

ОТРАСЛЕВЫЕ РЫНКИ И РЫНОЧНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА SECTORAL MARKETS AND MARKET INFRASTRUCTURE

УДК 332.142.6

DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-1-41-55

Сравнительный анализ технологий снижения выбросов парниковых газов на угольных шахтах

Ефремкова Т.И., Нагайцев И.А., Петрова Т.В.

Сибирский государственный индустриальный университет
Россия, 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, зд. 42
efremkova_ti@sibsiu.ru, ia.nagaitzev@yandex.ru, ptrvt@mail.ru

Аннотация. В работе приведено описание технологий снижения выбросов парниковых газов, доступных угледобывающим предприятиям. В рамках работы приведены результаты экспертной оценки критериев выбора технологий снижения выбросов парниковых газов (метана) для реализации на угольных шахтах. Экспертная оценка проведена на основе мнений группы экспертов, в которую вошли руководящие работники угледобывающих и проектных предприятий, сотрудники профильных аналитических центров и научно-производственных объединений, преподаватели профильных кафедр университетов. Цель работы состоит в оценке критериев технологий снижения выбросов парниковых газов, характерных для угледобывающих предприятий методом сравнительного анализа. Задачей исследования является проведение сравнительного анализа и выводов о том, на какие критерии необходимо обращать внимание при выборе к реализации технологии снижения выбросов парниковых газов (метана) угольными шахтами. В результате выполненного исследования сделаны выводы о наиболее релевантных критериях при выборе к реализации технологии снижения выбросов парниковых газов (метана) угольными шахтами. Экспертная оценка критериев дает возможность впоследствии обоснованно принимать решения при выборе технологии в процессе управления выбросами парниковых газов угледобывающими предприятиями.

Ключевые слова: технологии снижения выбросов парниковых газов (метана), угледобывающая отрасль, шахтный метан, экспертная оценка

Для цитирования: Ефремкова Т.И., Нагайцев И.А., Петрова Т.В. 2025. Сравнительный анализ технологий снижения выбросов парниковых газов на угольных шахтах. *Экономика. Информатика*, 52(1): 41–55. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-1-41-55

Comparative Analysis of Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from Coal Mines

Tatyana I. Efremkova, Ilia A. Nagaitsev, Tatyana V. Petrova

Siberian State Industrial University
building 42, Kirova St, Novokuznetsk 654007, Russia
efremkova_ti@sibsiu.ru, ia.nagaitzev@yandex.ru, ptrvt@mail.ru

Abstract. The paper describes greenhouse gas (GHG) abatement technologies available to coal mining companies. As part of the work, we present the results of the expert assessment of the criteria for selecting technologies for reducing greenhouse gas (methane) emissions to be implemented at coal mines. The expert assessment was carried out, based on the opinions of a group of experts which included senior officials of coal mining and project enterprises, employees of specialized analytical centers and scientific and industrial

© Ефремкова Т.И., Нагайцев И.А., Петрова Т.В., 2025

associations, and teachers of specialized departments of universities. The purpose of the work is to evaluate the criteria of greenhouse gas emission reduction technologies typical of coal mining enterprises using the method of comparative analysis. The aim of the study is to conduct a comparative analysis and to identify criteria that should be taken into account when choosing a technology for reducing greenhouse gas emissions (methane) from coal mines. As a result of the study, conclusions have been drawn about the criteria which are most relevant for the above purpose. The expert evaluation of the criteria will allow to make an informed decision on the selection of the technology in the process of managing GHG emissions from coal mines.

Keywords: technologies for reducing greenhouse gas (methane) emissions, coal mining industry, coal mine methane, expert assessment

For citation: Efremkova T.I., Nagaytsev I.A., Petrova T.V. 2025. Comparative Analysis of Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from Coal Mines. *Economics. Information technologies*, 52(1): 41–55 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-1-41-55

Введение

В настоящее время климатические изменения – одна из ключевых проблем в общемировой повестке. Климатические изменения, кроме прочих причин, связаны с увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере, которые способствует росту температуры. Для стабилизации концентрации парниковых газов в атмосфере на таком уровне, который бы не допускал опасного антропогенного воздействия на климатическую систему, была принята Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций (ООН) об изменении климата (заключена в г. Нью-Йорке 9 мая 1992 г.) [United Nations Framework Convention on Climate Change..., 1992], направленная на борьбу с климатическими изменениями. В настоящее время правовой основой международного взаимодействия по вопросам изменения климата является Парижское соглашение [Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change..., 2015].

Выполненный группой экспертов анализ эффективности мер климатических политик, реализуемых различными странами в рамках Парижских соглашений, показал, что в четырех секторах, 41 стране за два десятилетия выявлено 63 успешных политических вмешательства с большим эффектом, результатом которых стало сокращение общих выбросов парниковых газов на 0,6–1,8 Гт CO₂ экв [Stechemesser, 2024].

В 2021 году глобальные выбросы CO₂ при сжигании топлива выросли почти на 6 %, вернувшись к уровням, предшествовавшим пандемии Covid-19. Ископаемые виды топлива по-прежнему составляют 80 % от общего объема энергоснабжения (ТЭС) в мире, при этом на нефть приходится почти 30 %, за ней следуют уголь (27 %) и природный газ (24 %). В глобальных выбросах от сжигания топлива преобладают уголь (44 %), нефть (32 %) и природный газ (22 %) [Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer..., 2023]. В частности, в России наибольший объем выбросов парниковых газов приходится на энергетический сектор, в том числе от сжигания ископаемых видов топлива (86 %), потерь и технологических выбросов топливных продуктов атмосферу (14 %) от деятельности по добыче углеводородов [Охрана окружающей среды в России..., 2022], в том числе угля.

Обзор литературы

Анализом выбросов парниковых газов от угледобывающей отрасли занимаются научные сотрудники и исследователи различных научных центров и объединений.

Международное энергетическое агентство (МЭА) в своем ежегодном обзоре выбросов метана дает оценку, что метан ответственен примерно за 30 % повышения глобальной температуры со времен промышленной революции, и быстрое и устойчивое сокращение выбросов метана имеет ключевое значение для ограничения потепления в краткосрочной

перспективе и улучшения качества воздуха [Global Methane Tracker..., 2023]. Две ключевые характеристики определяют влияние различных парниковых газов на климат: продолжительность их пребывания в атмосфере и их способность поглощать энергию. Метан имеет гораздо более короткое время жизни в атмосфере, чем углекислый газ (CO_2) – около 12 лет по сравнению со столетиями – но поглощает гораздо больше энергии, пока существует в атмосфере. Объем выбросов метана в мире представлен на рис. 1.

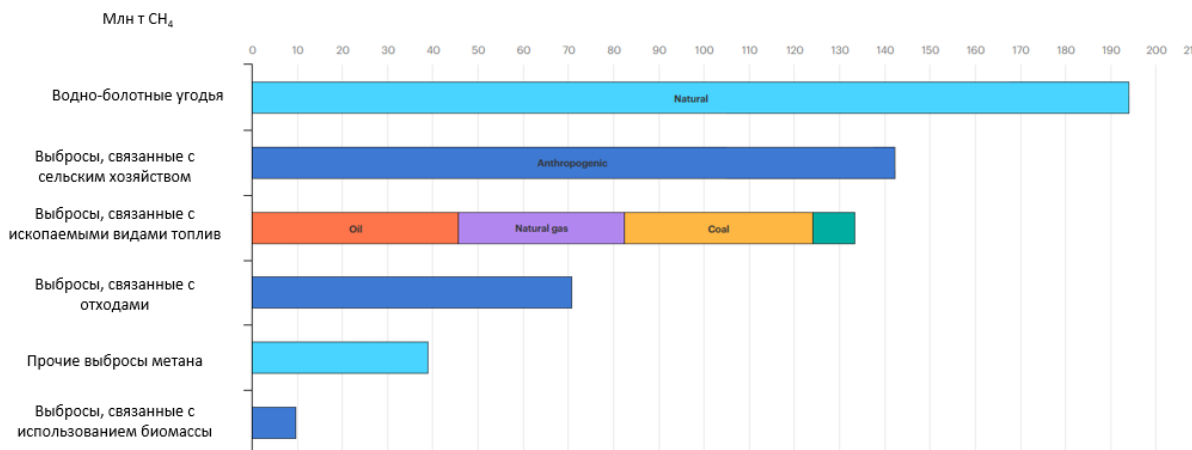


Рис. 1. Объем выбросов метана в мире в 2022 г. [Global Methane Tracker..., 2023]
Fig. 1. Global methane emissions in 2022 [Global Methane Tracker..., 2023]

На деятельность, связанную с добычей, переработкой, обогащением и дальнейшим использованием угля, по оценкам МЭА, приходится 41,8 млн т CH_4 , что составляет более 10 % от общего объема выбросов метана в результате деятельности человека. На энергетический уголь и лигнит приходится около 75 % выбросов шахтного метана, а на коксующийся уголь – оставшиеся 25 %. Добыча угля подземным способом ответственна за около 70 % выбросов, а открытым – за оставшуюся часть.

Аналитическое агентство EMBER в своем обзоре оценивает влияние угледобывающей отрасли на глобальные выбросы метана [Understanding the EU's Methane Regulation for coal..., 2024]. В своем обзоре аналитики дают оценку выбросов в странах, занимающихся добычей угля, со времени первого в истории Регламента ЕС по метану. Специалисты проанализировали существующие технологии сокращения выбросов метана и потенциальные сокращения от их использования.

Оценка показателей выбросов парниковых газов для угольных теплоэлектростанций выполнена сотрудниками Научно-исследовательского института «Центр экологической промышленной политики». Они отметили решения, направленные на снижение выбросов в теплоэнергетике, включающие переход от угля к сжиганию природного газа, внедрение парогазовых установок, повышение коэффициента полезного действия при производстве электрической энергии на конденсационных электростанциях [Росляков, 2023].

Потенциал снижения выбросов метана и связанные с этим затраты на угольных шахтах Китая рассмотрены в работе китайских ученых [Kang, 2024]. В работе выполнена оценка и прогноз выбросов метана угольных шахт в провинциях Китая, показаны потенциал смягчения последствий и затраты при различных сценариях добычи угля с учетом интеграции динамических коэффициентов выбросов метана и ключевых технологий снижения выбросов.

Авторы Блиновская Я.Ю. и Мазлова Е.А. выполнили анализ воздействия выбросов парниковых газов в атмосферу при добыче угля [Блиновская, 2019]. В работе сделаны выводы, что существенное сокращение выбросов парниковых газов в отрасли весьма проблематично из-за горно-геологических условий и отсутствия необходимых технологий и по этим причинам ратификация Парижского соглашения по климату приводит к дополнительным затратам

угольных компаний и отдельных предприятий и росту себестоимости добычи угля. В другой работе авторы отметили основные тренды климатической политики в сфере добычи и переработки угля [Блиновская, 2019]. Авторы относят к основным факторам, ограничивающим в настоящее время реализацию климатической доктрины в угледобывающей отрасли: отсутствие полноценной испытательной стендовой базы, недостаточное научное сопровождение отработки угольных пластов в особо опасных горно-геологических условиях, недостаточный учет местных и слоевых скоплений метана у горных машин и буровых станков в системе аэрогазового контроля.

Агентство по охране окружающей среды США (The Environmental Protection Agency (EPA)) дает оценку выбросам метана от добычи угля, которые составят 10 % от мировых выбросов метана к 2030 г. [Opportunities to Globally Address Coal Mine Methane Emissions..., 2024]. Наибольшие выбросы метана от добычи угля придутся на страны-производители: Китай, Россию, США, Индию и Австралию. Агентство по охране окружающей среды оценивает, что около 64 % прогнозируемых выбросов в 2030 году можно будет избежать, используя доступные технологии снижения выбросов метана от угледобычи.

Воздействие угольной промышленности на окружающую среду и, в том числе, на климат, рассмотрено в работе авторов Сунчугашевой Е.А. и Игнатовой А.Ю. Авторы отметили, что основными источниками загрязнения атмосферного воздуха в угольной промышленности являются отвалы пустой породы, транспортировка и хранение угля, буровзрывная техника, выбросы от котельных установок и вентиляционные стволы шахт, через которые происходит выброс парникового газа – метана в результате процесса дегазации и проветривания [Сунчугашева, 2018].

Обзор состояния и возможностей смягчения последствий изменения климата путем сокращения выбросов шахтного метана выполнен в работе команды исследователей из различных стран [Karacan, 2024]. В своей работе они описывают источники метана угольных шахт, исследования мониторинга и инвентаризации, а также методы смягчения последствий, там же обсуждается вклад шахтного метана в глобальные выбросы метана в контексте изменения климата.

Исследование Института экономики энергетики и финансового анализа (IEEFA) показало, что на долю метана приходится около 30 % общих выбросов парниковых газов в Австралии [Gross under-reporting of fugitive methane missions has big implications for industry..., 2023]. Поскольку потенциал влияния на глобальное потепление у метана выше, чем у углекислого газа, предприятия сталкиваются с проблемой сокращения выбросов метана в результате своей деятельности. Исследователи считают, что такие технологии, как системы каталитического окисления и дегазации, в случае их коммерциализации могут вывести добычу угля на новый уровень устойчивого будущего, к которому стремится Австралия.

Оценку сокращения выбросов метана в горнодобывающей промышленности в своей работе дает Профессор Могтадери из Института энергетики и ресурсов Ньюкасла [Moghtaderi, 2019].

Технологии сокращения выбросов парникового газа – метана рассмотрены в работе научных сотрудников Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук [Тайлаков, 2022]. В работе представлен ретроспективный анализ выбросов метана при угледобыче подземным и открытым способами, а также последующей деятельности с углем, извлеченным подземным способом в Кузбассе. Рассмотрены современные технологии переработки угольного метана, который выводится на поверхность вентиляционными и дегазационными системами угольных шахт для получения химических продуктов, тепловой и электрической энергии.

Материалы и методы исследования

Ранее в рамках исследования был произведен сравнительный анализ технологий снижения выбросов метана, применяемых на угольных шахтах по всему миру [Нагайцев, 2024]. Отмечено, что проблема климатических изменений напрямую связана с антропогенными выбросами парниковых газов. Наибольшую часть выбросов парниковых

газов составляют выбросы от энергетического сектора, в том числе от деятельности по подземной добыче угля (выбросы метана шахтами). Поэтому рассмотрим основные технологии снижения выбросов метана в угольной отрасли в рамках снижения выбросов парниковых газов в целом.

Генерация электроэнергии. Технология позволяет утилизировать метан, откачиваемый дегазационными установками с концентрацией не менее 25 % посредством газопоршневых установок с генерацией полезной электроэнергии.

Выработка тепла. Технология позволяет утилизировать метан, откачиваемый дегазационными установками с концентрацией не менее 30 %. Опыт переработки дегазационного метана в блочно-модульной котельной и теплоэлектростанции на шахтах Кузбасса для выработки тепловой энергии описывается в работе кузбасских ученых [Тайлаков, 2024].

Комбинированная генерация тепло- и электроэнергии. Технология позволяет утилизировать метан, откачиваемый дегазационными установками с концентрацией не менее 25 % с дальнейшим полезным использованием в тепло- и электроэнергию.

Утилизация метана на факельных установках. Технология позволяет утилизировать метан, откачиваемый дегазационными установками с концентрацией не менее 25 %. Научные сотрудники Кузбасских институтов в своей работе [Тайлаков, 2025] отмечают важный недостаток – отсутствие возможности полезного использования метана.

Регенеративное термическое окисление МВС. Технология применима к выбросам с концентрацией метана от 0,3 % до 1,2 %. Опыт внедрения и эксплуатации установок подробно описывает канадский производитель установок Biothermica [First Vamox Project ..., 2022].

Угледобывающие предприятия в праве самостоятельно выбирать и внедрять на своем производстве технологии снижения выбросов метана. В России в настоящее время реализовано несколько проектов снижения выбросов метана шахтами. Реализованные в РФ проекты утилизации шахтного метана представлены на рис. 2.



Рис. 2. Проекты утилизации шахтного метана в РФ
Fig. 2. Coal mine methane utilization projects in the Russian Federation

Примечание. Составлено авторами

Для принятия решений по перспективному использованию технологий снижения выбросов парниковых газов (метана) в угольной отрасли России ранее был предложен методический подход к выявлению перспективных технологий, основанный на применении метода сравнительного анализа. Технологии оцениваются в работе по следующим критериям: затраты на снижение выбросов парниковых газов, распространенность, универсальность, технологическая эффективность. В работе сделаны выводы о наиболее релевантных технологиях снижения выбросов парниковых газов для угледобывающих предприятий [Нагайцев, 2024].

Результаты исследования

Для оценки технологий ранее был предложен и описан метод сравнительного анализа технологий снижения выбросов ПГ в угольной отрасли, метод реализован с использованием экспертных оценок. Описание критериев оценки технологий снижения выбросов парниковых газов на угольных шахтах приведено ранее в исследовании [Нагайцев, 2024].

Критерии оценки технологий снижения выбросов парниковых газов на угольных шахтах:

- а) затраты на снижение выбросов парниковых газов на одну тонну;
- б) распространенность;
- в) универсальность;
- г) технологическая эффективность.

Экспертам было предложено расставить критерии (факторы) по местам (рангам) в зависимости от степени их влияния на целесообразность реализации технологий: на первое место – основной критерий (фактор) (ранг 1), на второе – менее значимый и т. д. В том случае, если специалист (эксперт) затруднялся отдать предпочтение одному из критериев (факторов), он мог присвоить двум, трем или четырем факторам один и тот же ранг. Пример заполнения листа экспертной оценки приведен в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Пример заполнения таблицы
Example of filling in a table

Критерии (факторы)	Технологии				
	Генерация электроэнергии	Выработка тепла	Комбинированная генерация тепло- и электроэнергии	Регенеративное термическое окисление МВС	Утилизация метана на факельных установках
Затраты на снижение выбросов парниковых газов	1	1	2	4	3
Распространенность	3	1	2	2	2
Универсальность	2	1	2	1	1
Технологическая эффективность	4	2	2	3	4

Примечание. Составлено авторами

По окончании заполнения экспертных листов было выявлено, что во многих случаях эксперты затруднились различить приоритетность факторов и поставили им в соответствие одинаковые ранги. Поэтому на первом этапе обработки результатов опроса осуществлена стандартизация полученных рангов. На основании стандартизованных значений рангов выполнен расчет суммарного ранга факторов по результатам ответов всех экспертов в разрезе разных технологий (табл. 2), на основании которого проведено ранжирование критериев выбора технологий (факторов) по ответам всех экспертов (табл. 3).

Таблица 2
Table 2

Суммарные стандартизованные ранги по ответам всех экспертов
Total standardized ranks according to the responses of all experts

Критерии (факторы)	Технологии				
	Генерация электроэнергии	Выработка тепла	Комбинирован- ная генерация тепло- и электроэнергии	Регенеративное термическое окисление МВС	Утилизация метана на факельных установках
Затраты на снижение выбросов парниковых газов	32	33,5	30	40	31,5
Распространенность	45	38,5	43,5	45	40,5
Универсальность	34,5	49,5	33,5	32	32,5
Технологическая эффективность	38,5	28,5	43	33	45,5
Итого	150	150	150	150	150

Примечание. Составлено авторами

Таблица 3
Table 3

Результаты ранжирования факторов по ответам всех экспертов
The results of ranking factors based on the responses of all experts

Критерии (факторы)	Технологии				
	Генерация электроэнергии	Выработка тепла	Комбинирован- ная генерация тепло- и электроэнергии	Регенеративное термическое окисление МВС	Утилизация метана на факельных установках
Затраты на снижение выбросов парниковых газов	1	2	1	3	1
Распространенность	4	3	4	4	3
Универсальность	2	4	2	1	2
Технологическая эффективность	3	1	3	2	4
Итого	10	10	10	10	10

Примечание. Составлено авторами

Для определения коэффициентов значимости критериев в рамках каждой технологии применен метод парного сравнения. Результаты расчета коэффициентов значимости критериев выбора технологий снижения выбросов парниковых газов на угольных шахтах методом парного сравнения представлены в табл. 4.

Таблица 4
Table 4

Коэффициенты значимости факторов
Factor significance coefficients

Критерии (факторы)	Коэффициент значимости, доли ед.				
	Генерация электроэнергии	Выработка тепла	Комбинированная генерация тепло- и электроэнергии	Регенеративное термическое окисление МВС	Утилизация метана на факельных установках
Затраты на снижение выбросов парниковых газов	0,3221	0,2675	0,3823	0,2266	0,3325
Распространенность	0,1391	0,2390	0,1670	0,1335	0,2220
Универсальность	0,2827	0,0923	0,3061	0,3209	0,3174
Технологическая эффективность	0,2561	0,4013	0,1446	0,3190	0,1282
Итого	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Примечание. Составлено авторами

Результаты сопоставления значений коэффициентов значимости факторов с результатами ранжирования свидетельствует об их одинаковой упорядоченности и непротиворечивости.

Согласно таблице 4, наиболее важным фактором для выбора технологии «Выработка тепла» является критерий «Технологическая эффективность» (коэффициент важности – 0,4013 доли ед.), потому что капитальные затраты на реализацию этой технологии являются наименьшими из рассматриваемых технологий. Для технологий «Комбинированная генерация тепло- и электроэнергии», «Генерация электроэнергии» и «Утилизация метана на факельных установках» важным фактором для выбора технологии эксперты признали «Затраты на снижение выбросов парниковых газов» (0,3823; 0,3221 и 0,3325 соответственно) вследствие сравнительно высоких затрат на реализацию технологий. При выборе технологии «Регенеративное термическое окисление МВС» наиболее важным критерием является критерий универсальности (0,3209), т. к. эта технология применима на исходящей струе воздуха из шахты. Таким образом, наиболее часто, по мнению экспертов, при обязательном обосновании экономической целесообразности проектов на выбор технологии влияет величина затрат на реализацию проекта утилизации.

Наименее важным фактором выбора технологии снижения выбросов парниковых газов на угольных шахтах в зависимости от типа технологии является:

– критерий «Распространенность» – для технологий «Генерация электроэнергии» и «Регенеративное термическое окисление МВС» (коэффициенты важности соответственно 0,1391 и 0,1335 доли ед.), вероятно технология «Генерация электроэнергии» весьма распространена и апробирована, имеет положительный опыт эксплуатации и коммерческую эффективность, технология «Регенеративное термическое окисление МВС» – напротив: из-за малого количества реализованных проектов и отсутствия достаточной достоверной информации об их результативности;

– критерий «Универсальность» – для технологии «Выработка тепла» (0,0923), поскольку применение технологии зависит от региона, где планируется реализация проекта;

– критерий «Технологическая эффективность» – для технологий «Комбинированная генерация тепло- и электроэнергии» и «Утилизация метана на факельных установках» (коэффициенты важности соответственно 0,1446 и 0,1282 доли ед.), т. к. технологии имеют сравнительно схожую эффективность при различных капитальных затратах.

На следующем этапе исследования проведена оценка степени согласованности ответов экспертов с использованием коэффициента конкордации с применением прикладного пакета Statistica (табл. 5).

Таблица 5

Table 5

Результаты оценки согласованности ответов экспертов: коэффициент конкордации
The results of the assessment of the consistency of expert responses: concordance coefficient

Показатель	Технологии				
	Генерация электроэнергии	Выработка тепла	Комбинированная генерация тепло- и электроэнергии	Регенеративное термическое окисление МВС	Утилизация метана на факельных установках
Коэффициент конкордации, W, доли ед.	0,0946	0,2602	0,1454	0,1092	0,1354
Расчетное значение критерия Пирсона ($\chi = 3$), разы	4,26	11,71	6,54	4,91	6,09
Вероятность незначимости согласованности ответов экспертов ($P(W=0)$), доли ед.	0,2350	0,0085	0,0880	0,1783	0,1073
Вывод о согласованности ответов	Не согласованы	Согласованы на уровне значимости $\alpha = 5\%$	Согласованы на уровне значимости $\alpha = 10\%$	Согласованы на уровне значимости $\alpha = 20\%$	Согласованы на уровне значимости $\alpha = 10\%$

Примечание. Составлено авторами

Анализ табл. 5 показывает, что наиболее репрезентативными являются результаты экспертизы технологии «Выработка тепла»: вероятность несогласованности ответов экспертов при ранжировании значимости факторов в условиях данной технологии составляет не более 0,85 %. Такая вероятность обусловлена тем, что технология имеет наименьшие капитальные затраты при высокой эффективности. Приемлемая согласованность ответов экспертов наблюдается и при ранжировании критериев выбора таких технологий, как «Комбинированная генерация тепло- и электроэнергии» и «Утилизация метана на факельных установках» (вероятность несогласованности ответов

экспертов соответственно составляет 8,80 и 10,73 %), поскольку по мнению авторов существует достаточный опыт работы данных установок в России. Результаты расчета коэффициентов значимости факторов при выборе таких технологий, как «Регенеративное термическое окисление МВС» и «Генерация электроэнергии», требуют уточнения в связи с повышенным уровнем вероятности несогласованности ответов экспертов (соответственно 17,83 и 23,50 %), поскольку отсутствует опыт реализации проектов «Регенеративное термическое окисление МВС» в РФ, а для проектов «Генерация электроэнергии» необходимы дополнительные коммуникации и потребители.

Для выявления экспертов, ответы которых имеют низкую согласованность с ответами остальных экспертов, осуществлен расчет попарных ранговых коэффициентов Спирмена в условиях рассматриваемых технологий и выполнена оценка их значимости. В связи с небольшим количеством сравниваемых факторов ($n=4$) оценка значимости ранговых коэффициентов корреляции Спирмена проводилась на уровне значимости $\alpha = 20\%$ путем тестирования суммы квадратов разностей рангов ($S(d^2)$), входящей в формулу расчета коэффициента Спирмена. Сводные результаты оценки попарной согласованности ответов экспертов представлены в табл. 6.

Таблица 6
Table 6

Количество значимых положительных взаимосвязей на уровне $\alpha = 20\%$
 The number of significant positive relationships at the $\alpha=20$ level%

Эксперт	Технологии				
	Генерация электроэнергии	Выработка тепла	Комбинированная генерация тепло- и электроэнергии	Регенеративное термическое окисление МВС	Утилизация метана на факельных установках
Эксперт 1	4	3	0	3	0
Эксперт 2	4	5	3	0	4
Эксперт 3	5	6	0	4	4
Эксперт 4	2	3	3	4	4
Эксперт 5	4	9	6	5	3
Эксперт 6	4	7	6	5	3
Эксперт 7	4	7	6	4	4
Эксперт 8	5	3	6	1	2
Эксперт 9	4	6	6	1	3
Эксперт 10	5	3	1	4	2
Эксперт 11	1	0	1	4	4
Эксперт 12	2	3	3	4	4
Эксперт 13	4	9	6	5	3
Эксперт 14	4	7	6	1	3
Эксперт 15	2	3	3	5	1

Примечание. Составлено авторами

Анализ табл. 6 позволяет сделать вывод, что наименее согласованными (в среднем по всем пяти технологиям) с ответами прочих экспертов являются ответы, данные первым и одиннадцатым экспертами. Однако, если бóльшая несогласованность ответов первого эксперта наблюдается по тем технологиям, где была достигнута существенная согласованность мнений других экспертов («Комбинированная генерация тепло- и

электроэнергии» и «Утилизация метана на факельных установках»), и поэтому не имеет критического влияния на результаты экспертизы, то высокое расхождение мнения одиннадцатого эксперта с групповой оценкой в условиях анализа технологии «Генерация электроэнергии» существенно влияет на значимость результатов. На точность групповой оценки коэффициентов значимости критериев выбора технологии «Генерация электроэнергии» также (помимо ответов одиннадцатого эксперта) существенное влияние оказывают несогласованные ответы второго, двенадцатого и пятнадцатого экспертов.

Кроме того, наибольшее негативное влияние на уменьшение точности групповой оценки критериев выбора технологии «Регенеративное термическое окисление МВС» (по которой наблюдается недостаточно высокая вероятность согласованности ответов экспертов) оказали несогласованные мнения четырех экспертов – второго, восьмого, девятого и четырнадцатого. Данный факт обосновывается сравнительно малым опытом реализации подобных проектов в мире.

К экспертам, чьи ответы можно отнести к 25 % наиболее согласованных (в среднем по оценкам критериев в условиях всех технологий), относятся пятый, шестой, седьмой и тринадцатый эксперты.

Достаточно высокую согласованность ответов (в диапазоне от 50 до 75 %), в среднем по всем технологиям, имеют ответы третьего, восьмого и четырнадцатого экспертов.

Учитывая приведенные выше выводы, на следующем этапе исследования проведена повторная обработка данных методом парного сравнения для определения коэффициентов значимости критериев выбора тех технологий, по которым на первом этапе были получены недостаточно точные результаты: «Генерация электроэнергии» и «Регенеративное термическое окисление МВС». Для повышения качества результатов групповой оценки при анализе технологии «Генерация электроэнергии» были исключены (как низко согласованные) ответы четвертого, одиннадцатого, двенадцатого и пятнадцатого экспертов), а при анализе технологии «Регенеративное термическое окисление МВС» – ответы второго, восьмого, девятого и четырнадцатого экспертов.

В табл. 7 приведена сравнительная характеристика результатов первичной и повторной обработки данных методом парного сравнения для оценки значимости критериев выбора технологии «Генерация электроэнергии». Согласно табл. 7, в результате исключения экспертных мнений с низкой согласованностью ответов получено изменение **значимости и приоритетности** критериев выбора технологии: по критерию «Универсальность» произошло увеличение значимости с 28,3 до 35,5 %, сопровождающееся выходом этого критерия на первое место, и смещением критерия «Затраты на снижение выбросов парниковых газов» на второе место с параллельным сокращением уровня его значимости с 32,2 до 31,3 %. Кроме того, наблюдается существенное уточнение значимости критерия «Распространенность» с 13,9 до 5,00 %, что позволяет сделать вывод о его незначительном влиянии на внедрение технологии генерации электроэнергии. Коэффициент конкордации по результатам второго этапа экспертизы возрастает с 0,0946 до 0,4027 (доли ед.), расчетное значение критерия Пирсона – с 4,26 до 13,29 (раза), что обеспечивает снижение вероятности несогласованности ответов экспертов с 23,5 до 0,41 % и позволяет сделать вывод о согласованности ответов экспертов на уровне значимости $\alpha=5\%$.

В табл. 8 приведена сравнительная характеристика результатов первичной и повторной обработки данных методом парного сравнения для оценки значимости критериев выбора технологии «Регенеративное термическое окисление МВС». Согласно табл. 8, в результате исключения экспертных мнений с низкой согласованностью ответов получено изменение **значимости и приоритетности** критериев выбора технологии: по критерию «Технологическая эффективность» произошло увеличение значимости с 31,9 до 32,5 %, обеспечившее выход этого критерия на первое место и смещение критерия «Универсальность» на второе место с параллельным сокращением уровня его значимости с 32,1 до 29,6 %. Кроме того, наблюдается существенное уточнение значимости критериев «Затраты на снижение выбросов парниковых газов» и «Распространенность», сопровождающееся сменой их приоритетности. Так, значимость критерия «Затраты на

снижение выбросов парниковых газов» снизилась с 22,7 до 15,1 %, что привело к его смещению с третьего на четвертое место по приоритетности и, напротив, по критерию «Распространенность» по итогам второго этапа экспертизы достигнуто увеличение коэффициента значимости с 13,6 до 22,8 % и его подъему с четвертого на третье место. Коэффициент конкордации по результатам второго этапа экспертизы возрастает незначительно с 0,1092 до 0,1434 (доли ед.), однако в связи с уменьшением количества экспертов, учитываемых на втором этапе, с 15 до 11 человек расчетное значение критерия Пирсона уменьшается с 4,91 до 4,73 (раза), что несмотря на рост коэффициента конкордации приводит к увеличению вероятности несогласованности ответов экспертов с 17,8 до 19,3 %, т. е. не улучшает результаты экспертизы по данной технологии. Таким образом, по результатам анализа значимости критериев выбора технологии «Регенеративное термическое окисление МВС» требуется провести дополнительное изучение мнения экспертов с применением более точных методов сбора и обработки данных (например, метода Дельфи) и/или с привлечением более широкого круга экспертов, специализирующихся на анализе данной технологии.

Таблица 7

Table 7

Коэффициенты значимости критериев выбора технологии «Генерация электроэнергии»
 The coefficients of significance of the criteria for choosing the technology
 "Generation of electric energy"

Критерии (факторы)	I этап экспертизы		II этап экспертизы	
	Коэффициент значимости, доли ед.	Ранг	Коэффициент значимости, доли ед.	Ранг
Затраты на снижение выбросов парниковых газов	0,3221	1	0,3130	2
Распространенность	0,1391	4	0,0498	4
Универсальность	0,2827	2	0,3547	1
Технологическая эффективность	0,2561	3	0,2826	3
Итого	1,0000	—	1,0000	—

Примечание. Составлено авторами

Таблица 8

Table 8

Коэффициенты значимости критериев выбора технологии
 «Регенеративное термическое окисление МВС»
 Coefficients of significance of criteria for choosing the technology
 "Regenerative thermal oxidation of VAM"

Критерии (факторы)	I этап экспертизы		II этап экспертизы	
	Коэффициент значимости, доли ед.	Ранг	Коэффициент значимости, доли ед.	Ранг
Затраты на снижение выбросов парниковых газов	0,2266	3	0,1511	4
Распространенность	0,1335	4	0,2281	3
Универсальность	0,3209	1	0,2959	2
Технологическая эффективность	0,3190	2	0,3250	1
Итого	1,0000	—	1,0000	—

Примечание. Составлено авторами

Заключение

В результате экспертной оценки установлено, что наиболее важным критерием при выборе технологии снижения выбросов парниковых газов является «Технологическая эффективность», поскольку технологии имеют различную эффективность в снижении выбросов метана. Следующим по важности стал критерий: «Универсальность», т. к. для трех из пяти технологий («Генерация электроэнергии», «Выработка тепла», «Комбинированная генерация тепло- и электроэнергии») он является приоритетным, поскольку необходимы потребители полезного тепла и/или электроэнергии в непосредственной близости от места реализации технологии. Менее значимым по важности является критерий «Распространенность» – показатель готовности технологии к масштабированию и дальнейшему применению при реализации проектов. Критерий «Затраты на снижение выбросов парниковых газов» стал самым незначительным для экспертов, поскольку все технологии имеют высокие капитальные затраты и для выбора между ними необходимо учитывать другие критерии.

Выполненная экспертная оценка приоритетности факторов при обосновании технологии снижения выбросов парниковых газов дает возможность обоснованно принимать решения при выборе технологии в процессе управления выбросами ПГ угледобывающими предприятиями.

Список источников

- Глобальный трекер метана 2023. Международное энергетическое агентство (МЭА). URL: <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2023> (дата обращения: 25.12.2024).
- Охрана окружающей среды в России. 2022: Стат. сб./Росстат. - 0-92 М., 2022. – 115 с. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ochrana_okruj_sredi_2022.pdf (дата обращения: 21.12.2024).
- First Vamox Project. Biothermica. 2022. URL: <https://www.biothermica.com/content/first-vamox-project> (дата обращения: 20.12.2024).
- Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer. IEA. 2023 URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer> (дата обращения: 14.12.2024).
- Gross under-reporting of fugitive methane emissions has big implications for industry. The Institute for Energy Economics and Financial Analysis. 2023. URL: https://ieefa.org/sites/default/files/2023-07/Gross%20underreporting%20of%20fugitive%20methane%20emissions%20has%20big%20implications%20for%20industry_2.pdf (дата обращения: 20.12.2024).
- Opportunities to Globally Address Coal Mine Methane Emissions. The Environmental Protection Agency (EPA). 2024. URL: <https://www.epa.gov/cmop/opportunities-globally-address-coal-mine-methane-emissions#Internal-1> (дата обращения: 20.12.2024).
- Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change. General Assembly. 2015. 42 p.
- Understanding the EU's Methane Regulation for coal. EMBER. 2024. URL: <https://ember-energy.org/app/uploads/2024/09/EU-Methane-Regulation-Explained.pdf> (дата обращения: 20.12.2024).
- United Nations Framework Convention on Climate Change. The General Assembly. 1992. 24 p.

Список литературы

- Блиновская Я.Ю., Мазлова Е.А. 2019. Основные тренды климатической политики в сфере добычи и переработки угля. *Успехи современного естествознания*, 2: 86–93.
- Блиновская Я.Ю., Маслова Е.А. 2019. Выбросы парниковых газов при добыче и переработке угля: состояние проблемы и технологии снижения. *Известия Российского государственного гидрометеорологического университета*, 1: 145–154. DOI:10.33933/2074-2762-2019-54-145-154
- Нагайцев И.А., Петрова Т.В. 2024. Сравнительный анализ перспективных технологий снижения выбросов метана на угольных шахтах. *Энергетическая политика*, 1(192): 38–57.

- Росляков П.В., Скобелев Д.О., Доброхотова М.В. и др. 2023. Оценка показателей выбросов парниковых газов для угольных тепловых электростанций в контексте развития углеродного регулирования в Российской Федерации. *Уголь*, 9: 84–89. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-84-89
- Сунчугашева Е.А., Игнатова А.Ю. 2018. Воздействие угольной промышленности на окружающую среду. III Всероссийская молодежная научно-практическая конференция Экологические проблемы промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути решения, 330.1–330.5.
- Тайлаков О.В., Застрелов Д.Н., Уткаев Е.А. 2015. Направления утилизации шахтного метана. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, 6(112): 62–67.
- Тайлаков О.В. Застрелов Д.Н. 2013. Переработка дегазационного метана в энергетических установках на угледобывающих предприятиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, 56: 170–176 URL: <http://www.gornaya-kniga.ru/periodic/1730> (дата обращения: 20.12.2024).
- Тайлаков О.В., Уткаев Е.А., Макеев М.П. 2022. Фугитивные выбросы метана и технологии их сокращения при угледобыче в Кузбассе. *Горная промышленность*, 6: 54–59. URL: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-54-59>
- Kang Y, Tian P, Li J, Wang H, Feng K. 2023. Methane mitigation potentials and related costs of China's coal mines. *Fundamental Research*, 4(6): 1688–1695. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2023.09.012>.
- Karacan C.O., Field R.A., Olczak M. et al. 2024. Mitigating climate change by abating coal mine methane: A critical review of status and opportunities. *International Journal of Coal Geology*. Vol. 295. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2024.104623>. (дата обращения: 20.12.2024).
- Moghtaderi B. 2019. Reducing methane emissions in mining. University of Newcastle. URL: https://www.newcastle.edu.au/__data/assets/pdf_file/0010/533449/UON-Impact-Case-Study-Reducing-Methane-in-Mining-March-2019.pdf (дата обращения: 20.12.2024).
- Stechemesser A. et al., 2024. Climate policies that achieved major emission reductions: Global evidence from two decades. *Science*, 385(6711): 884–892. DOI:10.1126/science.adl654

References

- Blinovskaya Ya.Yu., Mazlova E.A. 2019. The main trends of climate policy in the field of coal mining and processing. *Successes of Modern Natural Science*, 2: 86–93.
- Blinovskaya Ya.Yu., Maslova E.A. 2019. Greenhouse gas emissions from coal mining and processing: the state of the problem and reduction technologies. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*, 1: 145–154. DOI:10.33933/2074-2762-2019-54-145-154
- Nagaytsev I.A., Petrova T.V. 2024. Comparative analysis of promising technologies for reducing methane emissions in coal mines. *Energy Policy*, 1(192): 38–57.
- Roslyakov P.V., Skobelev D.O., Dobrokhotova M.V. and others 2023. Assessment of greenhouse gas emissions for coal-fired thermal power plants in the context of the development of carbon regulation in Of the Russian Federation. *Coal*, 9: 84–89. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-84-89
- Sunchugasheva E.A., Ignatova A.Y. 2018. The impact of the coal industry on the environment. III All-Russian Youth Scientific and Practical Conference Environmental Problems of Industrialized and resource-producing regions: solutions, 330.1–330.5.
- Tailakov O. V., Strellov D. N., Utkaeve E. A. 2015. Directions of mine methane utilization. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 6(112): 62–67.
- Tailakov O.V. Strellov D.N. 2013. Processing of degassing methane in power plants at coal mining enterprises. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 56: 170–176 URL: <http://www.gornaya-kniga.ru/periodic/1730> (date of request: 12/20/2024).
- Tailakov O.V., Utkaeve E.A., Makeev M.P. 2022. Fugitive methane emissions and technologies for their reduction during coal mining in Kuzbass. *Mining Industry*, 6: 54–59. URL: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-54-59>
- Kang Y, Tian P, Li J, Wang H, Feng K. 2023. Methane mitigation potentials and related costs of China's coal mines. *Fundamental Research*, 4(6): 1688–1695. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2023.09.012>.
- Karacan C.O., Field R. A., Olczak M. et al. 2024. Mitigating climate change by abating coal mine methane: A critical review of status and opportunities. *International Journal of Coal Geology*. Vol. 295. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2024.104623>. (дата обращения: 20.12.2024).

- Moghtaderi B. 2019. Reducing methane emissions in mining. University of Newcastle. URL: https://www.newcastle.edu.au/__data/assets/pdf_file/0010/533449/UON-Impact-Case-Study-Reducing-Methane-in-Mining-March-2019.pdf (дата обращения: 20.12.2024).
- Stechemesser A. et al., 2024. Climate policies that achieved major emission reductions: Global evidence from two decades. *Science*, 385(6711): 884–892. DOI:10.1126/science.adl654

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 24.09.2024

Поступила после рецензирования 22.01.2025

Принята к публикации 31.01.2025

Received September 24, 2024

Revised January 22, 2025

Accepted January 31, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ефремкова Татьяна Ивановна, кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента и территориального развития, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Нагайцев Илья Александрович, аспирант кафедры менеджмента и территориального развития, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Петрова Татьяна Викторовна, доктор экономических наук, профессор кафедры менеджмента и территориального развития, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatyana I. Efremkova, PhD in Economics, Associate Professor of the Department of Management and Territorial Development, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Ilya A. Nagaitsev, Postgraduate Student of the Department of Management and Territorial Development, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Tatyana V. Petrova, Doctor of Economics, Professor of the Department of Management and Territorial Development, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia