

DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-4-365-384

EDN: MYOVNQ


УДК 504.03

Научная статья / Research article

Углеродный след энергетического сектора

Л.Р. Гайнуллина¹  , А.Р. Фасыхов¹,
Н.Ф. Тимербаев² , В.Р. Ибрагимова²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань,
Российская Федерация

²Научно-технический центр «Альтернативная энергетика», г. Казань,
Российская Федерация
 gainullina7819@mail.ru

Аннотация. Внимание всего мира направлено на антропогенную составляющую климатических изменений. Поскольку значительный вклад в эти изменения вносит энергетический сектор (77,9 %), Россия имеет в качестве источника производства энергии природный газ, нефть и уголь, при этом актуальным остается вопрос использования ресурсной низкоуглеродной базы, применения новых технологий улавливания и утилизации углерода, использования возобновляемых источников энергии. Цель исследования – анализ углеродного следа генерирующих предприятий и различных источников энергии, а также определение пути развития использования низкоуглеродных источников, например АЭС и ГЭС, применения новых технологий в системе отопления, технологий утилизации хладагентов, вторичных энергоресурсов и т. д. Результаты исследования: углеродный след энергетического сектора рассмотрен по охватам Score 1 и Score 2. Анализ углеродного следа генерирующих предприятий (Score 1) показал, что наибольший вклад оказывают электрические станции на органическом топливе с удельными показателями выбросов CO₂ 450-1000 г/кВт·ч. Гидроэлектростанции, относящиеся к категории электростанций на возобновляемых источниках энергии (ВЭС), из-за большой суммарной эмиссии метана с водохранилищ находятся на втором месте (24 г/кВт·ч), опережая по выбросам атомные электростанции с удельным показателем выбросов 12 г/кВт·ч. Ветровые электростанции (11 г/кВт·ч) близки по углеродной нейтральности к атомным электростанциям. Неоднозначное положение одного из лидеров зеленой энергетики, солнечных электростанций (48 г/кВт·ч) связано с этапом утилизации применяемого оборудования. Также представлены удельные значения выбросов категории Score 2. По результатам анализа энергетического сектора охватов Score 1 и 2 приведены рекомендации по снижению углеродного следа.

© Гайнуллина Л.Р., Фасыхов А.Р., Тимербаев Н.Ф., Ибрагимова В.Р., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Ключевые слова: парниковые газы, производство электрической энергии, производство тепловой энергии, возобновляемые источники энергии

Вклад авторов. Гайнуллина Л.Р. – организация сбора данных, дизайн исследования, написание текста; Фасыхов А.Р. – сбор и обработка результатов исследования, расчетные уточнения удельных показателей выбросов, анализ полученных данных; Тимербаев Н.Ф. – концепция исследования; Ибрагимова В.Р. – анализ литературы по выбросам парниковых газов.

История статьи: поступила в редакцию 23.03.2024; доработана после рецензирования 15.05.2024; принята к публикации 26.08.2024.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Гайнуллина Л.Р., Фасыхов А.Р., Тимербаев Н.Ф., Ибрагимова В.Р. Углеродный след энергетического сектора // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 4. С. 365–384. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-365-384>

Carbon footprint of the energy sector

Leysan R. Gainullina¹  , Aidar R. Fasykhov¹,
Nail F. Timerbaev² , Victoria R. Ibragimova

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

²Scientific and Technical Center for Alternative Energy, Kazan, Russian Federation

 gainullina7819@mail.ru

Abstract. The world's attention is focused on the anthropogenic component of climate change. The energy sector (77.9%) makes a significant contribution to these changes. Russia, has natural gas, oil and coal as a source of energy production, while the issue of using low-carbon resource base, application of new technologies of carbon capture and utilization, use of renewable energy sources remains relevant. The purpose of this study is to analyze the carbon footprint of generating enterprises and various energy sources, and to determine the way of development of the use of low-carbon sources, such as nuclear power plants and hydroelectric power plants, the application of new technologies in the heating system, refrigerant utilization technologies, secondary energy resources, etc. Results: The carbon footprint of the energy sector has been considered for Scope 1 and Scope 2. The analysis of the carbon footprint of generating enterprises (Scope 1) showed that the largest contribution is made by fossil fuel power plants with specific CO₂ emission rates of 450–1000 g/kWh. Hydroelectric power plants belonging to the category of renewable energy power plants (RES) due to large total methane emissions from reservoirs are in the second place (24 g/kWh), ahead of nuclear power plants with specific emission rate of 12 g/kWh. Wind power plants (11 g/kWh) are close to nuclear power plants in terms of carbon neutrality. The ambiguous position of one of the leaders of green energy, solar power plants (48 g/kWh) is associated with the stage of utilization of the equipment used. Specific emission values of Scope 2 category are also given. Based on the results of the analysis of the energy sector of Scope 1 and 2, recommendations for reducing the carbon footprint are given.

Keywords: greenhouse gases, electricity generation, heat generation, renewable energy.

Authors' contribution. *Gainullina L.R.* – organization of data collection, research design, text writing; *Fasykhov A.R.* – collection and processing of research results, calculation refinements of specific emission indicators, analysis of obtained data; *Timerbaev N.F.* – research concept; *Ibragimova V.R.* – literature analysis on greenhouse gas emissions.

Article history: received 23.03.2024; revised 15.05.2024; accepted 26.08.2024.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Gainullina LR, Fasykhov AR, Timerbaev NF, Ibragimova VR. Carbon footprint of the energy sector. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2024;32(4):365–384. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-365-384>

Введение

Предприятия всех размеров и всех отраслей все больше осознают необходимость сокращения выбросов парниковых газов и решения вопросов устойчивого развития в рамках своей деятельности, чтобы стать бизнесом с нулевым уровнем углеродного следа. Основой эффективной стратегии снижения углеродного следа предприятия является точное отслеживание, распределение и измерение выбросов парниковых газов. Парниковые выбросы предприятий делятся на три категории. Четкое разделение и расчет по этим категориям является сложным, но необходимым процессом на пути уменьшения воздействия предприятия на климат.

Согласно Протоколу о парниковых газах¹ выбросы категории Score 1 включают прямые выбросы парниковых газов предприятия из источников (котлы, печи, транспортные средства), принадлежащих или контролируемых данным предприятием. В первую очередь к таким предприятиям относятся генерирующие электроэнергетические компании и поставщики, контролирующие свои объекты по производству энергии и продающие ее в местную сеть. Эта же категория охватывает технологические выбросы, которые высвобождаются во время промышленных процессов и производства (например, заводские пары, химикаты).

В отличие от прямых выбросов косвенные выбросы (Score 2 и Score 3) являются следствием операционной деятельности отчитывающейся организации, но возникают из источников, не принадлежащих ей и не контролируемых ею. Для многих компаний значительные выбросы парниковых газов приходятся именно на Score 2, следовательно, снижение общего углеродного следа компании может быть осуществлено за счет энергосбережения и применения энергоэффективных устройств [1]. Косвенные выбросы Score 2 включают парниковые газы от потребителей энергии, такой как электроэнергия, пар, тепло или охлаждение, вырабатываемой за пределами

¹ The Greenhouse Gas Protocol // [Ghgprotocol.org](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf). URL: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf> (accessed: 09.10.2022).

площадки и потребляемой предприятием. Например, электроэнергия, приобретаемая у коммунальной компании, централизованное отопление, пар, используемый в промышленных процессах, вырабатываются за пределами предприятия, поэтому выбросы парниковых газов при их производстве считаются косвенными.

Косвенные выбросы категории Score 3 определяются жизненным циклом товаров и услуг (закупка сырья и комплектующих, доставка, продажа, использование, утилизация продукции по окончании срока ее службы, утилизация отходов, деловые поездки и т.д.) [2]. В этой категории определены 15 типов выбросов, подсчет и декларирование которых пока не требуют [1].

Цель исследования – оценка углеродного следа объектов энергетики, определение удельных показателей выбросов углекислого газа, сравнительный анализ источников энергии, а также определение пути развития использования низкоуглеродных источников, например АЭС и ГЭС, применения новых технологий в системе отопления, технологий утилизации хладагентов, вторичных энергоресурсов и т.д.

Методики и исследования

Ведущая роль в электроэнергетической отрасли России (67 %) принадлежит тепловым электрическим станциям (ТЭС). Поэтому объем выбросов ТЭС (всего их в России около 400) достаточно большой. По виду потребляемого топлива они подразделяются на ТЭС, работающие на природном газе – 71 %, угле – 27,5 %, жидком топливе (мазуте) и альтернативных видах топлива – 1,5 %. Следовательно, углеродный след электроэнергетики в целом весьма значителен. На рис. 1 приведены выбросы в атмосферу углекислого газа при сжигании различных видов органического топлива².

В зависимости от вида топлива при его сжигании на ТЭС образуются оксиды серы и оксиды азота, углекислый газ, фтористые соединения, золотые частицы, оксиды металлов, а также газообразные продукты неполного сгорания топлива [3–5]. Годовые выбросы ТЭС мощностью 1 МВт на различных видах органического топлива представлены в табл. 1 [5].

Углеродный след при сжигании топлива зависит от его вида и от технологии сжигания (табл. 2). При сжигании природного газа выбросы CO₂ составляют 1,85 т CO₂/(тыс. м³), при сжигании каменного угля – 2,7–2,8 т CO₂/т, в зависимости от марки угля, топочного мазута – 3,1 т CO₂/т. Также количество выбросов газообразных продуктов зависит от технологии сжигания топлива и условий функционирования оборудования. Зависимость выбросов оксидов азота от типа камеры сгорания приведена в табл. 2 [6]. На примере оксида азота рассмотрим зависимость концентрации его выбросов от выбранного типа камеры сгорания (табл. 2) [6].

² Выбросы парниковых газов и их взаимосвязь с выработкой электроэнергии // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2019. № 9. С. 82–89. URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=9&year=2019> (дата обращения: 25.12.2023).

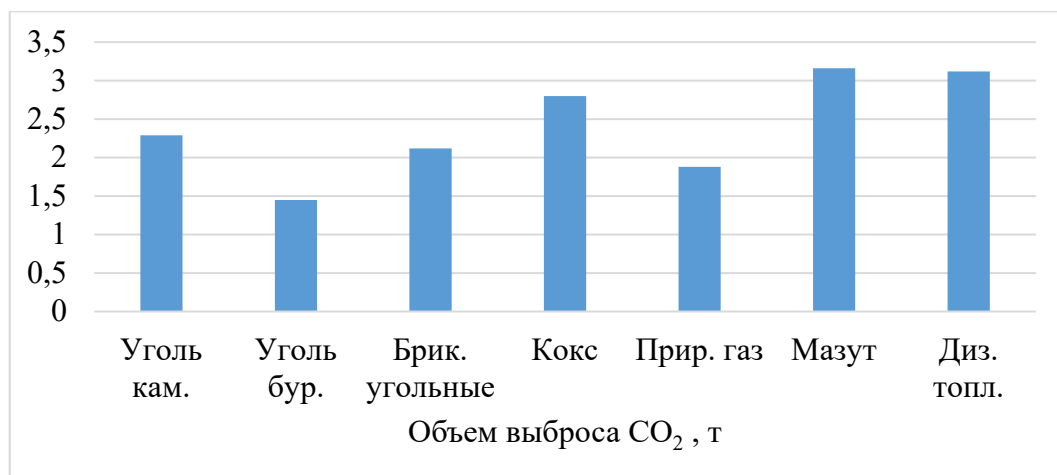


Рис. 1. Количество выбросов углекислого газа в атмосферу при сжигании топлива (на 1 т топлива)

Источник: составлено Л.Р. Гайнуллиной, А.Р. Фасыховым, Н.Ф. Тимербаевым, В.Р. Ибрагимовой на основе: Выбросы парниковых газов и их взаимосвязь с выработкой электроэнергии // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2019. № 9. С. 82–89.

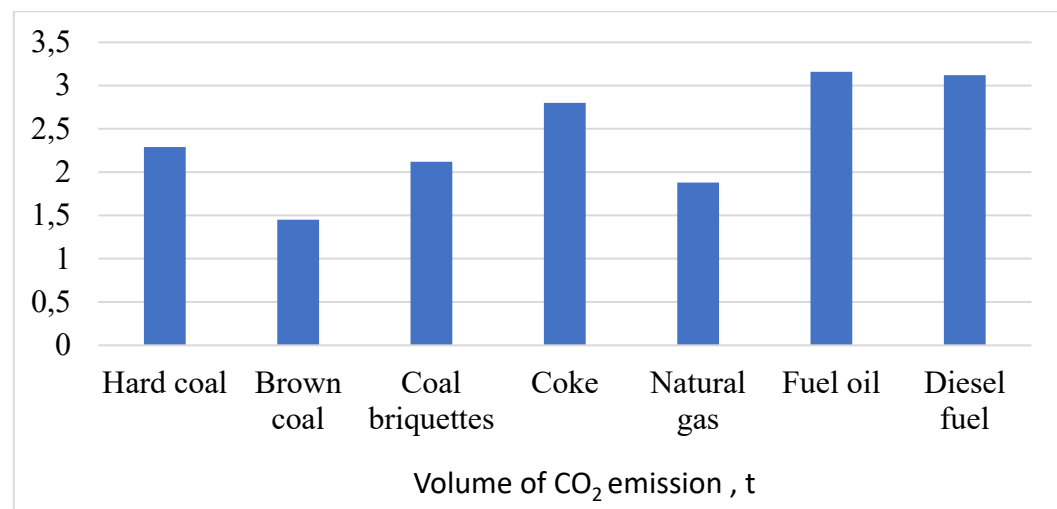


Figure 1. Amount of carbon dioxide emissions into the atmosphere at fuel combustion (per 1 t of fuel)

Source: Compiled by L.R. Gainullina, A.R. Fasykh, N.F. Timerbaev, V.R. Ibragimova based on Greenhouse gas emissions and their relationship with electricity generation. *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2019;(9):82–89.

Таблица 1. Средние годовые выбросы ТЭС мощностью 1 МВт

Выбросы	Выбросы при сжигании, т		
	угля	мазута	газа
SO ₂	138	98	0,013
NO _x	20,9	21,8	12,2
CO _x	0,5	0,009	–
C _x H _y	0,21	0,68	–
R-CH=O	0,05	0,12	0,03
Сажа	4,5	0,73	0,45
Σ	164,8	121,3	12,7

Источник: составлено Л.Р. Гайнуллиной, А.Р. Фасыховым, Н.Ф. Тимербаевым, В.Р. Ибрагимовой на основе [4].

Table 1. Average annual emissions of 1 MW TPP

Emissions	Combustion emissions, t		
	coal	fuel oil	gas
SO ₂	138	98	0.013
NO _x	20.9	21.8	12.2
CO _x	0.5	0.009	–
C _x H _y	0.21	0.68	–
R-CH=O	0.05	0.12	0.03
Soot	4.5	0.73	0.45
Σ	164.8	121.3	12.7

Source: compiled by L.R. Gainullina, A.R. Fasykh, N.F. Timerbaev, V.R. Ibragimova based on [4].

Основным антропогенным источником выбросов оксидов азота в атмосферу являются ТЭС, сжигающие органическое топливо.

Среднее значение углеродного следа сжигаемого на ТЭС природного газа составляет около 450 г/кВт·ч, а угля – около 1000 г/кВт·ч.

Таблица 2. Концентрация оксидов азота от выбранного типа камеры сгорания

Тип ГТУ	Тип камеры сгорания	Вид топлива	Коэффициент избытка воздуха в отработавших газах за турбиной, α _{гр}	Содержание кислорода в продуктах сгорания, %	Концентрация NO _x , мг/нм ³	
					Без совершенствования конструкций камер сгорания	С изменением конструкции
ГТ-100-750 ЛМЗ	Регистровая, блочная	Газотурбинное	4,1	15,9	275	–
ГТ-35-770 ХТЗ	Регистровая, выносная	Газ	4,6	16,4	225	–
		Газотурбинное	4,7	16,5	200	–
ГТ-25-770-П ЛМЗ	Регистровая, выносная	Газ	5,5	17,0	135	–
ГТГ-12	Высокофорсированная, блочная	Дизельное	5,1	16,9	190	–
ГТП-25 НЗЛ	Микрофакельная, кольцевая	Газ	4,1	15,9	85	–
ГТЭ-150 ЛМЗ	Высокофорсированная, блочная	Газ	3,5	15,0	220	150
		Газотурбинное	3,5	15,0	270	210
ГТЭ-45 ХТЗ	Регистровая, кольцевая	Газ	4,0	15,8	220	100
		Дизельное, газотурбинное	4,0	15,8	240	150

Источник: составлено Л.Р. Гайнуллиной, А.Р. Фасыховым, Н.Ф. Тимербаевым, В.Р. Ибрагимовой на основе: Выбросы парниковых газов и их взаимосвязь с выработкой электроэнергии // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2019. № 9. С. 82–89.

Table 2. Concentration of nitrogen oxides from the selected type of combustion chamber

GTP type	Type of combustion chamber	Type of fuel	Excess air ratio in exhaust gases behind the turbine, α_{ex}	Oxygen content in combustion products, %	NO _x concentration, mg/nm ³	
					Without improving combustion chamber designs	With the change in design
GT-100-750 LMZ	Register, block	Gas turbine	4.1	15.9	275	–
GT-35-770 KHTZ	Register, remote	Gas	4.6	16.4	225	–
		Gas turbine	4.7	16.5	200	–
GT-25-770-P LMZ	Register, remote	Gas	5.5	17.0	135	–
GTG-12	High-force, block-type	Diesel	5.1	16.9	190	–
GTP-25 NZL	Micro-flare, circular	Gas	4.1	15.9	85	–
GTE-150 LMZ	High-force, block-type	Gas	3.5	15.0	220	150
		Gas turbine	3.5	15.0	270	210
GTE-45 KHTZ	Register, circular	Gas	4.0	15.8	220	100
		Diesel, Gas turbine	4.0	15.8	240	150

Source: compiled by L.R. Gainullina, A.R. Fasykh, N.F. Timerbaev, V.R. Ibragimova based on Greenhouse gas emissions and their relationship with electricity generation. *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2019;(9):82–89.

Атомные электростанции (АЭС) считаются одними из самых чистых источников энергии, о чем свидетельствует исследование, проведенное экспертами ресурса Our World in Data³. В соответствии с этими данными выбросы парниковых газов на ГВт·ч на угольных электростанциях превышают выбросы на АЭС в 273 раза⁴. Согласно представленным данным АО «Концерн Росэнергоатом», 11 АЭС (37 энергоблоков) России по итогам 2020 г. впервые выработали более 20 % всей электроэнергии страны. Действующие и планируемые АЭС России, по данным на январь 2022 г., представлены на рис. 2⁵.

Россия находится в числе лидеров по развитию новых технологий выработки электроэнергии на АЭС. АЭС России позволяют ежегодно снижать выбросы CO₂ на 100 млн т CO₂-экв.⁶

³ Углеродный след АЭС ниже, чем у любых других энергостанций // Национальная ассоциация нефтегазового сервиса. 07.09.2021. URL: <https://news.myseldon.com/ru/news/index/258259287> (дата обращения: 08.11.2022).

⁴ Там же.

⁵ См.: [7]; Атомные станции России // Росэнергоатом. URL: https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/atomnye-elektrostantsii-rossii/ (дата обращения: 20.11.2022).

⁶ Обзор Российских практик в сфере низкоуглеродного развития и адаптации к изменениям климата / Министерство экономического развития Российской Федерации. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/f400e099af8482132163> (дата обращения: 16.11.2022).

**Действующие и планируемые АЭС России
Данные на январь 2022**



Рис. 2. Действующие и планируемые АЭС России

Источник: Новые АЭС России и рост доли атома до 25 % // Блог компании ITSOFT. 2022.

URL: <https://habr.com/ru/post/649235/> (дата обращения: 15.11.2022);

Тихонов С. Станет ли атомная энергетика альтернативой ветрякам // Российская газета.

Федеральный выпуск. 2021. № 231 (8582). URL: <https://rg.ru/2021/10/07/stanet-li-atomnaia-energetika-alternativoj-vetriakam.html> (дата обращения: 25.11.2022).

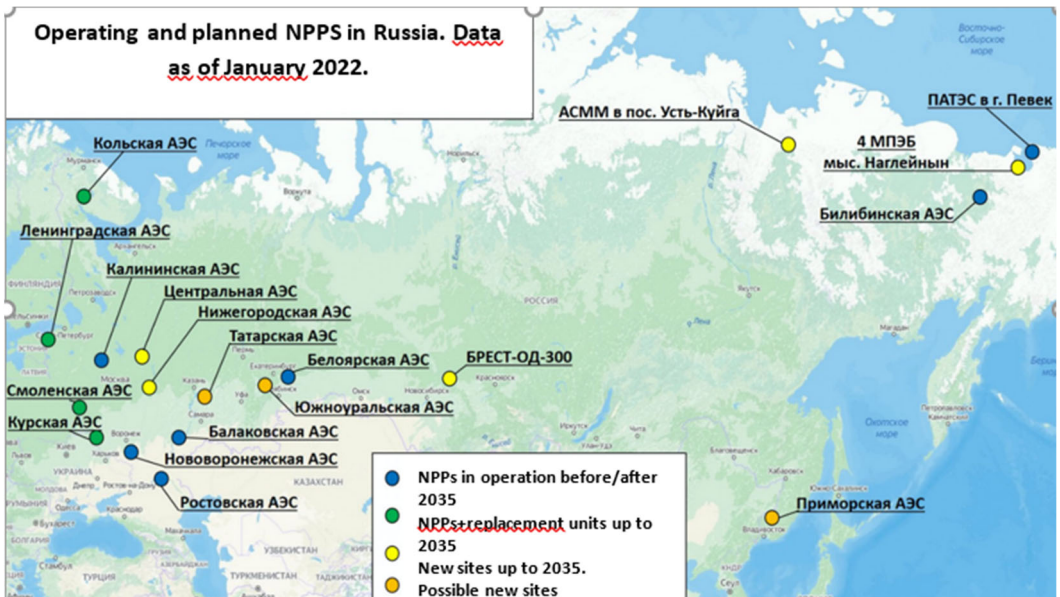


Figure 2. Operating and planned NPPs in Russia

Source: New NPPs in Russia and the growth of the share of atom to 25%. Blog of ITSOFT company. 2022.

(In Russ.). Available from: <https://habr.com/ru/post/649235/> (accessed: 15.11.2022).

Tikhonov S. Will nuclear energy become an alternative to wind turbines. *Rossiyskaya Gazeta. Federal issue.*

2021;231(8582). (In Russ.). Available from: <https://rg.ru/2021/10/07/stanet-li-atomnaia-energetika-alternativoj-vetriakam.html> (accessed: 25.11.2022).

Рассчитывая углеродный след генерирующих предприятий, необходимо учитывать не только производственный процесс, но и этап строительства, и вывод из эксплуатации.

Углеродный след АЭС в РФ с учетом производства оборудования составляет 9 г/кВт·ч, из них:

- начальные стадии ядерного топливного цикла – 57 %⁷;
- производство электроэнергии – 28 %⁸;
- строительство – 16 % (цемент – 6, нелегированная сталь – 3, арматурная сталь – 2 %)⁹;

– эмиссия CO₂ при выводе из эксплуатации – 3 %, а при эксплуатации – 9 %.

20,24 % установленной мощности электростанций в России приходится на гидроэлектростанции. Гидроэнергетику относят к энергетике с возобновляемым источником энергии. Однако углеродный след гидроэнергетики больше по сравнению с АЭС.

Строительный цикл включает бетоны и материалы для плотин. Произведенный нами расчет углеродного следа ГЭС на примере Чебоксарской ГЭС показал, что этап строительства занимает около 80 % выбросов, 20 % – выбросы в процессе эксплуатации (из них 80 % – эмиссия метана водохранилища, 20 % – от технологического оборудования, ЛЭП, трансформаторов и др.).

Значительные выбросы углекислого газа и особенно метана образуются в результате деструкции органических веществ, преимущественно донных осадков в аэробных и анаэробных условиях [7; 8]. Учитывая, что парниковый потенциал газа метана в 25 раз выше, чем у углекислого газа, гидроэнергетика также вносит вклад в углеродный след страны (табл. 3) [8].

Оценка суммарной эмиссии метана с водохранилищ РФ приведена в табл. 4 [9].

Электрические станции, работающие на возобновляемых источниках энергии – солнечной и ветровой энергии, относят к «зеленой» энергетике. Однако для таких станций необходимо учитывать углеродный след оборудования и утилизации, особенно для солнечных электрических станций. Углеродный след ВЭС (уровень выброса, который был осуществлен на стадии производства оборудования) составляет 11 г CO₂ на 1 кВт·ч вырабатываемой электроэнергии, СЭС – 44 г CO₂ на 1 кВт·ч¹⁰.

Сравнительные данные средних значений удельных выбросов парниковых газов в пересчете на CO₂ экв./кВт·ч объектов генерации электроэнергии в течение их жизненного цикла приведены на рис. 3.

⁷ Новое исследование французской EDF подтвердило очень низкоуглеродное качество атомной энергии // Атомная энергия. 23 июня 2022. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/06/23/125792> (дата обращения: 20.11.2022).

⁸ Там же.

⁹ Там же.

¹⁰ См.: [16]; Обзор климатической политики и мер в различных секторах экономики // Информационный бюллетень «Изменение климата». 2021. № 92. С. 6–9.

Таблица 3. Мощности источников метана

Мощности источников метана, млн т в год		
Источник	Глобальный вклад	Российский вклад
Естественные источники		
Болота	50–70	21,0
Озера	1–25	1,1
Океаны	1–17	
Искусственные источники		
Водохранилища		0,4

Источник: составлено Л.Р. Гайнуллиной, А.Р. Фасыховым, Н.Ф. Тимербаевым, В.Р. Ибрагимовой на основе [8].

Table 3. Methane source capacities

Methane source capacities, mln tons per year		
Source	Global contribution	Russian contribution
Natural sources		
Swamps	50–70	21.0
Lakes	1–25	1.1
Oceans	1–17	
Artificial sources		
Reservoirs		0.4

Source: compiled by L.R. Gainullina, A.R. Fasykh, N.F. Timerbaev, V.R. Ibragimova based on [8].

Таблица 4. Оценка суммарной эмиссии метана с водохранилищ субъектов РФ, 2019

Субъект РФ	Выделение CH_4 -C/год, т	Субъект РФ	Выделение CH_4 -C/год, т
Омская обл.	6,6	Смоленская обл.	1746,4
Псковская обл.	14,6	Воронежская обл.	1785,2
Сахалинская обл.	14,6	Пензенская обл.	1798,6
Республика Кабардино-Балкария	32,9	Курская обл.	1853,8
Республика Чечня	37,9	Свердловская обл.	2324,9
Республика Северная Осетия – Алания	42,0	Оренбургская обл.	2834,7
Забайкальский край	55,7	Республика Калмыкия	2859,3
Республика Бурятия	68,4	Краснодарский край	3674,0
Калининградская обл.	92,0	Челябинская обл.	3705,9
Алтайский край	98,0	Пермский край	4117,8
Республика Коми	144,6	Республика Башкортостан	4188,9
Орловская обл.	148,3	Ленингр. обл. и г. Санкт-Петербург	4498,8
Хабаровский край	163,7	Иркутская обл.	4876,3
Республика Дагестан	165,5	Московская обл. и г. Москва	6487,9
Магаданская обл.	187,5	Ставропольский край	7162,2
Владимирская обл.	234,5	Республика Чувашия	7574,1
Курганская обл.	250,3	Республика Адыгея	7732,0
Тюменская обл.	269,4	Ростовская обл.	9784,4
Республика Тыва	328,0	Красноярский край	9869,1
Брянская обл.	337,9	Ульяновская обл.	10 246,6
Республика Мордовия	355,9	Тверская обл.	11 588,9
Мурманская обл.	433,6	Астраханская обл.	12 022,8
Приморский край	520,7	Вологодская обл.	12 708,7
Республика Крым и г. Севастополь	535,5	Ивановская обл.	12 885,3
Республика Алтай	610,3	Волгоградская обл.	13 558,8
Кемеровская обл.	645,6	Ярославская обл.	19524,9

Окончание табл. 4

Субъект РФ	Выделение CH ₄ -C/год, т	Субъект РФ	Выделение CH ₄ -C/год, т
Калужская обл.	682,6	Республика Марий Эл	21 988,5
Республика Хакассия	690,2	Нижегородская обл.	23 668,8
Тульская обл.	724,7	Саратовская обл.	29 249,1
Республика Удмуртия	766,2	Самарская обл.	37 449,8
Кировская обл.	910,7	Республика Татарстан	79 251,4
Республика Карачаево-Черкесия	965,4	Томская обл.	нет данных
Белгородская обл.	1033,3	Камчатский край	нет данных
Республика Саха	1093,3	Еврейская АО	нет данных
Республика Карелия	1129,4	Ненецкий АО	нет данных
Тамбовская обл.	1250,1	Ханты-Мансийский АО – Югра	нет данных
Рязанская обл.	1314,0	Чукотский АО	нет данных
Новосибирская обл.	1337,4	Ямало-Ненецкий АО	нет данных
Амурская обл.	1350,7	Архангельская обл.	нет данных
Липецкая обл.	1542,1	Новгородская обл.	нет данных
Костромская обл.	1742,1	Республика Ингушетия	нет данных
Итого 395 344,4			

Источник: составлено Л.Р. Гайнуллиной, А.Р. Фасыховым, Н.Ф. Тимербаевым, В.Р. Ибрагимовой на основе [8].

Table 4. Estimated total methane emissions from reservoirs of the Russian Federation subjects, 2019

Subject of the Russian Federation	CH ₄ -C emission/ year, tons	Subject of the Russian Federation	CH ₄ -C emission/ year, tons
Omsk Region	6.6	Smolensk Region	1 746.4
Pskov Region	14.6	Voronezh Region	1 785.2
Sakhalin Region	14.6	Penza Region	1 798.6
Kabardino-Balkaria Republic	32.9	Kursk Region	1 853.8
Chechnya Republic	37.9	Sverdlovsk Region	2 324.9
North Ossetia-Alania Republic	42.0	Orenburg Region	2 834.7
Zabaikalsky Krai	55.7	Republic of Kalmykia	2 859.3
Republic of Buryatia	68.4	Krasnodar Region	3 674.0
Kaliningrad Region	92.0	Chelyabinsk Region	3 705.9
Altai Krai	98.0	Perm Region	4 117.8
Komi Republic	144.6	Republic of Bashkortostan	4 188.9
Oryol Region	148.3	Leningrad Region and Saint Petersburg	4 498.8
Khabarovsk Krai	163.7	Irkutsk Region	4 876.3
Republic of Dagestan	165.5	Moscow Region and Moscow	6 487.9
Magadan Region	187.5	Stavropol Region	7 162.2
Vladimir Region	234.5	Republic of Chuvashia	7 574.1
Kurgan Region	250.3	Republic of Adygea	7 732.0
Tyumen Region	269.4	Rostov Region	9 784.4
Tuva Republic	328.0	Krasnoyarsk Region	9 869.1
Bryansk Region	337.9	Ulyanovsk Region	10 246.6
Republic of Mordovia	355.9	Tver Region	11 588.9
Murmansk Region	433.6	Astrakhan Region	12 022.8
Primorsky Krai	520.7	Vologda Region	12 708.7
Republic of Crimea and Sevastopol	535.5	Ivanovo Region	12 885.3
Altai Republic	610.3	Volgograd Region	13 558.8
Kemerovo Region	645.6	Yaroslavl Region	19 524.9
Kaluga Region	682.6	Mari El Republic	21 988.5
Republic of Khakassia	690.2	Nizhny Novgorod Region	23 668.8
Tula Region	724.7	Saratov Region	29 249.1

End of the table 4

Subject of the Russian Federation	CH ₄ -C emission/year, tons	Subject of the Russian Federation	CH ₄ -C emission/year, tons
Udmurtia Republic	766.2	Samara Region	37 499.8
Kirov Region	910.7	Republic of Tatarstan	79 251.4
Republic of Karachay-Cherkessia	965.4	Tomsk Region	No data
Belgorod Region	1 033.3	Kamchatka Krai	No data
Sakha Republic	1 093.3	Jewish Autonomous Okrug	No data
Republic of Karelia	1 129.4	Nenets Autonomous Okrug	No data
Tambov Region	1 250.1	Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra	No data
Ryazan Region	1 314.0	Chukotka Autonomous Okrug	No data
Novosibirsk Region	1 337.4	Yamalo-Nenets Autonomous Okrug	No data
Amur Region	1 350.7	Arkhangelsk Oblast	No data
Lipetsk Region	1 542.1	Novgorod Oblast	No data
Kostroma Region	1 742.1	Republic of Ingushetia	No data
Total			395 344.4

Source: compiled by L.R. Gainullina, A.R. Fasykh, N.F. Timerbaev, V.R. Ibragimova based on [8].

Участниками выбросов Score 2 являются жилой сектор и предприятия, покупающие тепловую энергию.

Существенный углеродный след имеют отопление и горячее водоснабжение котельными, работающими на газовом топливе, мазуте, дизельном топливе, угле, антраците, древесных пеллетах. Для различных видов топлива были определены удельные выбросы CO₂ в г/кВт·ч тепловой энергии (рис. 4).

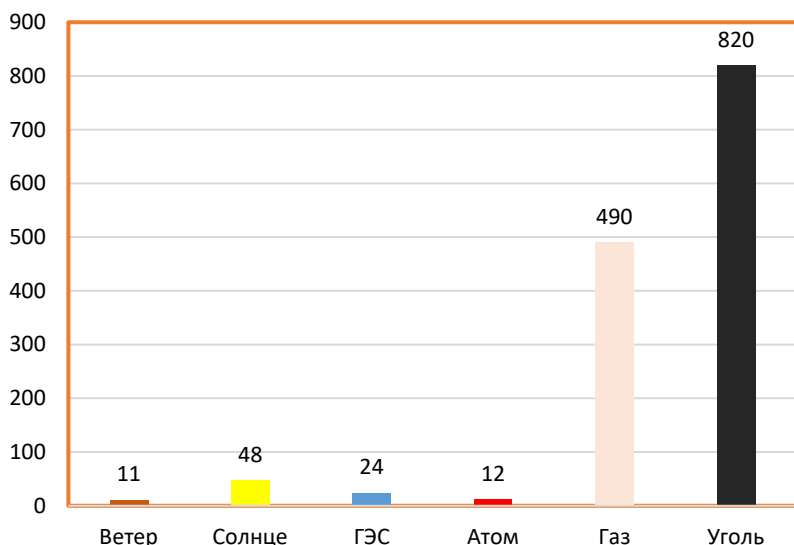


Рис. 3. Средние значения удельных выбросов парниковых газов CO₂ экв./кВт·ч объектов генерации электроэнергии

Источник: составлено Л.Р. Гайнуллиной, А.Р. Фасыховым, Н.Ф. Тимербаевым, В.Р. Ибрагимовой на основе: Углеродный след. Выбор системы отопления.

URL: https://ru.frwiki.wiki/wiki/Empreinte_carbone (дата обращения: 15.11.2023);

Приказ Минприроды России от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» (зарегистрировано в Минюсте России 29.07.2022 № 69451)

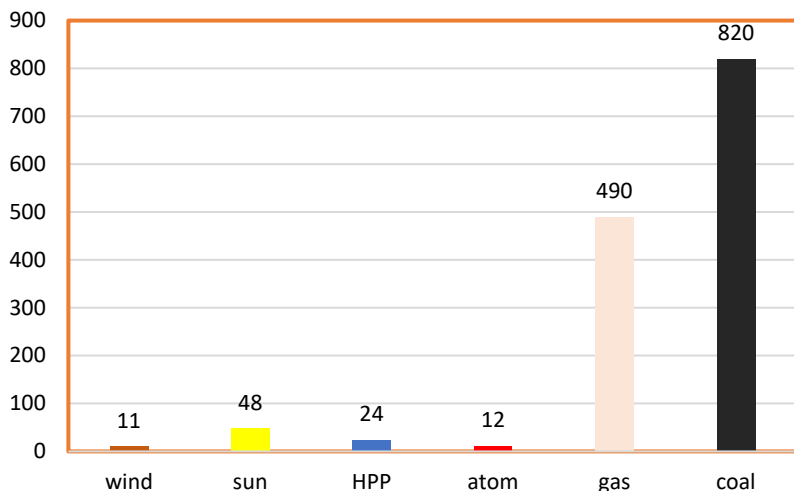


Figure 3. Average values of specific greenhouse gas emissions CO₂ eq./kWh of electricity generation facilities [13–14]

Source: compiled by L.R. Gainullina, A.R. Fasykh, N.F. Timerbaev, V.R. Ibragimova based on Carbon footprint. Choosing a heating system (In Russ.).

Available from: https://ru.fwiki.wiki/wiki/Empreinte_carbone (accessed: 15.11.2023);

Order of the Ministry of Natural Resources of Russia from 27.05.2022 N 371 "On approval of methods for quantitative determination of greenhouse gas emissions and greenhouse gas removals" (registered in the Ministry of Justice of Russia on 29.07.2022 N 69451)

Наименьший углеродный след у древесины, поскольку объем выбросов CO₂ при сжигании древесины равноценен количеству поглощения CO₂ при ее росте¹¹.

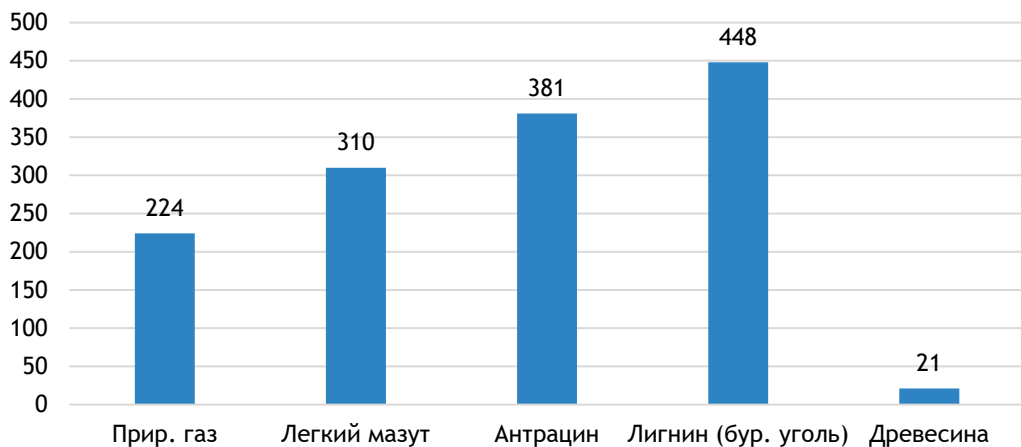


Рис. 4. Удельные выбросы CO₂, г/кВт·ч энергии

Источник: составлено Л.Р. Гайнуллиной, А.Р. Фасыховым, Н.Ф. Тимербаевым, В.Р. Ибрагимовой на основе Приказа Минприроды России от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» (зарегистрировано в Минюсте России 29.07.2022 № 69451)

¹¹ См.: Обзор климатической политики и мер в различных секторах экономики // Информационный бюллетень «Изменение климата». 2021. № 92. С. 6–9; Расчет парниковых газов от энергетической деятельности предприятий (сжигание топлива). URL: <https://sro150.ru/metodiki/371-metodika-rascheta-vybrosov-parnikovykh-gazov> (дата обращения: 20.11.2022).

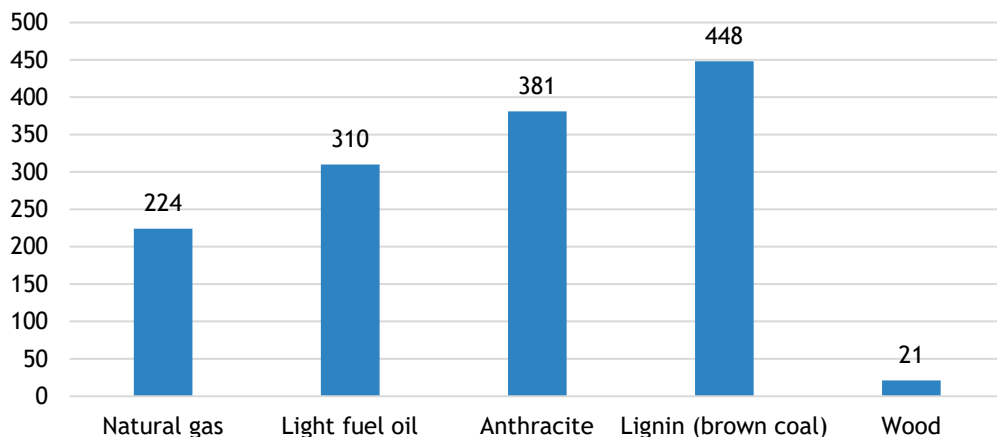


Figure 4. Specific CO₂ emissions, g/kWh of energy

Source: compiled by L.R. Gainullina, A.R. Fasykh, N.F. Timerbaev, V.R. Ibragimova based on Order of the Ministry of Natural Resources of Russia from 27.05.2022 N 371 “On approval of methods for quantitative determination of greenhouse gas emissions and greenhouse gas removals” (registered in the Ministry of Justice of Russia on 29.07.2022 N 69451)

Различные способы получения тепловой и электрической энергии дают возможность регулировать углеродный след в широком интервале значений. Углеродный след энергопотребления жилья приведен на рис. 5. Экологичная электроэнергия, вырабатываемая с помощью возобновляемых источников энергии, различных типов тепловых насосов, таких как «грунт–вода», геотермальный тепловой насос, способствует значительному снижению углеродного следа производства тепловой энергии при энергоснабжении, например, жилого сектора (табл. 5).

Пример сравнения выбросов парниковых газов от отопления дома приведен в табл. 5¹².

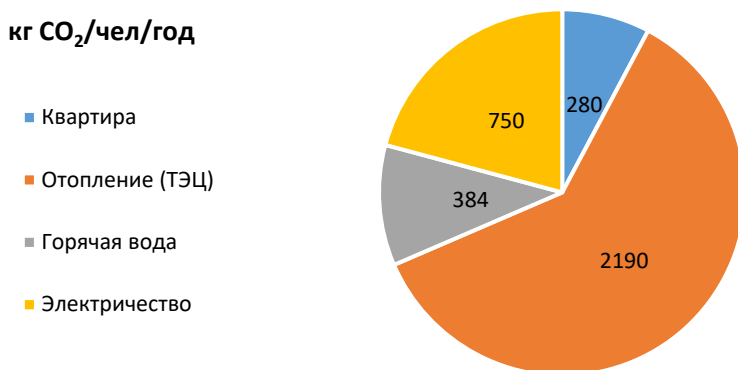
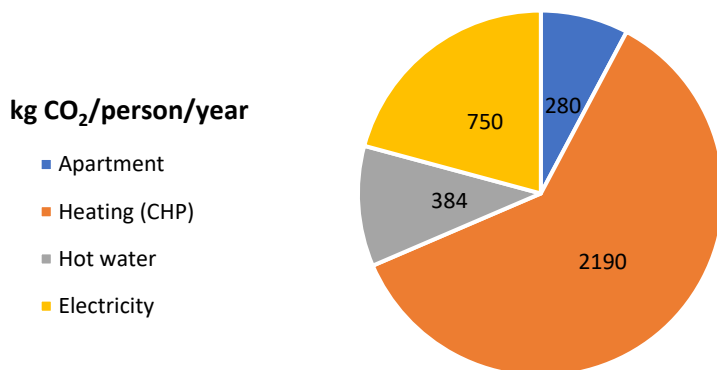


Рис. 5. Энергопотребление жилья

Источник: составлено Л.Р. Гайнуллиной, А.Р. Фасыховым, Н.Ф. Тимербаевым, В.Р. Ибрагимовой на основе [10].

¹² Углеродный след. URL: https://ru.frwiki.wiki/wiki/Empreinte_carbone (дата обращения: 20.11.2022).

Figure 5. **Energy consumption of housing**

Source: compiled by L.R. Gainullina, A.R. Fasykh, N.F. Timerbaev, V.R. Ibragimova based on [10].

Таблица 5. Выбросы парниковых газов при различных энергетических решениях отопления жилого дома

Энергетическое решение	Потребность в энергии, кВт·ч/год	Потребление, кВт·ч _{гр} /год	Содержание CO ₂ экв/кВт·ч	Выбросы годовые, т CO ₂ экв. год
Электрическое отопление с джоулевым эффектом (конвектор)	10 000	10 000	180	1,8
Масляный котел	10 000	11 000	300	3,3
Газовый котел	10 000	10 500	234	2,4
Электрический тепловой насос	10 000	4 000 (аэротермальный); 2900 (геотермальный)	180	0,72 (аэротермальный); 0,52 (геотермальный)
Котел на дровах	10 000	14 000	13	0,2

Источник: Углеродный след. Выбор системы отопления. URL: https://ru.fwiki.wiki/wiki/Empreinte_carbone (дата обращения: 20.11.2022).

Table 5. **Greenhouse gas emissions for different energy solutions for heating a residential building**

Energy solution	Energy requirement, kWh/year	Consumption, kWh/year	CO ₂ content, eq/kWh	Annual emissions, tCO ₂ eq per year
Electric heating with joule effect (convector)	10 000	10 000	180	1.8
Oil boiler	10 000	11 000	300	3.3
Gas boiler	10 000	10 500	234	2.4
Electric heat pump	10 000	4 000 (aerothermal); 2900 (geothermal)	180	0.72 (aerothermal); 0.52 (geothermal)
Wood fired boiler	10 000	14 000	13	0.2

Source: Carbon footprint. Choosing a heating system. Available from: https://ru.fwiki.wiki/wiki/Empreinte_carbone (accessed: 20.11.2022).

Изменения климата приводят к росту потребления электроэнергии климатотехникой. К 2050 г. именно климатотехника будет крупнейшим потребителем электроэнергии. Системы охлаждения уже сегодня расходуют около 10 % производимой в мире электроэнергии. Углеродный след процесса кондиционирования с учетом уничтожения хладагентов будет только расти.

Выбор хладагента определяется рядом факторов, среди которых рабочее давление и температура в системе, холодильный коэффициент, удельная холодопроизводительность и т.д. В качестве хладагентов в кондиционерах используют различные фреоны: R22 (хлордифторметан), R290 (пропан), смеси R401a (–b, –c), R409A и др. Одним из наиболее часто используемым хладагентом является гидрофторуглерод R134a. Этот хладагент относится к группе высокопарниковых газов. Почти 3 % от всех парниковых газов принадлежит именно гидрофторуглеродам¹³.

Углеродный след хладагентов (в ед. массы – CO₂-экв) состоит из:

1) объема хладагента, выпущенного в атмосферу за время эксплуатации оборудования, включая утечки;

2) объема выбросов, образующихся при сжигании ископаемого топлива для производства энергии, которая необходима для эксплуатации оборудования в течение всего срока его службы¹⁴.

Опасность выбросов парниковых газов усугубляется временем их существования в атмосфере. Парниковая активность выражается через «потенциал глобального потепления» (ПГП), приведенного в виде коэффициента способности молекул задерживать солнечную радиацию или количество энергии, которое будет поглощено 1 т газа за определенный (в данном случае за 100 лет) период времени (табл. 6)¹⁵.

Еще один показатель, который необходимо учитывать при выборе хладагента, – это потенциал разрушения озонового слоя (табл. 7). Этот показатель связан с используемыми в том числе в холодильном оборудовании соединениями хлора и брома, так как эти виды галогенов легко разрушают стратосферный озон.

Таблица 6. Потенциал глобального потепления

Парниковый газ	Время существования в атмосфере, лет	ПГП за 100 лет
Углекислый газ CO ₂	Переменное значение	1
Метан CH ₄	12	25
Закись азота N ₂ O	114	298
Трифторметан CHF ₃	270	800
Хлортрифторметан CClF ₃	640	400
Гексафторид серы SF ₆	3200	800
1,1,1,2-тетрафторэтан HFC-134a	14	430

Источник: составлено Л.Р. Гайнуллиной, А.Р. Фасыховым, Н.Ф. Тимербаевым, В.Р. Ибрагимовой на основе Приказа Минприроды России от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» (зарегистрировано в Минюсте России 29.07.2022 № 69451); Утилизирующая компания Омега. URL: <https://omega-ekb.com/utilizaciya-kladagenta> (дата обращения: 20.11.2022).

¹³ См.: Углеродный след. URL: https://ru.frwiki.wiki/wiki/Empreinte_carbone (дата обращения: 20.11.2022); Охрана окружающей среды в России. 2020: стат. сб. Росстат, 2020. 113 с.

¹⁴ Воздействие холодильных систем на климат. Основные положения и рекомендации. Технический отчет. URL: https://www.ozoneprogram.ru/upload/files/o/ocenka_okep/dopolnenie3.pdf (дата обращения: 20.11.2022).

¹⁵ Утилизирующая компания Омега. URL: <https://omega-ekb.com/utilizaciya-kladagenta> (дата обращения: 20.11.2022); CO₂-эквивалент. URL: <https://plus-one.ru/sustainability/co2-ekvivalent> (дата обращения: 20.11.2022).

Table 6. **Global warming potential** [14; 16]

Greenhouse gas	Atmospheric lifetime, years	GWP for 100 years
Carbon dioxide CO ₂	Variable value	1
Methane CH ₄	12	25
Nitrous oxide N ₂ O	114	298
Trifluoromethane CHF ₃	270	800
Chlorotrifluoromethane CClF ₃	640	400
Sulfur hexafluoride SF ₆	3200	800
1,1,1,2-tetrafluoroethane HFC-134a	14	430

Source: compiled by L.R. Gainullina, A.R. Fasykh, N.F. Timerbaev, V.R. Ibragimova based on Order of the Ministry of Natural Resources of Russia from 27.05.2022 N 371 "On approval of methods for quantitative determination of greenhouse gas emissions and greenhouse gas removals" (registered in the Ministry of Justice of Russia on 29.07.2022 N 69451) (In Russ.); Omega Waste Management Company. (In Russ.). Available from: <https://omega-ekb.com/utilizaciya-xladagenta> (accessed: 20.11.2022).

Таблица 7. **Значения озоноразрушающего потенциала некоторых хладагентов**

Парниковый газ	Озоноразрушающий потенциал
Трихлорфторметан R11	1
Хлорфторуглерод R12	1
Хлорпентафторэтан R115	0,6
Хлортрифторметан CClF ₃	400
Гексафторид серы SF ₆	0
1,1,1,2-тетрафторэтан R-134a	0,000015

Источник: составлено Л.Р. Гайнуллиной, А.Р. Фасыховым, Н.Ф. Тимербаевым, В.Р. Ибрагимовой на основе Приказа Минприроды России от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» (зарегистрировано в Минюсте России 29.07.2022 № 69451); Утилизирующая компания Омега. URL: <https://omega-ekb.com/utilizaciya-xladagenta>. (дата обращения: 20.11.2022).

Table 7. **Ozone Depletion Potential Values of Some Refrigerants** [14; 16]

Greenhouse gas	Ozone Depleting Potential
Trichlorofluoromethane R11	1
Chlorofluorocarbon R12	1
Chloropentafluoroethane R115	0.6
Chlorotrifluoromethane CClF ₃	400
Sulfur hexafluoride SF ₆	0
1,1,1,2-tetrafluoroethane R-134a	0.000015

Source: compiled by L.R. Gainullina, A.R. Fasykh, N.F. Timerbaev, V.R. Ibragimova based on Order of the Ministry of Natural Resources of Russia from 27.05.2022 N 371 "On approval of methods for quantitative determination of greenhouse gas emissions and greenhouse gas removals" (registered in the Ministry of Justice of Russia on 29.07.2022 N 69451) (In Russ.); Omega Waste Management Company. (In Russ.). Available from: <https://omega-ekb.com/utilizaciya-xladagenta> (accessed: 20.11.2022).

Выводы

Снижение углеродного следа в энергетике возможно в следующих направлениях:

1) уменьшение доли источников энергии в виде органического топлива, переход на возобновляемые источники энергии. Огромный потенциал гидроэнергетики в нашей стране позволяет значительно увеличить долю электроэнергии, вырабатываемой на ГЭС. Развитие программы локализации ВИЭ, повышение эффективности электростанций [11], разработка новых методик оценки и прогнозирования параметров ветра и солнечной активности [12] позволит увеличить долю ВИЭ в энергетике;

2) экологичное отопление – геотермальное, солнечными коллекторами и т.д. Например, геотермальное отопление на 20 % экономичнее отопления газовым котлом;

3) утилизация хладагентов. Хладагент может быть разных видов, и для каждого возможно подобрать рациональный способ утилизации: применяемые в холодильных установках и агрегатах; преобразователи на производстве пластмасс; реагенты для сухого травления; сырье применяется в системе пожаротушения¹⁶;

4) для эффективной работы над снижением углеродного следа необходимо учитывать все этапы жизненного цикла энергетики, включая строительство, эксплуатацию и утилизацию оборудования.

Список литературы

- [1] *Ермакова М.С.* Выбросы парниковых газов: раскладываем по полочкам // Экология производства. 2021, февраль. С. 98–105. URL: <https://news.ecoindustry.ru/wp-content/uploads/2021/02/Ermakova.pdf> (дата обращения: 25.12.2023).
- [2] *Умнов В.А., Коробова О.С., Скрыбина А.А.* Углеродный след как индикатор воздействия экономики на климатическую систему // Вестник РГГУ. Серия: Экономика. Управление. Право. 2020. № 2. С. 85–93. <http://doi.org/10.28995/2073-6304-2020-2-85-93>
- [3] *Никонова Р.А., Дрягина Д.Р.* Защита окружающей среды при эксплуатации ТЭС // Современные инновации. 2018. № 3 (25). С. 12–15.
- [4] *Yihuan Wu, Jian Hua.* Investigating a Retrofit Thermal Power Plant from a Sustainable Environment Perspective – A Fuel Lifecycle Assessment Case Study // Sustainability. 2022. Vol. 14. No. 8. <http://doi.org/10.3390/su14084556>
- [5] *Силаева П.Ю., Силаев А.В.* Особенности рассеивания выбросов диоксида азота предприятиями энергокомплекса и их влияние на население мегаполисов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26. № 1. С. 63–72. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2018-26-1-63-72>
- [6] *Плотникова И.Н., Володин С.А., Кочнева Ю.Ю., Салыхова А.Р.* Актуальные вопросы декарбонизации / под научной редакцией М.Х. Салахова и М.С. Тагирова. Казань: Изд-во «ФЭН» Академии наук РТ, 2021. 56 с.
- [7] *Ваулин И.* Гидроэнергетика подтверждает статус безуглеродной // Атомный эксперт. Серия: Экология. 2020. № 1–2. URL: https://atomicexpert.com/carbonless_hydropower. (дата обращения: 25.11.2022).
- [8] *Бажин Н.М.* Метан в окружающей среде // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. 2010. № 93. С. 1–56.
- [9] *Тихонов С.* Станет ли атомная энергетика альтернативой ветрякам // Российская газета. Федеральный выпуск. 2021. № 231 (8582). URL: <https://rg.ru/2021/10/07/stanet-li-atomnaia-energetika-alternativoj-vetriakam.html> (дата обращения: 25.11.2022).

¹⁶ Воздействие холодильных систем на климат. Основные положения и рекомендации. Технический отчет. URL: https://www.ozoneprogram.ru/upload/files/o/ocenka_okep/dopolnenie3.pdf (дата обращения: 20.11.2022).

- [10] Халилуллина А.Р. Возобновляемые источники энергии в виде геотермального теплового насоса // Инновационная наука. 2019. № 2. С. 42–44.
- [11] Алхадж Хассан Ф., Алали Ш., Гайнуллина Л.Р. Повышение эффективности ветровых электростанций // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 217–227. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-217-227>
- [12] Хассан Ф. А., Гайнуллина Л.Р., Тимербаев Н.Ф. Методика оценки и прогнозирования среднегодовой скорости и направления ветра на основе данных ветроизмерений // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 3 (55). С. 59–68.

References

- [1] Ermakova MS. Emissions of greenhouse gases: laying them out on the shelf. *Ecology of production*. February 2021:98–105. (In Russ.). Available from: <https://news.ecoindustry.ru/wp-content/uploads/2021/02/Ermakova.pdf> (accessed: 25.12.2023).
- [2] Umnov VA, Korobova OS, Skryabina AA. Carbon footprint as an indicator of the impact of the economy on the climate system. *RSUH/RGGU BULLETIN. Series Economic Management. Low*. 2020;2:85–93. (In Russ.). <http://doi.org/10.28995/2073-6304-2020-2-85-93>
- [3] Nikonova RA, Dryagina DR. Protection of the environment during the operation of thermal power plants. *Modern innovations*. 2018;(3):12–15. (In Russ.).
- [4] Yihsuan Wu, Jian Hua. Investigating a Retrofit Thermal Power Plant from a Sustainable Environment Perspective – A Fuel Lifecycle Assessment Case Study. *Sustainability*. 2022;14(8):4556. <http://doi.org/org/10.3390/su14084556>
- [5] Silaeva PY, Silaev AV. Peculiarities of dispersion of nitrogen dioxide emissions by the energy complex enterprises and their impact on the population of megapolises. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2018;26(1):63–72. (In Russ.). <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2018-26-1-63-72>
- [6] Plotnikova IN, Volodin SA, Kochneva YuYu, Salyakhova AR. *Current issues of decarbonization*. Salakhov MH, Tagirov MS. (eds.). Publishing house “FEN” of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan; 2021. 56 p. (In Russ.).
- [7] Vaulin I. Hydropower confirms the status of carbon-free. *Atomny expert. Series: Ecology*. 2020;1–2. (In Russ.). Available from: https://atomicexpert.com/carbonless_hydropower (accessed: 25.11.2022).
- [8] Bazhin NM. Methane in the environment. *Ecology. A series of analytical reviews of world literature*. 2010(93):1–56. (In Russ.).
- [9] Tikhonov S. Will nuclear energy become an alternative to windmills. *Rossiyskaya Gazeta. Federal issue*. 2021(231). (In Russ.). Available from: <https://rg.ru/2021/10/07/stanet-li-atomnaia-energetika-alternativnoj-vetriakam.html>
- [10] Khalilullina AR. Renewable energy sources in the form of geothermal heat pump. *Innovation Science*. 2019;(2):42–44.
- [11] Hassan FA, Alali Ch, Gainullina LR. Increasing the efficiency of wind farms. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):217–227. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-217-227>
- [12] Hassan Fouad A, Gainullina LR, Timerbaev NF. Methodology to estimate and forecast the average the annual speed and direction of the wind based on wind measurement data. *Bulletin of Kazan State Energy University*. 2022;14(55):59–68. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Гайнуллина Лейсан Раисовна, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной экологии и безопасности труда, Казанский государственный энергетический университет, Российская Федерация, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51. ORCID: 0000-0001-5414-7647. E-mail: gainullina7819@mail.ru

Фасыхов Айдар Равилович, аспирант, кафедра инженерной экологии и безопасности труда, Казанский государственный энергетический университет, Российская Федерация, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51. E-mail: fara.388@mail.ru

Тимербаев Наиль Фаритович, доктор технических наук, директор Научно-технического центра «Альтернативная энергетика», Российская Федерация, 420034, г. Казань, ул. Декабристов, д. 85Б. ORCID: 0000-0001-9170-2056. E-mail: cpekgeu@gmail.com

Ибрагимова Виктория Рустемовна, заместитель директора Научно-технического центра «Альтернативная энергетика», Российская Федерация, 420034, г. Казань, ул. Декабристов, д. 85Б. E-mail: cpekgeu@gmail.com

Bio notes:

Leysan R. Gainullina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Ecology and Labor Safety, Kazan State Power Engineering University, 51 Krasnoselskaya St, Kazan, 420066, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-5414-7647. E-mail: gainullina7819@mail.ru

Aidar R. Fasykhov, Postgraduate student, Department of Engineering Ecology and Labor Safety, Kazan State Power Engineering University, 51 Krasnoselskaya St, Kazan, 420066, Russian Federation. E-mail: fara.388@mail.ru

Nail F. Timerbaev, Doctor of Technical Science, Director of the Scientific and Technical Center for Alternative Energy, 85B Dekabristov St, Kazan, 420034, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9170-2056. E-mail: cpekgeu@gmail.com

Victoria R. Ibragimova, Deputy Director of the Scientific and Technical Center for Alternative Energy, 85B Dekabristov St, Kazan, 420034, Russian Federation. E-mail: cpekgeu@gmail.com