

Оригинальная статья

УДК 332.021.8

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-111-123

**ОЦЕНКА ИСТОЧНИКОВ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ
НА УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

© 2023 г. И. А. Нагайцев

Аналитический центр ТЭК (Россия, 121099, Москва, Новинский бульвар, 13, стр. 4)

Аннотация. Приведен один из механизмов государственного экономического регулирования работы организаций-природопользователей. Для предприятий, осуществляющих хозяйственную деятельность, предусмотрена плата за негативное воздействие на выбросы в окружающую среду. Деятельность угледобывающих предприятий характеризуется значительными выбросами метана (газа), являющегося загрязняющим веществом, за которое предусмотрена плата. Произведен расчет платы за выбросы метана, проведен анализ полученных значений. Сделаны выводы, что предприятия, использующие технологии по снижению выбросов метана, сокращают операционные затраты и впоследствии способны управлять рисками, связанными с увеличением платы за негативное воздействие на окружающую среду. Отмечено, что помимо экономической нагрузки на предприятия, выбросы метана оказывают негативное воздействие (парниковый эффект), приводящее к изменениям климата. Приведены мировые и российские научные исследования по направлению актуализации учета и снижения выбросов парниковых газов в горнодобывающей отрасли. Актуальность направления углеродного регулирования и снижения парниковых выбросов подтверждается развитием законодательной базы в Российской Федерации, обязательной отчетностью о выбросах парниковых газов для предприятий и реализующимся пилотным проектом системы торговли квотами на выбросы парниковых газов на Сахалине. Показаны основные источники выбросов парниковых газов на угольных шахтах: горные выработки и трубопроводы, предназначенные для отвода метана из шахты; факельные установки для сжигания метана; выбросы от сжигания топлива на котельных для обогрева горных выработок и административно-бытовых помещений; выбросы от сжигания топлива транспортными средствами на предприятии. Сделаны выводы, что выбросы метана составляют наибольшую часть выбросов парниковых газов на угольных шахтах. Управление этими выбросами позволит предприятиям соответствовать курсу страны на декарбонизацию экономики и реализацию механизмов углеродного регулирования (система торговли квотами) по всей стране.

Ключевые слова: плата за негативное воздействие, окружающая среда, парниковые газы, углеродная нейтральность, шахтный метан, угольная отрасль

Для цитирования: Нагайцев И.А. Оценка источников выбросов парниковых газов на угледобывающих предприятиях // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 111 – 123. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-111-123](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-111-123)

Original article

**ASSESSMENT OF SOURCES OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM COAL
MINING OPERATIONS**

© 2023 I. A. Nagaitsev

Energy Research Centre (4 p., 13 Novinsky Boulevard, Moscow 121099, Russian Federation)

Abstract. The article applies one of the principles of state regulation of organizations that are users of natural resources. Organizations carrying out economic activities are subject to a fee for the negative impact on emissions into the environment. The activities of coal mining companies lead to significant emissions of

methane, a gas that is a pollutant included in the payment. Calculations of the cost of methane emissions were made, the values obtained were analyzed and it was concluded that companies using technologies to reduce total methane emissions reduce operating costs and, as a result, are able to manage factors and changes with external consequences that have a negative impact on the environment. The paper notes that in addition to the economic burden on the enterprise, methane emissions have a negative greenhouse effect, leading to climate change. The article presents world and Russian scientific researches in the direction of updating the accounting and protection of interests of young greenhouse gases in the field of mining. The relevance of the direction of carbon regulation and reduction of greenhouse gas emissions in the Russian Federation is confirmed by the creation of a legislative framework in the Russian Federation, mandatory reporting of greenhouse gas emissions by enterprises and the implementation of pilot project systems for trading quotas for greenhouse gas emissions on Sakhalin. The main provisions for two gases in the southern mines are given, including: mine workings and pipelines for methane removal from the mines, methane flares, emissions from fuel combustion in boiler houses for heating mine workings and administrative buildings, and emissions from fuel-burning vehicles at the enterprise. From the analysis of the values obtained, it was concluded that methane emissions are the main greenhouse gas emissions in coal mines, and that the management of emissions will allow companies to comply with the country's course in the economics of decarbonization and to achieve a low carbon economy.

Keywords: negative impact fee, environment, greenhouse gases, carbon neutrality, coal mine methane, coal industry

For citation: Nagaitsev I.A. Assessment of sources of greenhouse gas emissions from coal mining operations. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 3 (45), pp. 111 – 123. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-111-123](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-111-123)

Введение

Основной целью любого коммерческого предприятия является рост прибыли, одним из инструментов достижения которого является снижение затрат. Частью операционных затрат российских предприятий является плата за негативное воздействие на окружающую среду (НВОС). Это один из механизмов государственного экономического регулирования в области охраны окружающей среды (ОС). Законом об охране окружающей среды предусмотрено, что негативное воздействие на ОС является платным и внесение платы не освобождает субъектов хозяйственной и иной деятельности от выполнения мероприятий по охране окружающей среды и возмещения причиненного ей вреда [1].

В настоящее время актуальным направлением в мире и в России, в частности, является переход к экономике устойчивого низкоуглеродного развития. В рамках саммита БРИКС в августе 2023 г. президент России В.В. Путин отметил в своем обращении значимость развития сотрудничества стран объединения в области декарбонизации экономики, снижения антропогенного воздействия на природу, адаптации к изменениям климата. Он подчеркнул, что страна готова к совместной работе для продвижения более сбалансированных подходов к климатической проблематике на международной арене. Для реализации намерений в стране разрабатываются и принимаются нормативно-правовые акты, регулирующие деятельность компаний, которая характеризуется значительными выбросами парниковых газов. В настоящее время су-

ществует несколько предпосылок реализации системы торговли квотами на выбросы парниковых газов в России [2]. Реализация системы способствует дополнительной нагрузке на компании в части увеличения платы за выбросы парниковых газов сверх установленного лимита (квоты), а также открывает дополнительные возможности для компаний России в части снижения затрат за счет выполнения установленных квот на выбросы парниковых газов путем реализации климатических проектов.

Для предприятий угольной отрасли, добывающих полезные ископаемые подземным способом, наибольшая часть платы за НВОС формируется за счет выбросов метана. Метан – взрыво- и пожароопасный газ, выделяющийся из угольных пластов при их отработке. Для безопасного ведения горных работ, технология отработки предусматривает снижение концентрации метана до предельно-допустимой. Снижение концентрации позволяет безопасно выполнять технологические операции, связанные с подготовкой, добычей и транспортировкой полезных ископаемых на поверхность. Для снижения концентрации метана используются различные способы и схемы проветривания и дегазации горных выработок. Далее метан выбрасывается на поверхность. Являясь загрязняющим веществом (ЗВ), газ оказывает огромное влияние на процесс изменения климата, поскольку потенциал влияния метана (CH_4) на глобальное потепление во много раз выше (в 25 раз), чем оксид углерода CO_2 .

Снижение выбросов метана плата за выбросы которого для угольных шахт составляет одну из статей операционных затрат, позволит компаниям снизить часть издержек и улучшить финансовые показатели. Кроме того, снижая выбросы метана, компании стремятся выполнить Парижские соглашения [3], в рамках которых страны обязались сократить антропогенные выбросы парниковых газов (ПГ). В России в 2015 г. издан Указ Президента РФ «О сокращении выбросов парниковых газов». Цель этого документа – обеспечить к 2030 г. сокращение выбросов парниковых газов до 70 % относительно уровня 1990 г. с учетом максимально возможной поглощающей способности лесов, иных экосистем при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития Российской Федерации [4]. Согласно Указу разработана и принята Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. (Стратегия) [5].

В рамках реализации Стратегии принят Федеральный закон № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» [6]. Закон включает меры по ограничению выбросов парниковых газов:

- государственный учет выбросов парниковых газов;
- установление целевых показателей сокращения выбросов парниковых газов;
- поддержка в соответствии с законодательством Российской Федерации деятельности по сокращению выбросов парниковых газов и увеличению поглощения парниковых газов.

Закон предписывает, что организациям, хозяйственная и иная деятельность которых сопровождается выбросами парниковых газов, масса которых эквивалентна 150 и более тысячам тонн оксида углерода в год (2023) или 50 и более тысячам тонн оксида углерода в год (2024), необходимо предоставлять отчетность о выбросах парниковых газов в порядке и по форме, установленным Правительством Российской Федерации. Для выполнения расчетов объемов выбросов парниковых газов необходимо пользоваться методиками количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов (приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 371 от 27 мая 2022 г.) [7].

Вышеописанные экономические и регуляторные действия приводят к выводу, что исследование возможностей управления и снижения выбросов метана позволяют решить сразу несколько задач, стоящих перед современными угледобывающими предприятиями:

– уменьшение негативного воздействия на окружающую среду путем снижения выбросов метана, являющегося парниковым газом, влияющим на глобальное изменение климата (экологический эффект);

– снижение операционных затрат компаний за счет уменьшения платы за НВОС (экономический эффект);

– митигация будущих рисков, связанных с введением в России системы торговли квотами на выбросы парниковых газов, что несет существенный риск увеличения операционных затрат, связанных с платой за выбросы парниковых газов сверх установленного лимита (экономический эффект).

Необходимость в изучении рассматриваемой проблематики подтверждается множеством научных исследований в России и за рубежом.

Обзор литературы

Научными сотрудниками инженерного департамента горного дела и полезных ископаемых Виргинского технологического института проведен сравнительный анализ выбросов парниковых газов от добычи угля подземным способом и использования на электростанциях и подземной газификации угля (UCG) с выработкой электроэнергии. Анализ показал, что выбросы парниковых газов от UCG на 28 % меньше, чем по традиционной технологии [8].

Группа немецких исследователей провела оценку выбросов ПГ методом, основанном на наблюдениях в региональном масштабе с высокой точностью, используя авиационные и наземные наблюдения, а также скорость ветра в результате нескольких исследовательских полетов. Сделаны выводы о том, что полученные значения в результате эксперимента коррелируют с выбросами ПГ в отчетах, предложено масштабирование метода, используемого в исследовании в другие регионы для более точной оценки выбросов парниковых газов [9].

Научными сотрудниками ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» (Институт угля) рассмотрены методологические подходы к контролю эмиссии метана и повышению достоверности ее количественного учета в угледобывающей промышленности Кузбасса. Представлено алгоритмическое обеспечение оценки фугитивных выбросов метана и оксида углерода при добыче угля открытым и подземным способами, а также выбросов метана при последующем обращении с углем, добытым подземным способом [10].

В работе индийских исследователей представлены обновленные оценки запасов парниковых

газов для подземной добычи угля в Индии на основе уточнений Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Исследование устраняет пробелы в отчетности по парниковым газам за счет количественной оценки выбросов на угольных шахтах [11].

Научными сотрудниками из США представлен прогноз глобальных выбросов метана при добыче угля при различных сценариях добычи, с увеличением глубины разработки до 2100 г. В работе [12] представлена обновленная методология расчета выбросов метана при добыче угля, в которой учитываются метод добычи, марка и глубина разработки, а также используются коэффициенты выбросов, основанные на фактических данных, полученных от предприятий отрасли. В исследовании используется новая методология расчета выбросов метана из заброшенных шахт. В работе [12] сделаны выводы, что к 2100 г. выбросы метана от действующих шахт увеличатся в четыре раза, а от ликвидированных – в восемь раз.

В работе [13] проведен анализ выбросов парниковых газов от угольных шахт и выявлена тенденция к снижению прямых выбросов ПГ (метана) с 2011 по 2019 гг. за счет сокращения числа шахт. Всего было закрыто 9567 угольных шахт мощностью 1610 т угля. Корректировка структуры добычи угля влияет на интенсивность выбросов метана в угольных шахтах, следовательно, средний коэффициент выбросов на угольных шахтах по стране снизился с 9 в 2011 г. до 8 млн³/т в 2019 г.

Научными сотрудниками Федерального исследовательского центра угля и углехимии проделано исследование, в котором рассмотрены категории выбросов парниковых газов, связанных с деятельностью угледобывающих предприятий. Особенности и количественная оценка выбросов парниковых газов рассматриваются на примере угледобывающего предприятия. Даны рекомендации по сокращению выбросов парниковых газов на угледобывающих предприятиях [14].

Китайскими научными сотрудниками проведено исследование модели и метода расчета выбросов ПГ для подземного полностью механизированного процесса добычи полезных ископаемых. Работа актуальна для страны, поскольку угольная отрасль является одной из основных отраслей промышленности, которая сопровождается выбросами ПГ. Количественная оценка выбросов углерода при добыче угля является важным шагом в сокращении этих выбросов. В работе [15] исследуется модель учета выбросов ПГ (B-R модель) при полностью механизированной добыче угля, которая включает в себя

общее количество выбросов ПГ и выбросы ПГ от каждого звена технологической цепочки.

В работе [16] проведена оценка интенсивности выбросов парниковых газов от утечек газа при его транспортировке, а также выбросов метана при добыче угля. Сделаны выводы о необходимости ускорения методов обнаружения, учета и управления выбросами метана от утечек в газовых системах, для подтверждения того, что газовые утечки менее интенсивны по отношению к утечкам метана на угольных шахтах.

В работе [17] проведена оценка выбросов парниковых газов при добыче угля. Отмечено, что уголь является основным ископаемым топливом в стране для производства электроэнергии. Сделаны выводы о необходимости повышения энергоэффективности и использования энергии из возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

В работе [18] отмечена необходимость в снижении выбросов парниковых газов в угледобывающей отрасли. Представлены рекомендации по корректировке текущего законодательства по регулированию угольной отрасли (в части выбросов парниковых газов).

В работе [19] произведен анализ характеристик выбросов метана в угледобывающей промышленности Китая и исследованы меры по сокращению выбросов. Сделаны выводы, что за последние десять лет сильно изменилась структура добычи угля в Китае, но при этом коэффициенты, которые используются при расчете выбросов парниковых газов, не изменились. Отмечено, что выбросы ПГ снизились за счет сокращения числа шахт с высокой метанодностью и газообильностью.

Большое количество исследований подтверждают высокую заинтересованность научного сообщества в обосновании необходимости снижения загрязнения окружающей среды выбросами метана (ПГ), влияющим на процессы глобального потепления в мире. Проводятся различные исследования возможности снижения выбросов метана от угольных шахт, актуализируются расчетные коэффициенты для более точного определения выброса парниковых газов предприятиями.

Источники выбросов

Расчет выбросов парниковых газов осуществляется в соответствии с утвержденной методикой (Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 371 от 27 мая 2022 г.). Организации документируют границы количественного определения выбросов парниковых газов, в границы включают прямые выбросы парниковых газов. Источниками выбросов являются производственно-технологические процессы на объектах организаций, в результате которых в атмосферу выделяются ПГ.

Исходные данные для расчета выбросов ПГ
Table 1. Baseline data used to calculate GHG emissions

Показатель	Значение показателя для шахты		
	1	2	3
Объем добычи, млн т/год	3,5	1,5	1,8
Прямые выбросы метана, тыс. т/год	100,5	60,3	90,5
Утилизация метана на факеле, тыс. т/год	–	4,5	7,8
Объем выбросов метана после утилизации, тыс. т/год	100,5	55,8	82,7
Месторождение угля, который сжигается котельными шахт	Кузнецкое	Кузнецкое	Кузнецкое
Потребление угля котельными, тыс. т/год	45,5	20,0	15,5
Вид сжигаемого топлива транспортом: – бензин, т/год – дизельное топливо, т/год	20 380	14 250	10 170

Для угольных шахт в границы количественного определения выбросов ПГ попадают следующие категории источников выбросов.

1. Проведение технологических операций, осуществляемых при добыче угля подземным способом. В категорию включают выбросы метана (CH_4) на угольных шахтах от следующих источников [20]:

- вентиляционные горные выработки, предназначенные для отвода исходящей струи воздуха (концентрация метана в струе менее 0,75 %);
- трубопроводы для изолированного отвода метана, газодренажные горные выработки (концентрация метана в струе менее 3,5 %);
- дегазационные трубопроводы (концентрация метана в струе более 25 %).

2. Сжигание выбросов на факельных установках (источник соединений CO_2 и CH_4). Сжигание на факельных установках проводится с целью утилизации метана, выбрасываемого при подземной добыче. Распространено использование факельных установок закрытого типа для бессажевого сжигания метана.

3. Выбросы оксида углерода CO_2 от сжигания топлива транспортными средствами. В производственной цепочке при добыче угля используется различный транспорт (подземный транспорт для доставки людей и материалов в подземных горных выработках, наземный транспорт для перевозки полезного ископаемого, доставки людей и материалов, технологический транспорт для выполнения наземных работ с целью дальнейшей разведки полезных ископаемых и жизнеобеспечения работы предприятия). Также к учету принимается топливо, сожженное для генерации электроэнергии в местах, где нет возможности подключения питания от общей сети.

4. Стационарное сжигание газообразного, жидкого и твердого топлива. Выбросы CO_2 от сжигания топлива котельными для отопления подземных горных выработок и административно-бытовых помещений.

Расчет объемов выбросов парниковых газов для трех угледобывающих предприятий

Расчет выполнен на примере трех действующих предприятий, осуществляющих добычу угля подземным способом:

- шахта 1 (относится к сверхкатегорной по газу, с относительной газообильностью более 15 м³/т, средняя глубина горных работ 560 м, добывается уголь марки ГЖ);
- шахта 2 (относится к сверхкатегорной по газу, с относительной газообильностью более 15 м³/т, средняя глубина горных работ 640 м, для снижения выбросов метана на предприятии используются факельные установки, добывается уголь марки КС);
- шахта 3 (относится к сверхкатегорной по газу, с относительной газообильностью более 15 м³/т, средняя глубина горных работ 710 м, для снижения выбросов метана на предприятии используются факельные установки, добывается уголь марки Ж).

Исходные данные для расчетов объемов выбросов парниковых газов на шахтах представлены в табл. 1.

Расчет выбросов парниковых газов

1. Проведение технологических операций, осуществляемых при добыче, обработке, транспортировке и хранении угля.

Для выбросов метана, осуществляемых при добыче угля подземным способом (дегазация

Выбросы парниковых газов от процессов, осуществляемых при добыче угля*Table 2. Greenhouse gas emissions from coal mining*

Шахта	Парниковый газ	$FC_{j,y}$ т/год	Коэффициент пересчета	E_{CO_2} , т CO_2 -экв. /год
1	Метан (CH_4)	100 500	25	2 512 500
2	Метан (CH_4)	55800	25	1 395 000
3	Метан (CH_4)	82700	25	2 067 500

сопутствующих газов из угольных пластов и вентиляция воздуха угольных шахт) коэффициент пересчета величин выбросов парниковых газов в эквивалент оксида углерода CO_2 определяется (на горизонте 100 лет) равен 25.

Выбросы парниковых газов рассчитываются по формуле:

$$E_{CO_2} = FC_{j,y} \cdot 25, \quad (1)$$

где E_{CO_2} – масса выбросов парникового газа, т CO_2 -экв.; $FC_{j,y}$ – масса выбросов парникового газа, т.

Произведенные расчеты выбросов парниковых газов при проведении процессов, осуществляемых при добыче угля, сведены в табл. 2.

2. Сжигание на факельных установках.

Количественное определение выбросов парниковых газов от сжигания на факельных установках углеводородных смесей выполняется по следующей формуле:

$$E_{i,y} = \sum_{j=1}^n (FC_{j,y} EF_{i,j,y}), \quad (2)$$

где $E_{i,y}$ – выбросы i -ого парникового газа от сжигания углеводородных смесей на факельной установке за период y , т; $FC_{j,y}$ – расход j -ой углеводородной смеси на факельной установке

за период y , тыс. m^3 (т); $EF_{i,j,y}$ – коэффициент выбросов i -парникового газа от сжигания j -ой углеводородной смеси на факельной установке за период y , т/тыс. m^3 (т/т).

Коэффициенты представлены в табл. 3 для оксида CO_2 (i – вид парникового газа (CO_2 , CH_4); j – вид углеводородной смеси; n – количество видов углеводородных смесей, сжигаемых на факельной установке).

При сжигании метана на факельной установке часть метана выбрасывается в атмосферу, и для расчета выбросов парниковых газов используется коэффициент недожога углеводородной смеси на факельной установке ($CF_{j,y}$), который принимается в зависимости от условий сжигания углеводородных смесей (бессажеевое или сажеевое сжигание). Коэффициент недожога углеводородной смеси на факельной установке составляет 0,0006 (бессажеевое сжигание, в том числе природного газа некondиционных газовых и газоконденсатных смесей).

Результаты расчета объемов выбросов парниковых газов от сжигания метана на факельных установках представлены в табл. 4.

3. Сжигание на транспорте.

Расчет выполняется по отдельным типам автотранспортных средств (грузовой, пассажирский, легковой) и видам потребленного топлива по следующему уравнению:

Коэффициенты выбросов ПГ от сжигания углеводородной смеси на факельной установке*Table 3. GHG emission factors from the combustion of a hydrocarbon mixture at a flare plant*

Вид углеводородной смеси	$EF_{CO_2,j,y}$		$EF_{CH_4,j,y}$, %	
	т/т	т/тыс. m^3	т/т	т/тыс. m^3
Газ дегазации угольных пластов	1,8863	1,6294	0,0206	0,0178

Результаты расчета ПГ от сжигания метана на факельных установках
Table 4. Results of GHG calculation from methane combustion in flares

Показатель	Значение показателя для шахты	
	2	3
$FC_{j,y}$ т CH_4 /год	4 500	7 800
$EF_{CO_2,j,y}$ т/т	1,8863	1,8863
$EF_{CH_4,j,y}$ т/т	0,0006	0,0006
$E_{CO_2,y}$ выбросы CO_2 расчетным методом, т CO_2 /год	8 488	14 713
$E_{CH_4,y}$ выбросы CH_4 расчетным методом, т CO_2 /год	2,7	4,7
$E_{i,y}$ суммарные выбросы парниковых газов от сжигания метана на факеле, т CO_2 /год	8 491	14 718

$$E_{CO_2,y} = \sum_{j,b,y} (FC_{j,b,y} EF_{j,b}), \quad (3)$$

где $E_{CO_2,y}$ – выбросы CO_2 от сжигания топлива в двигателях автотранспортных средств за период y , т CO_2 ; $FC_{j,b,y}$ – расход топлива вида j транспортным средством типа b за период y , т; $EF_{j,b}$ – коэффициент выбросов оксида CO_2 при использовании в транспортном средстве типа b вида топлива j , т CO_2 /т (принимается по табл. 5); j – вид топлива (бензин, дизельное топливо, сжиженные

нефтяные и природные газы); b – тип транспортного средства (грузовой, пассажирский, легковой).

Расчеты объемов выбросов парниковых газов от сжигания топлива транспортными средствами представлены в табл. 6.

4. Стационарное сжигание топлива.

Количественное определение выбросов оксида углерода CO_2 от стационарного сжигания топлива выполняется расчетным методом по отдельным источникам, группам источников или организации в целом по формуле:

$$E_{CO_2} = \sum_{j=1}^n (FC_{j,y} EF_{CO_2,j,y} OF_{j,y}), \quad (4)$$

Т а б л и ц а 5

Коэффициент выбросов оксида углерода CO_2 при использовании топлива в транспортном средстве
Table 5. CO_2 emission factor when fuel is used in a vehicle

Вид топлива	EF			Плотность (P), кг/л
	т CO_2 /т (тыс. м ³)	кг/ТДж	кг/т у.т.	
Бензин АИ-92	3,026	69 300	2 031	0,735
Дизельное топливо зимнее	3,149	74 100	2 172	0,840

Т а б л и ц а 6

Расчеты объемов выбросов ПГ от сжигания топлива транспортными средствами
Table 6. Calculations of greenhouse gas emissions from vehicle fuel combustion

Показатель	Значение показателя для шахты		
	1	2	3
$FC_{j,b,y}$ т/год	20	14	10
$FC_{j,b,y}$ т/год	380	150	170
$EF_{j,b}$ т CO_2 /т	3,026	3,026	3,026
$EF_{j,b}$ т CO_2 /т	3,149	3,149	3,149
$E_{CO_2,y}$ т CO_2 /год	61	42	30
$E_{CO_2,y}$ т CO_2 /год	1197	472	535
$E_{i,y}$ т CO_2 /год	1258	514	565

Т а б л и ц а 7

Коэффициенты выбросов и содержания углерода для соответствующих видов топлива**Table 7. Emission factors and carbon content for each fuel**

Вид топлива	Коэффициенты перевода в тонны условного топлива и энергетические единицы ($NCV_{j,y}$)			$EF_{CO_2, j, y}$		$W_{c, j, y}$	
	Единица измерения	т у.т./т (тыс. м ³)	ТДж/тыс. т (млн м ³)	т CO ₂ /т у.т.	т CO ₂ /ТДж	С/т у.т.	т С/ТДж
Кузнецкий уголь	т	0,876	25,4	2,69	91,9	0,73	25,1

где E_{CO_2} – выбросы CO₂ от стационарного сжигания топлива за период y , т CO₂; $FC_{j,y}$ – расход топлива j за период y , тыс. м³, т, т у.т. или ТДж; $EF_{CO_2, j, y}$ – коэффициент выбросов CO₂ от сжигания топлива j за период y , т CO₂/ед.; $OF_{j,y}$ – коэффициент окисления топлива j , доля; j – вид топлива, используемого для сжигания; n – количество видов топлива, используемых за период y .

Коэффициенты выбросов оксида CO₂ от сжигания топлива ($EF_{CO_2, j, y}$) рассчитываются на основе фактических данных о содержании углерода в твердом и жидком топливе:

$$EF_{CO_2, j, y} = W_{c, j, y} \cdot 3,664, \quad (5)$$

где $EF_{CO_2, j, y}$ – коэффициент выбросов оксида CO₂ от сжигания j -ого топлива за период y , т CO₂/т; $W_{c, j, y}$ – содержание углерода в j -ом топливе за период y , т С/т; 3,664 – коэффициент перевода, т CO₂/т С.

Для расчета используются значения коэффициентов выбросов и содержания углерода для соответствующих видов топлива. В табл. 7 указаны коэффициенты перевода для кузнецкого угля.

Для кузнецкого угля содержание углерода согласно Приказу МПР № 371 равно $W_{c, j, y} = 0,73$ т С/т у.т.,

Коэффициент выбросов оксида CO₂ от сжигания j -углей за период составит:

$$EF_{CO_2, j, y} = 0,73 \cdot 3,664 = 2,67 \text{ т CO}_2/\text{т у.т.}$$

Расход топлива котельной в отопительный период на шахте 1 составляет 45 500 т угля. Тогда выбросы оксида CO₂ составят:

$$E_{CO_2} = 45500 \cdot 2,67 = 121485 \text{ т CO}_2 \text{ экв.}$$

Для шахт 2 и 3 произведены аналогичные расчеты, итоговые результаты сведены в табл. 8.

Для определения объема выбросов парниковых газов необходимо суммировать объем выбросов парниковых газов от каждого технологического процесса (табл. 9).

Анализ рассчитанных объемов выбросов парниковых газов предприятий

Анализ рассчитанного объема выбросов парниковых газов от различных процессов на угледобывающих предприятиях позволяет сделать следующие выводы.

Выбросы метана от общего количества выбросов ПГ для предприятий в среднем составляют около 96 % (рис. 1).

Эксплуатация факельных установок на шахтах 2 и 3 позволила снизить выбросы метана на 4,5 и 7,8 тыс. т CH₄ (табл. 1).

Т а б л и ц а 8

Результаты расчетов выбросов ПГ от стационарного сжигания топлива**Table 8. Results of calculations of greenhouse gas emissions from stationary fuel combustion**

Шахта	$W_{c, j, y}$, т	$EF_{CO_2, j, y}$, т CO ₂ /т у.т.	E_{CO_2} , т CO ₂ -экв
1	45500	2,67	121485
2	20000	2,67	53400
3	15500	2,67	41385

Результаты расчетов выбросов ПГ
Table 9. Results of GHG emissions calculations

Технологические процессы (показатель)	Значение показателя для шахты		
	1	2	3
Проведение технологических операций, осуществляемых при добыче, обработке, транспортировке и хранении угля, т CO ₂ /год	2 512 500	1 395 000	2 067 500
Сжигание на факельных установках, т CO ₂	–	8 491	14 718
Сжигание на транспорте	1258	514	565
Стационарное сжигание топлива, т CO ₂	121485	53400	41385
Суммарный объем выбросов парниковых газов, т CO ₂	2 635 243	1 457 405	2 124 168

Выбросы метана и сниженный объем выбросов ПГ представлены на рис. 2.

Снижение выбросов метана факельными установками позволяет, кроме снижения выбросов парниковых газов, сократить плату за негативное воздействие на окружающую среду.

В настоящее время согласно нормативной базе эколого-экономических расчетов плата за негативное воздействие на окружающую среду в пределах нормативов допустимых выбросов или сбросов загрязняющих веществ $\Pi_{нд}$ рассчитывается по формуле [22]:

$$\Pi_{нд} = \sum_{i=1}^n M_{ндi} H_{нли} K_{от} K_{но} K_{во}), \quad (6)$$

где $M_{ндi}$ – платежная база за выбросы или сбросы i -го загрязняющего вещества (определяют как

объем или массу выбросов или сбросов ЗВ в количестве установленных нормативов допустимых выбросов или сбросов ЗВ); $H_{нли}$ – ставка платы за выброс или сброс i -го загрязняющего вещества (ставка платы за выбросы метана составляет 108 руб. за т) [23]; $K_{от}$ – дополнительный коэффициент к ставкам платы (применяется в отношении территорий и объектов, находящихся под особой охраной в соответствии с федеральными законами, равен двум); $K_{но}$ – коэффициент к ставкам платы за выброс или сброс i -го ЗВ за объем или массу выбросов или сбросов ЗВ, в пределах допустимых нормативов, равный 1; $K_{во}$ – коэффициент к ставкам платы за сбросы ЗВ организациями, эксплуатирующими централизованные системы водоотведения поселений или городских округов при сбросах загрязняющих веществ, равный 0,5; n – количество видов ЗВ.

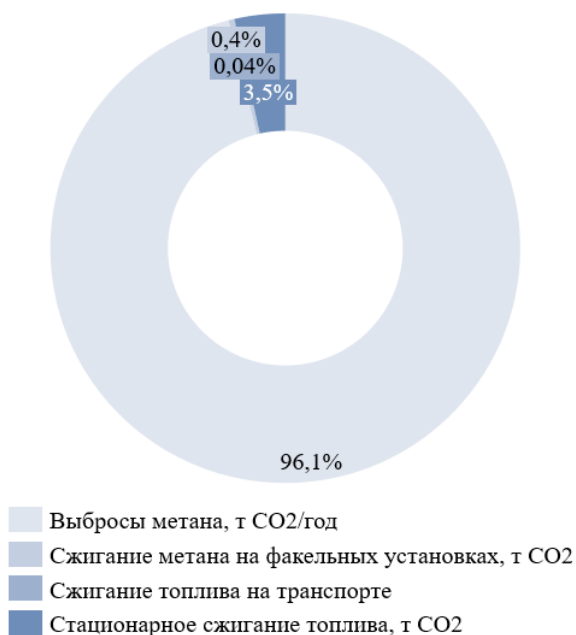


Рис. 1 Распределение среднего объема выбросов ПГ предприятиями
 Fig. 1. Distribution of average GHG emissions by company

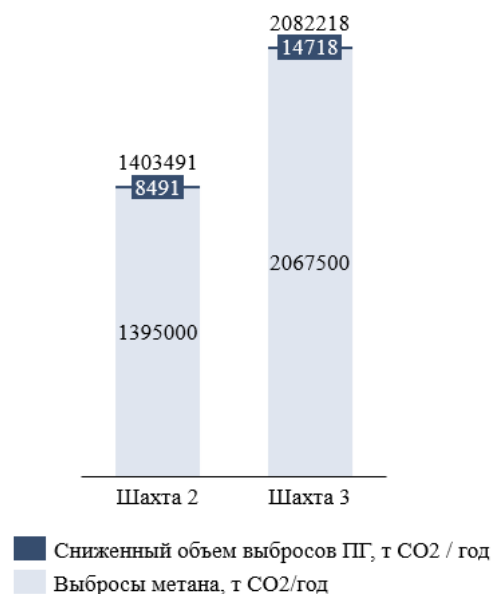


Рис. 2 Выбросы метан и сниженный объем выбросов ПГ, т CO₂ экв.
 Fig. 2. Methane emissions and reduced greenhouse gas emissions, t CO₂ eq.

Плата за выбросы метана
Table 10. Payment for methane emissions

Показатель	Значение показателя для шахты		
	1	2	3
Прямые выбросы метана, тыс. т /год	100,5	60,3	90,5
Утилизация метана на факельных установках, тыс. т/год	–	4,5	7,8
Объем выбросов метана после утилизации, тыс. т/год	100,5	55,8	82,7
Снижение платы за НВОС, млн руб./год	–	0,6	1,1
Итого плата за НВОС, млн руб./год	13,7	7,6	11,2

Для расчета платы за НВОС при превышении количества загрязняющих веществ, которое установлено для объектов категории I, коэффициент $K_{нд}$ принимается равным 100.

Коэффициент индексации тарифов платы за негативное воздействие на окружающую среду в 2023 г. равен 1,26 [27].

Расчет размера платы шахт за выбросы метана представлена в табл. 10.

Внедрение факельных установок на шахтах 2 и 3 позволило снизить операционные затраты предприятий за год на 0,6 и 1,1 млн руб.

Эксплуатация установок на предприятиях позволяет управлять выбросами метана и удерживать их в пределах нормативных значений, снижая тем самым вероятность платы за НВОС с применением 100-кратного коэффициента за сверхнормативные выбросы.

Управление выбросами метана позволяет компаниям снижать негативное воздействие предприятий на окружающую среду; минимизировать операционные затраты в части платы за НВОС; снижать риск платы за сверхнормативные выбросы метана; соответствовать планам России по декарбонизации и нивелировать риски, связанные с реализацией на всей территории страны системы торговли квотами на выбросы парниковых газов.

В настоящее время в России реализовано небольшое количество проектов по снижению выбросов парниковых газов. Сдерживающими факторами являются высокие капитальные затраты и отсутствие углеродного регулирования на всей территории страны.

Выводы

Определены источники выбросов парниковых газов угольных шахт, произведены расчеты выбросов парниковых газов, согласно утвер-

жденной Министерством природных ресурсов методике, установлено, что наибольшие выбросы парниковых газов приходятся на метан. Отмечено, что факельные установки позволяют уменьшить загрязнение окружающей среды на территории работы предприятия, а также снизить операционные затраты, что является двойным эффектом (экологическим и экономическим) для предприятий. Внедрение большего количества установок позволит предприятиям управлять выбросами ПГ и нивелировать риск платы за НВОС в стократном размере. Снижение выбросов парниковых газов компаниями соответствует курсу страны на декарбонизацию экономики и реализацию механизмов углеродного регулирования (система торговли квотами) по всей стране.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бузмаков С.А., Воронов Г.А. Основные подходы в определении качества окружающей среды // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 2. С.587–590.
2. Нагайцев И.А., Петрова Т.В. Предпосылки становления системы торговли квотами на выбросы парниковых газов в России // Актуальные проблемы экономики и управления в XXI веке. Ч. 2. 2023. С. 161–166.
3. Парижское соглашение к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. Генеральная Ассамблея, 2015. 42 с.
4. Указ Президента Российской Федерации № 666. О сокращении выбросов парниковых газов. 2020. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202011040008> (дата обращения 15.08.2023).
5. Стратегия социально экономического развития Российской Федерации с низким

- уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. Правительство Российской Федерации. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/726639341> (дата обращения 20.08.2023).
6. Федеральный закон № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» от 2 июля 2021 г. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031> (дата обращения 22.08.2023).
 7. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 371 от 27 мая 2022 года. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034> (дата обращения 25.08.2023).
 8. Hyder Z., Ripepi, N.S., Karmis M.E. A life cycle comparison of greenhouse emissions for power generation from coal mining and underground coal gasification // *Mitig Adapt Strateg Glob Change*. 2016. Vol. 21. P. 515–546. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9561-8>
 9. Fiehn, A., Kostinek, J., Eckl, M., Klausner, T., Gałkowski, M., Chen, J., Gerbig, C., Röckmann, T., Maazallahi, H., Schmidt, M., Korbeń, P., Nečki, J., Jagoda, P., Wildmann, N., Mallaun, C., Bun, R., Nickl, A.-L., Jöckel, P., Fix, A., and Roiger, A.: Estimating CH₄, CO₂ and CO emissions from coal mining and industrial activities in the Upper Silesian Coal Basin using an aircraft-based mass balance approach // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2020. Vol. 20. No. 21. P. 12675–12695. <https://doi.org/10.5194/acp-20-12675-2020>
 10. Тайлаков О.В., Соколов С.В., Уткаев Е.А., Михалев Д.С. Алгоритмическое обеспечение цифровой платформы мониторинга fugитивных выбросов парниковых газов при угледобыче // *Уголь*. 2023. № 5. С. 84–89. <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-84-89>
 11. Ajay K. Singh, Udayan Singh, Durga C. Panigrahi and Jayant Singh // *iScience*. 2022. Vol. 25. P. 104946. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106878>
 12. Nazar Kholod, Meredydd Evans, Raymond C. Pilcher, Volha Roshchanka, Felicia Ruiz, Michael Coté, Ron Collings. Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 256. P. 120489. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120489>
 13. Guo J., Gao J., Yan K., Zh. Bo. Unintended mitigation benefits of China's coal de-capacity policies on methane emissions // *Energy Policy*. 2023. Vol. 181. P. 113718. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113718>
 14. Zastrelov D., Snetova E., Lukina E. Estimate of greenhouse gas emissions during coal production // *E3S Web of Conferences*. 2021. No. 330. P. 04003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202133004003>
 15. Li Benzhen, Shi Yongkui, Hao Jian, Ma Chengyun, Pang Chuming, Yang Huidi. Research on a Carbon Emission Calculation Model and Method for an Underground Fully Mechanized Mining Process // *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 8. P. 2871. <http://dx.doi.org/10.3390/en15082871>
 16. Singh Ajay. Better accounting of greenhouse gas emissions from Indian coal mining activities A field perspective // *Environmental Practice*. 2019. Vol. 21. No. 1. P. 36–40. <http://dx.doi.org/10.1080/14660466.2019.1564428>
 17. Ivanova S., Vesnina A., Fotina N., Prosekov A. An Overview of Carbon Footprint of Coal Mining to Curtail Greenhouse Gas Emissions // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. No. 22. P. 15135. <http://dx.doi.org/10.3390/su142215135>
 18. Christensen S., Durrant N., Connor P.O., Phillips A. Regulating greenhouse gas emissions from coal mining activities in the context of climate change // *Environmental and Planning Law Journal*. 2011. Vol. 28. No. 6. P. 381–415.
 19. Zhu Anyu, Wang Qifei, Liu Dongqiao, Zhao Yihan. Analysis of the Characteristics of CH₄ Emissions in China's Coal Mining Industry and Research on Emission Reduction Measures // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19. No. 12. P. 7408. <https://doi.org/10.3390/ijerph19127408>
 20. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 507 от 8 декабря 2020 года. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012210103?rangeSize=50> (дата обращения 26.08.2023).
 21. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 2979-р от 22.10.2021 г.». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202110260021> (дата обращения 26.08.2023).
 22. Постановление Правительства РФ от 03.03.2017 № 255 «Об исчислении и взимании платы за негативное воздействие на окружающую среду». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201703090002> (дата обращения 27.08.2023).

23. Постановление Правительства РФ от 13.09.2016 № 913 «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/420375216> (дата обращения 29.08.2023).
24. Постановление Правительства РФ от 20.03.2023 № 437 «О применении в 2023 году ставок платы за негативное воздействие на окружающую среду». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202303300046> (дата обращения 29.08.2023).

REFERENCES

1. Buzmakov S.A., Voronov G.A. The main approaches in determining the quality of the environment. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2016, vol. 18, no. 2, pp. 587–590. (In Russ.).
2. Nagaitsev I.A., Petrova T.V. Prerequisites for the establishment of a system of trading quotas for greenhouse gas emissions in Russia. *Aktual'nye problemy ekonomiki i upravleniya v XXI veke*. Ch.2. 2023, pp. 161–166. (In Russ.).
3. Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change. General Assembly, 2015. 42 p. (In Russ.).
4. Decree of the President of the Russian Federation No. 666. On reducing greenhouse gas emissions. 2020. – Available at URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202011040008> (Accessed 15.08.2023). (In Russ.).
5. The strategy of socio-economic development of the Russian Federation with a low level of greenhouse gas emissions until 2050. The Government of the Russian Federation. – Available at URL: <https://docs.cntd.ru/document/726639341> (Accessed 20.08.2023). (In Russ.).
6. Federal Law No. 296-FZ "On Limiting Greenhouse Gas Emissions" dated July 2, 2021 – Available at URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031> (Accessed 22.08.2023). (In Russ.).
7. Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation No. 371 dated May 27, 2022. Available at URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034> (Accessed 25.08.2023). (In Russ.).
8. Hyder Z., Ripepi, N.S., Karmis M.E. A life cycle comparison of greenhouse emissions for power generation from coal mining and underground coal gasification. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*. 2016, vol. 21, pp. 515–546. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9561-8>
9. Fiehn, A., Kostinek, J., Eckl, M., Klausner, T., Galkowski, M., Chen, J., Gerbig, C., Röckmann, T., Maazallahi, H., Schmidt, M., Korbeň, P., Nečki, J., Jagoda, P., Wildmann, N., Mallaun, C., Bun, R., Nickl, A.-L., Jöckel, P., Fix, A., and Roiger, A.: Estimating CH₄, CO₂ and CO emissions from coal mining and industrial activities in the Upper Silesian Coal Basin using an aircraft-based mass balance approach. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2020, vol. 20, no. 21, pp. 12675–12695. <https://doi.org/10.5194/acp-20-12675-2020>
10. Tailakov O.V., Sokolov S.V., Utkaeв E.A., Mikhalev D.S. Algorithmic support of a digital platform for monitoring fugitive greenhouse gas emissions from coal mining. *Ugol'*. 2023, no. 5, pp. 84–89. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-84-89>
11. Ajay K. Singh, Udayan Singh, Durga C. Panigrahi,1 and Jayant Singh. *iScience*. 2022, vol. 25, pp. 104946. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106878>
12. Nazar Kholod, Meredydd Evans, Raymond C. Pilcher, Volha Roshchanka, Felicia Ruiz, Michael Coté, Ron Collings. Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production. *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 256, pp. 120489. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120489>
13. Guo J., Gao J., Yan K., Zh. Bo. Unintended mitigation benefits of China's coal de-capacity policies on methane emissions. *Energy Policy*. 2023, vol. 181, pp. 113718. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113718>
14. Zastrellov D., Snetova E., Lukina E. Estimate of greenhouse gas emissions during coal production. *E3S Web of Conferences*. 2021, no. 330, pp. 04003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202133004003>
15. Li Benzhen, Shi Yongkui, Hao Jian, Ma Chengyun, Pang Chuming, Yang Huidi. Research on a Carbon Emission Calculation Model and Method for an Underground Fully Mechanized Mining Process. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 8, pp. 2871. <http://dx.doi.org/10.3390/en15082871>
16. Singh Ajay. Better accounting of greenhouse gas emissions from Indian coal mining activities A field perspective. *Environmental Practice*. 2019, vol. 21, no. 1, pp. 36–40. <http://dx.doi.org/10.1080/14660466.2019.1564428>
17. Ivanova S., Vesnina A., Fotina N., Prosekov A. An Overview of Carbon Footprint of Coal Mining to Curtail Greenhouse Gas Emissions . *Sus-*

- tainability. 2022, vol. 14, no. 22, pp. 15135. <http://dx.doi.org/10.3390/su142215135>
18. Christensen S., Durrant N., Connor P.O', Phillips A. Regulating greenhouse gas emissions from coal mining activities in the context of climate change. *Environmental and Planning Law Journal*. 2011, vol. 28, no. 6, pp. 381–415.
 19. Zhu Anyu, Wang Qifei, Liu Dongqiao, Zhao Yihan. Analysis of the Characteristics of CH₄ Emissions in China's Coal Mining Industry and Research on Emission Reduction Measures. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022, vol. 19, no. 12, pp. 7408. <https://doi.org/10.3390/ijerph19127408>
 20. Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision No. 507 dated December 8, 2020. Available at URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012210103?rangeSize=50> (Accessed 26.08.2023). (In Russ.).
 21. Decree of the Government of the Russian Federation No. 2979-r dated 10/22/2021.– Available at URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202110260021> (Accessed 29.08.2023). (In Russ.).
 22. Decree of the Government of the Russian Federation No. 255 dated 03.03.2017 «On the Calculation and collection of fees for negative environmental impact». – Available at URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201703090002> (Accessed 29.08.2023). (In Russ.).
 23. Decree of the Government of the Russian Federation No. 913 dated 13.09.2016 «On the rates of payment for negative environmental impact and additional coefficients». – Available at URL: <https://docs.cntd.ru/document/420375216> (Accessed дд.мм.2023). (In Russ.).
 24. Decree of the Government of the Russian Federation No. 437 dated 20.03.2023 «On the Application of Payment rates for negative Environmental impact in 2023». – Available at URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202303300046> (Accessed дд.мм.2023). (In Russ.).
- Сведения об авторах**
Илья Александрович Нагайцев, главный эксперт департамента устойчивого развития, Аналитический центр ТЭК
E-mail: ia.nagaitzev@yandex.ru
ORCID 0009-0004-0777-0857
- Information about the authors**
Ilya A. Nagaitsev, Chief Expert of the Sustainable Development Department, Analytical Centre of the Fuel and Energy Complex
E-mail: ia.nagaitzev@yandex.ru
ORCID 0009-0004-0777-0857
- Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*
The authors declare that there is no conflict of interest.
- Поступила в редакцию 14.09.2023
 После доработки 18.09.2023
 Принята к публикации 21.09.2023
- Received 14.09.2023
 Revised 18.09.2023
 Accepted 21.09.2023