались сведения, представленные разработчиком энергоустановки (табл. 1).

Таблица 1  
Вклад материалов в углеродный след производства энергоустановки на основе ТОТЭ  
Table 1  
Contribution of materials to the carbon footprint of the production of a power plant based on SOFC

Материал	Масса, кг	Содержание, %	Источник	Углеродный след*, кг CO <sub>2</sub> -экв. / кг материала	На 1 энергетическую установку	
					Углеродный след, кг CO <sub>2</sub> -экв.	Вклад материалов в углеродный след, %
Сталь конструкционная	410	37,9	<sup>9</sup>	5,1	2078,7	57,3
Сталь нержавеющая	270,8	25,1	10	1,9	511,8	14,1
Минеральное волокно	181	16,8	<sup>10</sup>	1,1	195,5	5,4
Огнеупорная глина	20	1,9	[28]	0,2	3,4	0,1
Керамика (жаропрочный технический фарфор)	3,6	0,3	[29]	0,3	1,2	0,0
АБС**	27,5	2,5	<sup>11</sup>	3,7	101,8	2,8
Смесь пластиков АБС и ПК	14	1,3	<sup>11, 12</sup>	4,6	64,4	1,8
ПА	20	1,9	<sup>13</sup>	6,5	130,0	3,6
Медь	50	4,6	10	5,5	275,0	7,6
Свинец	60	5,6	[30]	1,3	78,0	2,1
Ni-YSZ***	21,9	2,0	[24]	7,0	153,3	4,2
LSCF-CGO****	1,2	0,1	[24]	25,0	30	0,8
YSZ*****	0,4	0,04	[5]	12,9	5,16	0,1
<b>Общее</b>	<b>1080,4</b>	<b>100</b>			<b>3628,2</b>	100

\* Углеродный след материалов взят для материалов аналогов, используемых при производстве схожих батарей ТОТЭ.

\*\*АБС – акрилонитрилбутадиенстиrol.

\*\*\*Ni-YSZ – иттрия-стабилизированный цирконий с никелем.

\*\*\*\*LSCF-CGO – аэро-кобальтит лантана стронция – церат гадолиния.

\*\*\*\*\*YSZ – иттрия-стабилизированный цирконий.

Основными материалами, используемыми для производства компонентов энергоустановки на основе ТОТЭ, являются конструкционная и нержавеющая стали (63%), минеральное волокно, которое составляет относительно большой процент общей массы (около 17%) и используется для теплоизоляции высокотемпературного блока.

<sup>9</sup> Ecoinvent database version 3.8. Режим доступа: <https://support.ecoinvent.org/eco-invent-version-3.8> (дата обращения: 03.06.2025)

<sup>10</sup> Magnesium Oxide Building Materials Learn all about magnesium oxide and why it is a unique building material. Режим доступа: <https://magoxx.com/wp-content/uploads/2019/01/MAGOXX-CO2-Footprint-infographic.pdf> (дата обращения: 12.04.2025).

<sup>11</sup> Achieving a lower carbon footprint with Axion Polymers. Режим доступа: <https://www.buildingtalk.com/achieving-a-lower-carbon-footprint-with-axion-polymers/> (дата обращения: 10.04.2025).

<sup>12</sup> How environmentally friendly is polycarbonate? Режим доступа: <https://www.reptileknowledge.com/reptile-pedia/how-environmentally-friendly-is-polycarbonate> (дата обращения: 12.04.2025).

<sup>13</sup> Nylon 6/6 glass fiber reinforced (PA66-GF). Режим доступа: [https://sustainabilityworkshop.venturewell.org/sites/default/files/gallery-files/aircreation\\_materialdata\\_pa66-gf.pdf](https://sustainabilityworkshop.venturewell.org/sites/default/files/gallery-files/aircreation_materialdata_pa66-gf.pdf) (дата обращения: 12.04.2025).

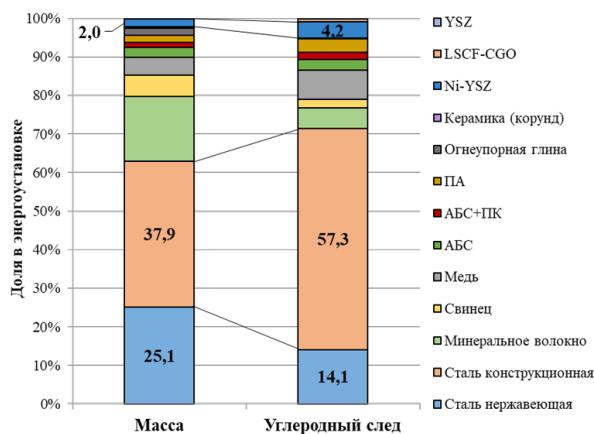


Рис. 4. Вклад материалов в углеродный след при производстве энергоустановки на основе ТОТЭ

Fig. 4. Contribution of materials to the carbon footprint of a SOFC power plant

Величина углеродного следа при производстве основных материалов определяется большим набором факторов, таких как технология и метод производства, вид сырья (первичное или вторичное), источник энергии и т.д. [4]. Для определения вклада конструкционных материалов в углеродный след энергоустановки на основе ТОТЭ была выполнена оценка содержания материалов и выбросов ПГ при их производстве (табл. 1 и рис. 4).

Оценка выбросов ПГ при производстве энергоустановки на основе ТОТЭ позволила определить вклад отдельных используемых материалов. При производстве энергоустановки основной вклад в углеродный след вносят конструкционная (57,3%) и нержавеющая сталь (14,1%). Значительный вклад в углеродный след (4,2%) также вносят керамические материалы (Ni-YSZ), используемые для изготовления анода в батарее ТОТЭ. На долю меди, использованной при производстве систем управления (САУ и блок управления), приходится 7,6% углеродного следа производства установки.

Помимо производства материалов на углеродный след энергоустановки на основе ТОТЭ влияют процессы обработки материалов, расход энергетических ресурсов, необходимых для сборки. По данным [15], углеродный след при сборке и монтаже энергоустановки на основе ТОТЭ составляет около 27% от полного углеродного следа производства установки.

Этап эксплуатации энергоустановки на основе ТОТЭ включает процессы производства и использования топлива. В данном исследовании проводилась оценка по трем вариантам топлива: природный газ, водородсодержащее топливо (ВСТ), состоящее из 80% метана и 20% водорода, и водород. В рамках производственного цикла топлива учитывались этапы добычи сырья и использования различных ресурсов, таких как электроэнергия, вода и топливо [4].

Выбросы ПГ при использовании природного газа в энергоустановке оценивались на основе расхода, компонентного состава топлива, углеродного следа его добычи (60,6 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч) и конверсии топлива, включающей генерацию синтез-газа методом парового реформинга и его электрохимическое окисление на топливных ячейках ТОТЭ (307 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч) [26, 31, 32]. Выбросы ПГ, образуемых при эксплуатации энергоустановки на водородном топливе, проводилась с учетом расхода водорода<sup>14</sup> и углеродного следа водорода (197,7 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч) [33].

На рис. 5 представлен углеродный след этапа эксплуатации энергоустановки на основе ТОТЭ на различных видах топлива.

Анализ полученных данных об углеродном следе этапа эксплуатации энергоустановки на основе ТОТЭ показал, что наибольший углеродный след связан с производством и использованием природного газа (367 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч). Использование ВСТ в энергоустановке способствует

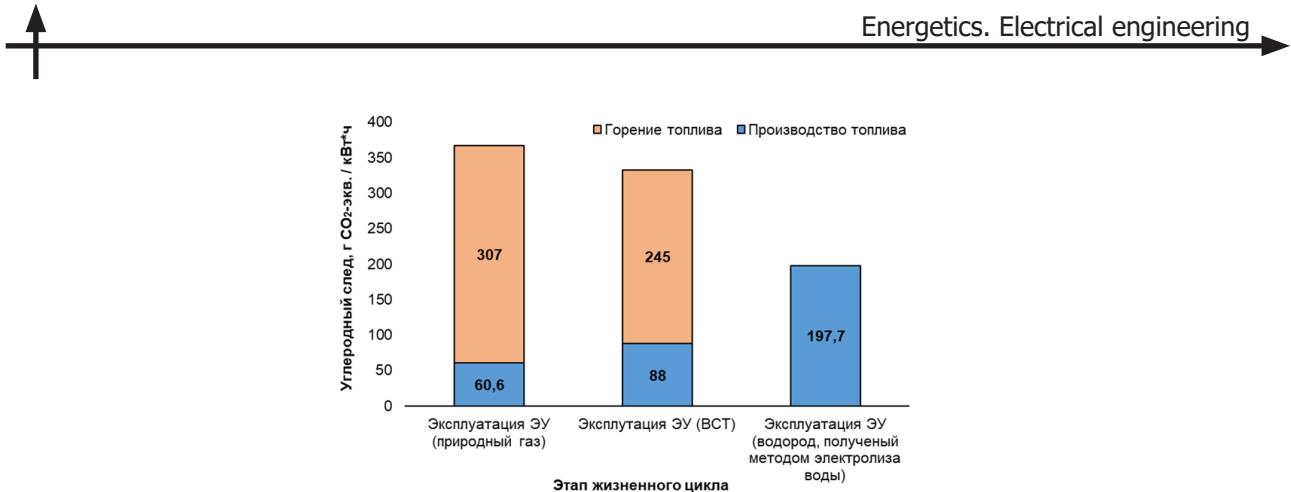


Рис. 5. Углеродный след этапа эксплуатации энергоустановки на основе ТОТЭ на различных видах топлива

Fig. 5. Carbon footprint of the operational stage of a SOFC power plant on different types of fuel

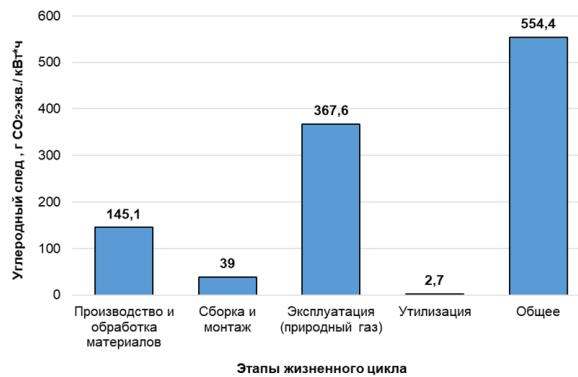


Рис. 6. Углеродный след энергоустановки на основе ТОТЭ по этапам жизненного цикла

Fig. 6. Carbon footprint of a SOFC power plant by life cycle stages

снижению потребления топлива и углеродного следа на 20% по сравнению с выбросами ПГ от использования природного газа. Наибольший углеродный след связан с производством водорода (197,7 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч) [31]. Однако преимуществом является то, что использование водорода в энергоустановке не приводит к прямым выбросам ПГ.

Этап утилизации энергоустановки на основе ТОТЭ связан с мероприятиями по обращению с отходами по окончанию срока ее эксплуатации. Около 70% материалов, используемых для изготовления энергоустановки, подлежат вторичной переработке согласно рекомендациям производителей. Этап утилизации энергоустановки на основе ТОТЭ, по данным исследований [18], составляет 0,5% от общего углеродного следа.

На рис. 6 представлен углеродный след энергоустановки на основе ТОТЭ по этапам жизненного цикла.

Анализ полученных данных об углеродном следе на этапах жизненного цикла энергоустановки показал, что наибольшее воздействие на окружающую среду оказывает этап эксплуатации, который составляет около 70% от общего углеродного следа. Углеродный след этапа эксплуатации энергоустановки может быть снижен при использовании водородного топлива на 32% (до 385 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч). Углеродный след производства энергоустановки составил 145,1 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч, большая часть которого пришлась на производство необходимых материалов. Наименьший углеродный след среди рассмотренных этапов жизненного цикла составил этап

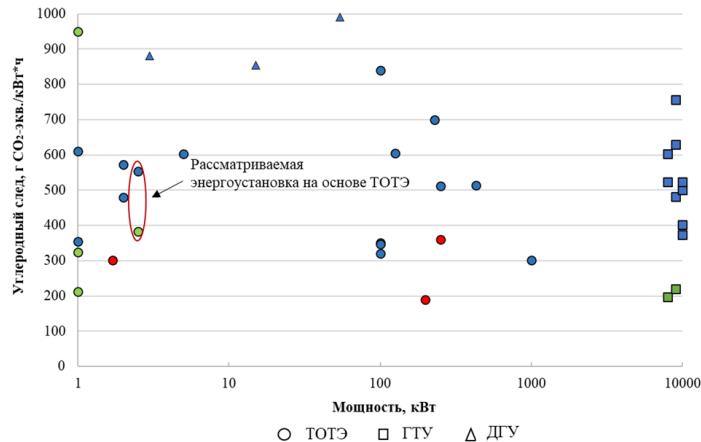


Рис. 7. Углеродный след электроэнергии, производимой энергетическими установками в зависимости от мощности (вид топлива: синий – ископаемое топливо, красный – биотопливо, зеленый – водород)

Fig. 7. Carbon footprint of electricity produced by power plants depending on capacity (fuel type: blue – fossil fuel, red – biofuel, green – hydrogen)

утилизации – 2,7 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч.

### Обсуждение

Для сравнения результатов оценки углеродного следа энергоустановки на основе ТОТЭ были использованы данные исследований по другим энергетическим установкам – газотурбинным (ГТУ) и дизельным генераторным (ДГУ) – с различной мощностью на разных видах топлива (рис. 7) [1, 5–24, 34–36].

Как следует из рис. 7, нет четкой корреляции между удельными выбросами ПГ и мощностью энергетических установок. Это может быть объяснено как разницей в конструкциях самих установок (различные количества материалов, особенности производственных процессов, виды топлива, источники энергии, расходы производственных ресурсов и т.д.), так и тем, что сама оценка жизненного цикла выполнена с разной детализацией и учтенными параметрами.

По результатам исследований [1, 5–10, 18, 20, 22–24] углеродного следа электроэнергии, вырабатываемой энергоустановками, работающими на природном газе, было определено, что на этап производства установок приходится 30–345 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч, что составляет около 30% от общих выбросов CO<sub>2</sub>, на этап эксплуатации – 213–569 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч. Наиболее высокий углеродный след производимой электроэнергии был установлен при использовании ДГУ – 880–990 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч [34–36].

Выбросы ПГ энергоустановок на основе ТОТЭ малой мощности (1 кВт), работающие на водородном топливе, составляют 210–950 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч [12, 17, 21] и зависят в основном от способа производства водорода. Использование водорода в топливной смеси в энергетических установках будет перспективным, если для производства водорода будут использоваться низкоуглеродные источники энергии или применяться технологии улавливания и секвестрации углерода.

По данным исследований [11, 13–16, 19], углеродный след электроэнергии, вырабатываемой энергоустановками на основе ТОТЭ и ГТУ с использованием биотоплива, ниже, чем при использовании ископаемого топлива, и составляет 203–360 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч.

Полученные результаты собственных исследований по оценке углеродного следа рассматриваемой энергоустановки на основе ТОТЭ мощностью 2,5 кВт сопоставимы с углеродным следом других энергоустановок. Увеличение срока службы рассматриваемой энергоустановки



за счет регулярного сервиса и замены составляющих, использования качественных материалов позволит сократить выбросы ПГ ввиду снижения углеродного следа 1 кВт\*ч вырабатываемой электроэнергии.

### **Выводы**

В настоящее время энергетические установки на основе ТОТЭ рассматриваются как перспективные объекты малой генерации, так как не имеют территориальных и климатических ограничений в отличие от ветрогенераторов или солнечных панелей, могут обеспечивать меньшие удельные выбросы ПГ на единицу генерируемой энергии по сравнению с другими установками, использующими ископаемое топливо, так как имеют более высокий КПД (до 70% по электрической энергии).

На основании оценки углеродного следа рассматриваемой энергоустановки на основе ТОТЭ мощностью 2,5 кВт было определено, что основной вклад вносит этап эксплуатации (около 70%), при этом общий углеродный след составил 554,4 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт\*ч. Соответственно, выбросы ПГ энергоустановки определяются видом используемого топлива. Наиболее перспективным видом топлива для энергоустановок является водород, полученный с использованием низкоуглеродных источников энергии, или биотопливо.

Результаты оценки углеродного следа рассматриваемой энергоустановки на основе ТОТЭ мощностью 2,5 кВт показывают, что полученные значения углеродного следа сопоставимы с данными по другим энергоустановкам. Следовательно, рассматриваемая энергоустановка на основе ТОТЭ может быть эффективна в контексте снижения выбросов ПГ.

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

- [1] Smith L., Ibn-Mohammed T., Yang F., Reaney I.M., Sinclair D.C., Lenny Koh S.C. Comparative environmental profile assessments of commercial and novel material structures for solid oxide fuel cells, *Applied Energy*, 235 (2019) 1300–1313. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.11.028
- [2] Tsvetkov P., Andreichyk A., Kosarev O. The impact of economic development of primary and secondary industries on national CO<sub>2</sub> emissions: The case of Russian regions, *Journal of Environmental Management*, 351 (2024) 119881. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119881
- [3] Ширинкина Е.С., Ильиных Г.В., Можегорова Ю.В., Коротаев В.Н. Проблемы оценки жизненного цикла и углеродного следа водорода // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27, № 12. С. 48–55. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-12-48-55
- [4] Mozzhegorova Y., Ilinykh G., Korotaev V. Life Cycle Assessment of a gas turbine installation, *Energies*, 17 (2024) 345. DOI: 10.3390/en17020345
- [5] Staffell I., Ingram A., Kendall K. Energy and carbon payback times for solid oxide fuel cell based domestic CHP, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (3) (2012) 2509–2523. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.10.060
- [6] Shen Y., Yang Y., Song L., Lei T. Environmental impact assessment of solid oxide fuel cell power generation system based on Life Cycle Assessment – A case study in China, *Sustainability*, 16 (9) (2024) 3863. DOI: 10.3390/su16093863
- [7] Baratto F., Diwekar U.M. Life Cycle Assessment of fuel cell-based APUs, *Journal of Power Sources*, 139 (1–2) (2005) 188–196. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2004.07.025
- [8] Nease J., Adams T.A. Life cycle analyses of bulk-scale solid oxide fuel cell power plants and comparisons to the natural gas combined cycle, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 93 (8) (2015) 1349–1363. DOI: 10.1002/cjce.22207

[9] **Pehnt M.** Environmental impacts of distributed energy systems – The case of micro cogeneration, *Environmental Science & Policy*, 11 (1) (2008) 25–37. DOI: 10.1016/j.envsci.2007.07.001

[10] **Safaei A., Freire F., Henggeler Antunes C.** A life cycle multi-objective economic and environmental assessment of distributed generation in buildings, *Energy Conversion and Management*, 97 (2015) 420–427. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.03.048

[11] **Shafie S.M., Othman Z., Nu'man A.H., Yusuf N.N.A.N.** A model of life cycle on biogas feed to solid oxide fuel cell in Malaysia: Economic and environmental perspective, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 86 (2) (2024) 126–135.

[12] **Bouramdane A.-A.** Assessing the environmental impact of hydrogen fuel cell technologies (PEMFCs, SOFCs, AFCs): A cradle-to-gate attributional life cycle analysis, *Green Economics*, 1 (2) (2023) 82–110.

[13] **Gandiglio M., De Sario F., Lanzini A., Bobba S., Santarelli M., Blengini G.A.** Life Cycle Assessment of a biogas-fed Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) integrated in a wastewater treatment plant, *Energies*, 12 (9) (2019) 1611. DOI: 10.3390/en12091611

[14] **Moretti C., Corona B., Rühlin V., Götz T., Junginger M., Brunner T., Obernberger I., Shen L.** Combining biomass gasification and Solid Oxid Fuel Cell for heat and power generation: An early-stage Life Cycle Assessment, *Energies*, 13 (11) (2020) 2773. DOI: 10.3390/en13112773

[15] **Al-Khori K., Al-Ghamdi S.G., Boulfrad S., Koç M.** Life Cycle Assessment for integration of Solid Oxide Fuel Cells into gas processing operations, *Energies*, 14 (2021) 466. DOI: 10.3390/en14154668

[16] **Rillo E., Gandiglio M., Lanzini A., Bobba S., Santarelli M., Blengini G.** Life Cycle Assessment (LCA) of biogas-fed Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) plant, *Energy*, 126 (2017) 585–602. DOI: 10.1016/j.energy.2017.03.041

[17] **Cheng J., Lavery R., McCallum C.** Life Cycle Assessment of a Hydrogen Economy ready energy system for use in current day marine transport. ETP 9<sup>th</sup> Annual Conference, (2020).

[18] **Strazza C., Del Borghi A., Costamagna P., Gallo M., Brignole E., Girdinio P.** Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of a SOFC system for distributed power generation, *Energy Conversion and Management*, 100 (2015) 64–77. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.04.068

[19] **Sadhukhan J.** Distributed and micro-generation from biogas and agricultural application of sewage sludge: Comparative environmental performance analysis using life cycle approaches, *Applied Energy*, 122 (2014) 196–206. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.01.051

[20] **Zhang D., Evangelisti S., Lettieri P., Papageorgiou L.G.** Optimal design of CHP-based microgrids: Multiobjective optimisation and Life Cycle Assessment, *Energy*, 85 (2015) 1–13. DOI: 10.1016/j.energy.2015.03.036

[21] **Roy D., Samanta S., Roy S., Smallbone A., Roskilly A.P.** Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based energy systems for decarbonising residential power and heat in the United Kingdom, *Green Chemistry*, 26 (2024) 3979–3994. DOI: 10.1039/D3GC02645K

[22] **Mehmeti A., McPhail S.J., Pumiglia D., Carlini M.** Life cycle sustainability of solid oxide fuel cells: From methodological aspects to system implications, *Journal of Power Sources*, 325 (2016) 772–785. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.06.078

[23] **Birnbaum K.U., Steinberger-Wilkins R., Zapp P.** Solid Oxide Fuel cells sustainability aspects. In: *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (ed. R.A. Meyers), (2012) 9934–9978. DOI: 10.1007/978-1-4419-0851-3\_140

[24] Lee Y.D., Ahn K.Y., Morosuk T., Tsatsaronis G., Environmental impact assessment of a solid-oxide fuel-cell-based combined-heat-and-power-generation system, *Energy*, 79 (2015) 455–466. DOI: 10.1016/j.energy.2014.11.035

[25] **Вяльых И.А., Кондрашов Н.Н., Коротаев В.Н., Арасланов Р.Д., Галлямов А.Н., Долгих А.В., Власов С.А., Любимов А.В.** Проектирование опытной энергетической установки на ТОТЭ мощностью 2,5 кВт // Водород как основа низкоуглеродной экономики. 2024. С. 51–52.

[26] **Долгих А.В., Коротаев В.Н., Самойлов А.В., Вяльых И.А., Арасланов Р.Д.** Сравнение способов получения синтез-газа при проектировании энергоустановок на твердооксидных топливных элементах //



XI Всероссийская конференция «Топливные элементы и энергоустановки на их основе»: Сборник трудов. 2024. С. 59–61.

[27] Гончаров М.М., Краузин П.В., Кондрашов А.Н., Любимов А.В., Арасланов Р.Д., Долгих А.В., Кондрашов Н.Н., Коротаев В.Н., Вялых И.А. Оптимизация математической модели реактора парового реформинга энергетической установки на ТОТЭ // Водород как основа низкоуглеродной экономики. 2024. С. 27–28.

[28] Islam K., Motoshita M., Murakami S. Environmental sustainability of bricks in an emerging economy: Current environmental hotspots and mitigation potentials for the future, *Sustainability*, 15 (6) (2023) 5228. DOI: 10.3390/su15065228

[29] Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012. Sector report for the ceramics industry. 2009. 36 p.

[30] Davidson A.J., Binks S.P., Gediga J. Lead industry life cycle studies: Environmental impact and Life Cycle Assessment of lead battery and architectural sheet production, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21 (2016) 1624–1636. DOI: 10.1007/s11367-015-1021-5

[31] Мозжегорова Ю.В., Ильиных Г.В., Коротаев В.Н. Оценка жизненного цикла газотурбинной установки в Российской Федерации // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 2. С. 74–87. DOI: 10.18721/JEST.30204

[32] Faramawy S., Zaki T., Sakr A.A.-E. Natural gas origin, composition, and processing: A review, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34 (2016) 34–54. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.06.030

[33] Lim D., Kim A., Cheon S., Byun M., Lim H. Life cycle techno-economic and carbon footprint analysis of H<sub>2</sub> production via NH<sub>3</sub> decomposition: A Case study for the Republic of Korea, *Energy Conversion and Management*, 250 (2021) 114881. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114881

[34] Bionaz D., Marocco P., Ferrero D., Sundseth K., Santarelli M. Life cycle environmental analysis of a hydrogen-based energy storage system for remote applications, *Energy Reports*, 8 (2022) 5080–5092. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.03.181

[35] Sophia B.M., Ma'mun S. Economic analysis and environmental assessment of aluminum debris power generator for deployment to communal-scale disaster areas, *Heliyon*, 7 (2021) e07264. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07264

[36] Brucoli M., Steele K., Hamelmann C., Jagne E., Mukarakate D. Off-grid power supply carbon footprint and sustainable energy planning of primary health facilities.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**МОЗЖЕГОРОВА Юлия Владимировна** – доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, канд. техн. наук.

E-mail: juliagubaha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3081-9511>

**ИЛЬИНЫХ Галина Викторовна** – доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, канд. техн. наук.

E-mail: galina.perm.59@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8829-3500>

**КОРОТАЕВ Владимир Николаевич** – профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д-р техн. наук.

E-mail: korotaev@pstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9941-7052>

## REFERENCES

- [1] L. Smith, T. Ibn-Mohammed, F. Yang, I.M. Reaney, D.C. Sinclair, S.C. Lenny Koh, Comparative environmental profile assessments of commercial and novel material structures for solid oxide fuel cells, *Applied Energy*, 235 (2019) 1300–1313. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.11.028
- [2] P. Tsvetkov, A. Andreichyk, O. Kosarev, The impact of economic development of primary and secondary industries on national CO<sub>2</sub> emissions: The case of Russian regions, *Journal of Environmental Management*, 351 (2024) 119881. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119881
- [3] E. Shirinkina, G. Ilinykh, Yu. Mozzhegorova, V. Korotaev, Challenges in Life Cycle Assessment and carbon footprint of hydrogen, *Ecology and Industry of Russia*, 27(12) (2023) 48–55. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-12-48-55
- [4] Y. Mozzhegorova, G. Ilinykh, V. Korotaev, Life Cycle Assessment of a gas turbine installation, *Energies*, 17 (2024) 345. DOI: 10.3390/en17020345
- [5] I. Staffell, A. Ingram, K. Kendall, Energy and carbon payback times for solid oxide fuel cell based domestic CHP, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (3) (2012) 2509–2523. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.10.060
- [6] Y. Shen, Y. Yang, L. Song, T. Lei, Environmental impact assessment of solid oxide fuel cell power generation system based on Life Cycle Assessment – A case study in China, *Sustainability*, 16 (9) (2024) 3863. DOI: 10.3390/su16093863
- [7] F. Baratto, U.M. Diwekar, Life Cycle Assessment of fuel cell-based APUs, *Journal of Power Sources*, 139 (1–2) (2005) 188–196. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2004.07.025
- [8] J. Nease, T.A. Adams, Life cycle analyses of bulk-scale solid oxide fuel cell power plants and comparisons to the natural gas combined cycle, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 93 (8) (2015) 1349–1363. DOI: 10.1002/cjce.22207
- [9] M. Pehnt, Environmental impacts of distributed energy systems – The case of micro cogeneration, *Environmental Science & Policy*, 11 (1) (2008) 25–37. DOI: 10.1016/j.envsci.2007.07.001
- [10] A. Safaei, F. Freire, C. Henggeler Antunes, A life cycle multi-objective economic and environmental assessment of distributed generation in buildings, *Energy Conversion and Management*, 97 (2015) 420–427. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.03.048
- [11] S.M. Shafie, Z. Othman, A.H. Nu'man, N.N.A.N. Yusuf, A model of life cycle on biogas feed to solid oxide fuel cell in Malaysia: Economic and environmental perspective, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 86 (2) (2024) 126–135.
- [12] A.-A. Bouramdané, Assessing the environmental impact of hydrogen fuel cell technologies (PEM-FCs, SOFCs, AFCs): A cradle-to-gate attributional life cycle analysis, *Green Economics*, 1 (2) (2023) 82–110.
- [13] M. Gandiglio, F. De Sario, A. Lanzini, S. Bobba, M. Santarelli, G.A. Blengini, Life Cycle Assessment of a biogas-fed Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) integrated in a wastewater treatment plant, *Energies*, 12 (9) (2019) 1611. DOI: 10.3390/en12091611
- [14] C. Moretti, B. Corona, V. Rühlin, T. Götz, M. Junginger, T. Brunner, I. Obernberger, L. Shen, Combining biomass gasification and Solid Oxid Fuel Cell for heat and power generation: An early-stage Life Cycle Assessment, *Energies*, 13 (11) (2020) 2773. DOI: 10.3390/en13112773
- [15] K. Al-Khori, S.G. Al-Ghamdi, S. Boulfrad, M. Koç, Life Cycle Assessment for integration of Solid Oxide Fuel Cells into gas processing operations, *Energies*, 14 (2021) 466. DOI: 10.3390/en14154668
- [16] E. Rillo, M. Gandiglio, A. Lanzini, S. Bobba, M. Santarelli, G. Blengini, Life Cycle Assessment (LCA) of biogas-fed Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) plant, *Energy*, 126 (2017) 585–602. DOI: 10.1016/j.energy.2017.03.041
- [17] J. Cheng, R. Lavery, C. McCallum, Life Cycle Assessment of a Hydrogen Economy ready energy system for use in current day marine transport. ETP 9<sup>th</sup> Annual Conference, (2020).

- [18] C. Strazza, A. Del Borghi, P. Costamagna, M. Gallo, E. Brignole, P. Girdinio, Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of a SOFC system for distributed power generation, *Energy Conversion and Management*, 100 (2015) 64–77. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.04.068
- [19] J. Sadhukhan, Distributed and micro-generation from biogas and agricultural application of sewage sludge: Comparative environmental performance analysis using life cycle approaches, *Applied Energy*, 122 (2014) 196–206. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.01.051
- [20] D. Zhang, S. Evangelisti, P. Lettieri, L.G. Papageorgiou, Optimal design of CHP-based microgrids: Multiobjective optimisation and Life Cycle Assessment, *Energy*, 85 (2015) 1–13. DOI: 10.1016/j.energy.2015.03.036
- [21] D. Roy, S. Samanta, S. Roy, A. Smallbonea, A.P. Roskillya, Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based energy systems for decarbonising residential power and heat in the United Kingdom, *Green Chemistry*, 26 (2024) 3979–3994. DOI: 10.1039/D3GC02645K
- [22] A. Mehmeti, S.J. McPhail, D. Pumiglia, M. Carlini, Life cycle sustainability of solid oxide fuel cells: From methodological aspects to system implications, *Journal of Power Sources*, 325 (2016) 772–785. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.06.078
- [23] K.U. Birnbaum, R. Steinberger-Wilkens, P. Zapp, Solid Oxide Fuel cells sustainability aspects. In: *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (ed. R.A. Meyers), (2012) 9934–9978. DOI: 10.1007/978-1-4419-0851-3\_140
- [24] Y.D. Lee, K.Y. Ahn, T. Morosuk, G. Tsatsaronis, Environmental impact assessment of a solid-oxide fuel-cell-based combined-heat-and-power-generation system, *Energy*, 79 (2015) 455–466. DOI: 10.1016/j.energy.2014.11.035
- [25] I.A. Vialykh, N.N. Kondrashov, V.N. Korotaev, R.D. Araslanov, A.N. Galliamov, A.V. Dolgikh, S.A. Vlasov, A.V. Liubimov, Proektirovaniye optychnoi energeticheskoi ustanovki na TOTE moshchnost'iu 2,5 kVt [Design of a pilot power plant on SOFC with a capacity of 2.5 kW], Vodorod kak osnova nizkouglerodnoi ekonomiki [Hydrogen as the basis of a low-carbon economy], (2024) 51–52.
- [26] A.V. Dolgikh, V.N. Korotaev, A.V. Samoilov, I.A. Vialykh, R.D. Araslanov, Comparison of synthesis gas production methods for designing power units on solid oxide fuel cells, 11th All-Russian Conference “Fuel Cells and Power Plants Based on Them”, (2024) 59–61.
- [27] M.M. Goncharov, P.V. Krauzin, A.N. Kondrashov, A.V. Liubimov, R.D. Araslanov, A.V. Dolgikh, N.N. Kondrashov, V.N. Korotaev, I.A. Vialykh, Optimizatsiya matematicheskoi modeli reaktora parovogo riforminga energeticheskoi ustanovki na TOTE [Optimization of the Mathematical Model of the Steam Reforming Reactor of the SOFC Power Plant], Vodorod kak osnova nizkouglerodnoi ekonomiki [Hydrogen as the basis of a low-carbon economy], (2024) 27–28.
- [28] K. Islam, M. Motoshita, S. Murakami, Environmental sustainability of bricks in an emerging economy: Current environmental hotspots and mitigation potentials for the future, *Sustainability*, 15 (6) (2023) 5228. DOI: 10.3390/su15065228
- [29] Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012. Sector report for the ceramics industry. 2009. 36 p.
- [30] A.J. Davidson, S.P. Binks, J. Gediga, Lead industry life cycle studies: Environmental impact and Life Cycle Assessment of lead battery and architectural sheet production, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21 (2016) 1624–1636. DOI: 10.1007/s11367-015-1021-5
- [31] Yu.V. Mozzhegorova, G.V. Ilinykh, V.N. Korotaev, Life cycle assessment of a gas turbine installation in the Russian Federation, *Global Energy*, 30 (02) (2024) 74–87. DOI: 10.18721/JEST.30204
- [32] S. Faramawy, T. Zaki, A.A.-E. Sakr, Natural gas origin, composition, and processing: A review, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34 (2016) 34–54. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.06.030
- [33] D. Lim, A. Kim, S. Cheon, M. Byun, H. Lim, Life cycle techno-economic and carbon footprint analysis of H<sub>2</sub> production via NH<sub>3</sub> decomposition: A Case study for the Republic of Korea, *Energy Conversion and Management*, 250 (2021) 114881. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114881

[34] **D. Bionaz, P. Marocco, D. Ferrero, K. Sundseth, M. Santarelli**, Life cycle environmental analysis of a hydrogen-based energy storage system for remote applications, *Energy Reports*, 8 (2022) 5080–5092. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.03.181

[35] **B.M. Sopha, S. Ma'mun**, Economic analysis and environmental assessment of aluminum debris power generator for deployment to communal-scale disaster areas, *Heliyon*, 7 (2021) e07264. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07264

[36] **M. Brucoli, K. Steele, C. Hamelmann, E. Jagne, D. Mukarakate**, Off-grid power supply carbon footprint and sustainable energy planning of primary health facilities.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Yulia V. MOZZHEGOROVA** – *Perm National Research Polytechnic University*.  
E-mail: juliagubaha@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3081-9511>

**Galina V. ILINYKH** – *Perm National Research Polytechnic University*.  
E-mail: galina.perm.59@yandex.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8829-3500>

**Vladimir N. KOROTAEV** – *Perm National Research Polytechnic University*.  
E-mail: korotaev@pstu.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9941-7052>

Поступила: 30.04.2025; Одобрена: 20.05.2025; Принята: 27.05.2025.  
Submitted: 30.04.2025; Approved: 20.05.2025; Accepted: 27.05.2025.