

Сравнительный анализ перспективных технологий снижения выбросов метана на угольных шахтах

Comparative analysis of promising abatement technologies greenhouse gas emissions from coal mines

Илья НАГАЙЦЕВ

Сибирский государственный
индустриальный университет
E-mail: ia.nagaitzev@yandex.ru

Ilya NAGAYTSEV

Siberian State Industrial University
E-mail: ia.nagaitzev@yandex.ru

Татьяна ПЕТРОВА

Сибирский государственный
индустриальный университет
E-mail: ia.nagaitzev@yandex.ru

Tatiana PETROVA

Siberian State Industrial University
E-mail: ia.nagaitzev@yandex.ru

Добыча угля в Китае

Источник: bangkokbook.ru



Аннотация. В работе произведен сравнительный анализ технологий снижения выбросов метана, применяемых на угольных шахтах по всему миру. 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, связанной с подземной добычей угля (выбросы метана шахтами). В работе представлены действия Китая и России по снижению выбросов парниковых газов. Китай, являясь страной с наибольшими выбросами парниковых газов, разрабатывает и реализовывает мероприятия для снижения выбросов метана в различных отраслях промышленности. Для России реализация проектов по снижению выбросов метана является одним из перспективных направлений в угольной отрасли. В статье приведены технологии снижения выбросов метана в угольной отрасли, такие как: генерация электроэнергии, выработка тепла, комбинированная генерация тепло- и электроэнергии, утилизация метана на факельных установках, регенеративное термическое окисление MBC. Отмечено, что в настоящее время в мире реализовано и запланировано к реализации более 300 проектов по утилизации шахтного метана различными технологиями, из которых наибольший приоритет получили проекты когенерации тепло- и электроэнергии – 101 проект и генерация электроэнергии – 70 проектов. Приведено описание технологий снижения выбросов парниковых газов, капитальные затраты, средний срок эксплуатации и эффективность работы установок. Для принятия решений по перспективному использованию технологий снижения выбросов парниковых газов (метана) в угольной отрасли России 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. Сделаны выводы о наиболее релевантных технологиях снижения выбросов парниковых газов для угледобывающих предприятий.

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

Abstract. The paper provides a comparative analysis of greenhouse gas (methane) abatement technologies used in coal mines around the world. It notes that the problem of climate change is directly linked to anthropogenic greenhouse gas emissions. The majority of greenhouse gas emissions come from the energy sector, including activities related to underground coal mining (methane emissions from mines). China, as the country with the highest greenhouse gas emissions, is developing and implementing measures to reduce methane emissions in various industries. For Russia, the implementation of methane reduction projects is one of the promising areas for coal mining companies. The article presents technologies for reducing greenhouse gas (methane) emissions in the coal industry, such as: power generation, heat generation, combined heat and power generation, methane utilization in flares, regenerative thermal oxidation of methane. It was noted that more than 300 projects for the utilization of coal mine methane using various technologies are currently being implemented or planned around the world, of which combined heat and power projects – 101 projects – and electricity generation – 70 projects – have been given the highest priority. The description of the greenhouse gas reduction technologies, capital costs, average lifetimes and efficiency of the plants are given. In order to make decisions on the prospective use of greenhouse gas (methane) reduction technologies in the Russian coal industry, a methodological approach to identifying promising technologies based on the use of a comparative analysis method was developed. The technologies are evaluated in the work according to the following criteria: the cost of reducing greenhouse gas emissions, prevalence, versatility, technological efficiency. Conclusions are drawn on the most relevant greenhouse gas (methane) abatement technologies for coal mining companies.

Keywords: greenhouse gas emissions, technologies to reduce greenhouse gas emissions (methane), coal mining, coal mine methane.



Бригада отрабатывает лаву №804, Полысаевский пласт

Источник: «СУЭК»

Введение

В настоящее время изменение климата стало одной из актуальных проблем в общемировой повестке. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) в шестом оценочном докладе подтвердила факт, что деятельность человека, результатом которой являются антропогенные выбросы парниковых газов (далее ПГ), однозначно вызвала негативные процессы, связанные с изменением климата¹.

Парниковые газы – газообразные вещества природного или антропогенного происхождения, которые поглощают и переизлучают инфракрасное излучение. Увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере способствует росту температуры, что влечет за собой глобальные климатические изменения. Для стабилизации концентрации парниковых газов в атмосфере на таком уровне, который бы не допускал опасного антропогенного воздействия на климатическую систему, была принята Рамочная конвен-

ция Организации Объединенных Наций (ООН) об изменении климата (заключена в г. Нью-Йорке 9 мая 1992 г.)², которая в настоящее время является правовой основой международного взаимодействия по вопросам изменения климата. Далее был принят Киотский протокол к Рамочной конвенции ООН об изменении климата³, который обязывает подписавшие его стороны сокращать выбросы парниковых газов и содержит рыночные механизмы для снижения неблагоприятных последствий изменения климата и воздействия на международную торговлю, социальные, экологические и экономические сферы жизнедеятельности человека. В целях активизации международных усилий по достижению конечной цели Рамочной конвенции на Парижской конференции по климату (COP21) в декабре 2015 г. принято Парижское соглашение по борьбе с климатическими изменениями⁴.

Для реализации Парижского соглашения в России утверждена Стратегия социально-экономического развития

¹ IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35–115, DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647 (дата обращения: 15.09.2023).

² United Nations Framework Convention on Climate Change. The General Assembly. 1992. 24 p. (дата обращения: 15.09.2023).

³ Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. General Assembly. 1997. 20 p. (дата обращения: 21.08.2023).

⁴ Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change. General Assembly. 2015. 42 p. (дата обращения: 20.08.2023).



Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.⁵, в развитие которой в октябре 2023 г. принята Климатическая доктрина Российской Федерации. Она представляет собой систему взглядов на цели, основные принципы, задачи и механизмы реализации единой государственной политики Российской Федерации по вопросам, связанным с изменением климата и его последствиями. Документ является основой для выработки и реализации климатической политики⁶. В настоящее время в стране проводится активная работа по формированию условий для перехода к низкоуглеродной экономике. В рамках долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации предполагается достижение с учетом национальных интересов и приоритетов развития не позднее 2060 г. баланса между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением (достижение углеродной нейтральности).

Для достижения целей в стране уже реализуется ряд мероприятий. Одно из них – это обязательная отчетность для компаний, чьи выбросы парниковых газов превышают 150 тыс. т/г. CO₂-экв. в рамках

⁵ Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р «Об утверждении стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.». С. 37 (дата обращения: 12.09.2023).

⁶ Указ Президента РФ от 26 октября 2023 г. № 812 «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации». С. 22 (дата обращения: 10.11.2023).

Шахтеры перед сменой. Пенсильвания, США

Источник: *trip-for-the-soul.ru*



С целью контроля эмиссии парниковых газов в стране принят стандарт выбросов угольного метана, который запрещает выбросы высококонцентрированного газа с концентрацией более 30%

Федерального закона «Об ограничении выбросов парниковых газов»⁷. Кроме того создана система обращения углеродных единиц, в рамках которой в реестре углеродных единиц⁸ уже зарегистрировано семь климатических проектов⁹, выпущено 84,4 тыс. углеродных единиц, еще 2,4 млн углеродных единиц планируется к выпуску. Одновременно проводится эксперимент по квотированию выбросов парниковых газов на Сахалине¹⁰, где в сентябре 2023 г. для компаний региона были установлены квоты на выбросы парниковых газов.

Наибольшие выбросы парниковых газов связаны с энергетикой (34%), промышленностью (24%), сельским хозяйством (22%), транспортом (15%) и эксплуатацией зданий (6%). В России выбросы ПГ от энергетического сектора, возникают при сжигании ископаемых видов топлива (86%), потерь и технологических выбросов топливных продуктов атмосферу (14%) от деятельности по добыче углеводородов¹¹, в том числе угля.

Добыча угля подземным способом сопровождается значительной эмиссией метана (CH₄) – парникового газа, который влияет на ускорение процессов изменения климата в большей степени, чем углекис-

⁷ Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов». С. 20 (дата обращения: 20.08.2023).

⁸ Реестр углеродных единиц Российской Федерации. URL: <https://carbonreg.ru/ru> (дата обращения: 15.10.2023).

⁹ Приказ Минэкономразвития России от 11 мая 2022 г. № 248 «Об утверждении критериев и порядка отнесения проектов, реализуемых юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями или физическими лицами, к климатическим проектам, формы и порядка представления отчета о реализации климатического проекта». С. 20 (дата обращения: 15.09.2023).

¹⁰ Федеральный закон «О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации» от 06.03.2022 № 34-ФЗ. С. 24 (дата обращения: 10.09.2023).

¹¹ Охрана окружающей среды в России. 2022: Стат. сб./Росстат. – 0-92 М., 2022. – 115 с. (дата обращения: 28.08.2023).

лый газ (CO_2), с потенциалом глобального потепления превышающим CO_2 в 25 раз¹². Метан – взрыво- и пожароопасный газ, выделяющийся из угольных пластов при добыче полезного ископаемого. Технология обработки на угольных шахтах предусматривает применение различных схем проветривания горных выработок и средств дегазации, что позволяет снижать концентрацию метана до предельно-допустимой и выбрасывать метановоздушную смесь на поверхность. В руководящих принципах национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК¹³ определены источники выбросов парниковых газов на угольных шахтах: выбросы метана из вентиляционных струй с низкой концентрацией метана (менее 0,75%) и выбросы метана из систем дегазации с высокой концентрацией метана (более 25%). К учету принимаются выбросы метана при и после добычи. В руководящих принципах приведены расчетные формулы и коэффициенты для определения объема выбросов парниковых газов угольными шахтами.

Для достижения к 2060 г. баланса между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением угледобывающим предприятиям необходимо наращивать компетенции по учету и анализу выбросов парниковых газов и возможности управлять своими выбросами. Одним из наиболее эффективных инструментов на сегодняшний день является внедрение технологий снижения выбросов парниковых газов (метана).

Угледобывающие предприятия по всему миру разрабатывают и внедряют различные технологии снижения выбросов метана, такие как: генерация электроэнергии, выработка тепла, комбинированная генерация тепло- и электроэнергии, утилизация метана на факельных установках, регенеративное термическое окисление МВС. В России в настоящее время реализовано несколько проектов снижения выбросов метана шахтами.

С целью научного обоснования эффективности использования технологий снижения выбросов парниковых газов (метана) проведен ряд исследований, результаты которых изложены в научных работах.

¹² Приказ Минприроды России от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов». С. 179 (дата обращения: 10.08.2023).

¹³ IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy. Chapter 4: Fugitive Emissions. 2006. P. 78. – URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_4_Ch4_Fugitive_Emissions.pdf (дата обращения: 20.07.2023).



Проект добычи метана из угольных пластов

Источник: A42.RU dzen.ru

В работе научных сотрудников Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН [1] представлены основные категории выбросов парниковых газов при угледобыче, отмечено, что большие объемы этой эмиссии приходятся на шахтный метан. Представлена структура и основные компоненты цифровой платформы оценки фугитивных выбросов при добыче угля и предложено использование платформы для обоснования рациональных технологий переработки шахтного метана.

В статье исследователей состояния мировых выбросов и использования шахтного метана из США, проведен анализ выбросов метана угольными шахтами [2], сделаны выводы, что часть выбрасываемого метана идет на производство теп-

Снижение выбросов метана на угольных шахтах является одной из действенных мер по сокращению общих выбросов парниковых газов, большое скопление которых может привести к изменениям климата



ла и электроэнергии, а оставшаяся часть выбрасывается в атмосферу. Извлечение и использование шахтного метана представляет собой экономически целесообразный процесс, с одновременным повышением безопасности шахт и улучшением экономических показателей производства за счет использования ранее выбрасываемого метана.

В монографии «Зарубежный и отечественный опыт освоения ресурсов метана угольных пластов» [3] рассмотрено состояние и перспективы развития добычи шахтного метана, представлен обзор опыта его использования для нужд предприятия, выявлены основные экономические и организационные проблемы применения технологий утилизации метана.

Научными сотрудниками из США в своей работе представлен прогноз выбросов метана при добыче угля при различных сценариях добычи, в том числе с увеличением глубины разработки до 2100 г. [4]. Отмечено, что шахтный метан является ценным энергетическим ресурсом, и более точные прогнозы будущих выбросов метана в атмосферу могут дать лучшее понимание экономического потенциала этого энергетического ресурса. В работе сделан еще один важный вывод – количество заброшенных угольных шахт увеличивается с каждым годом и открывает возможности для реализации проектов по полезному использованию метана, не связанных с добычей угля.

Другой группой исследователей из США произведен обзор методов улавливания и использования для повышения безопасности ведения горных работ и сокращения выбросов парниковых газов [5]. В работе рассмотрены технические аспекты вентиляции и дегазации горных выработок, а также преимущества производства энергии из шахтного метана при снижении выбросов парниковых газов в атмосферу с получением экономического эффекта.

В работе «Воздействие выбросов шахтного метана на окружающую среду и стратегии реагирования в Китае» рассматривается влияние выбросов метана из угольных шахт на глобальное изменение климата [6]. В статье проанализированы данные о выбросах метана из угольных шахт Китая, сделаны выводы, что выбросы метана при добыче угля составляют лишь небольшую долю в общем объеме выбросов парниковых газов по сравнению с выбросами углекислого газа в результате сжигания ископаемого топлива.

В статье «Экономическая целесообразность промышленной добычи метана Карагандинского угольного бассейна» рассмотрен мировой опыт добычи шахтного метана [7]. Отмечено, что Казахстан обладает значительными запасами шахтного метана, а технология его добычи позволит осуществлять заблаговременную дегазацию угольных пластов, снизить экологическую составляющую и использовать

Предупреждение о возможном выходе метана

Источник: МЧС России ТАСС / profile.ru



метан в отраслях экономики, благодаря его высокой теплотворной способности.

В работе научных сотрудников Московского государственного горного университета, сотрудников ОАО «Воркутауголь» и угольного департамента АО «Миттал Стил Темиртау» определены концептуальные подходы и основные мероприятия по комплексному решению проблемы обеспечения метанобезопасности угольных шахт России и СНГ [8]. Разработана концепция, включающая запрет разработки угольных пластов с газоносностью более 9 м³/т без заблаговременной дегазации. Эффект от мероприятия – внедрение технологий обеспечения метанобезопасности подземной добычи угля, повышение прибыльности угольных шахт за счет увеличения производительности по добыче угля и использования угольного метана, а также сокращение выбросов парниковых газов.

В статье «Метан из угольных пластов: от опасности к ресурсу» указано [9], что ранее большая часть исследований в области шахтного метана была направлена на прогнозирование и предотвращение опасностей, связанных с внезапными выбросами и увеличением концентрации в горных выработках. Однако «Энергетический кризис» 1970-х гг. обусловил исследования возможности добычи газа для коммерческого использования. С 1970-х гг. научные исследования причин и последствий выбросов метана на угольных шахтах привели к значительным достижениям в области извлечения и разработки метана из угольных пластов для коммерческого использования. В настоящее время основные направления исследований в отношении метана угольных пластов – обеспечение безопасной добычи полезных ископаемых, использование метана в качестве нетрадиционного источника энергии и его воздействие на окружающую среду.

В статье исследователей из Китая отмечено [10], что за последние десятилетия страна изменила подход к обращению с шахтным метаном: от снижения его опасности в горнодобывающей промышленности к развитию его потенциала как нетрадиционного энергетического ресурса.

Еще одно исследование китайских ученых направлено на изучение влияния макроэкономической ситуации в стране на прибыль от добычи угля [11]. Уголь-

ные шахты вынуждены увеличивать инвестиции в борьбу с метаном для обеспечения безопасности производства, поскольку катастрофы, связанные с шахтным метаном, становятся все более серьезными. Угольным шахтам необходимо производить расчет стоимости контроля за выбросами метана и внедрения технологий по управлению выбросами в атмосферу, с получением дополнительной выгоды за счет генерации тепло- и электроэнергии.

В совместной работе кузбасских и китайских ученых, приведена концепция «Уголь – Энергия – информация» [12], которая подразумевает, как строительство центров обработки данных на промышленных площадках угольных шахт, так и использование шахтного метана. Шахтный метан может использоваться в качестве основного источника энергии для энергообеспечения потребителей центров обработки данных, а также потребителей угольных шахт необходимыми энергетическими ресурсами (электроэнергией, теплом и охлаждением). В рамках предлагаемой концепции рассматриваются несколько вариантов утилизации шахтного метана.

В статье китайских ученых приведен обзор технологий снижения выбросов парниковых газов [13]. Сделаны выводы, что большая часть шахтного метана низкой концентрации (менее 30%) не утилизирует-

Система аэрогазового контроля метана

Источник: news.sgnorilsk.ru





Шахтеры в Китае

Источник: bangkokbook.ru

ся и выбрасывается непосредственно в атмосферу, производя примерно до 28 млрд м³ выбросов CH₄ в год. Это вызывает серьезный парниковый эффект и энергетические потери. Отмечено, что использование шахтного метана имеет жизненно важное значение для достижения энергетического перехода и углеродной нейтральности.

В работе исследователей из Австралии проведен обзор и оценка 30 китайских проектов по добыче шахтного метана [14], проекты были распределены по следующим критериям: безопасность, использование энергии и технологичность. Сделаны выводы о наиболее экологически эффективных проектах.

В статье исследователей Байкальского государственного университета метан угольных пластов описан как новый чистый и нетрадиционный источник энергии, а его разработка открывает широкие перспективы [15]. Приведен опыт Китая по реализации перспективных и эффективных методов добычи метана. Определены и оценены, том числе с точки зрения экономической целесообразности, существующие технологии добычи метана из угольных пластов.

Исследователи из США в своей работе рассматривают технические аспекты улавливания шахтного метана из угольных шахт [16]. Приведены различные методы улавливания метана и удаления его из действующих и заброшенных шахт. Отмечено, что улавливание метана позволяет повысить уровень безопасности на пред-

приятиях и вырабатывать энергию за счет внедрения технологий снижения выбросов парниковых газов.

В работе австралийских исследователей приведена эффективная и экономичная технология снижения выбросов и утилизации метана в вентиляционном воздухе шахт [17]. В основу этой технологии взято термическое окисление метана с низкой концентрацией (менее 1%). Предлагается использовать реактор с монокристаллическим слоем катализатора, который обладает лучшими характеристиками для выработки электроэнергии, чем реакторы с неподвижным слоем. В статье рассматриваются основы каталитического сжигания метана и представлены экспериментальные результаты моделирования характеристик каталитического сжигания метана в вентиляционном воздухе (VAM), в том числе с применением инновационной технологии.

Технологии повышения энергоэффективности, выпуск гибридных автомобилей и электромобилей позволяют снизить выбросы ПГ при одновременной экономии средств бюджета предприятия

В статье китайских исследователей приведены нормативно-правовые акты Китая в области улавливания и утилизации шахтного метана и спрогнозированы последствия для снижения выбросов шахтного метана [18]. Отмечено, что на момент исследования существовала разница между оценкой выбросов метана, произведенной в данной работе, и в более ранних исследованиях. Сделаны выводы, что правительству необходимо разработать дополнительную программу по улучшению качества данных на уровне предприятий не только по действующим, но и по заброшенным угольным шахтам, поскольку большое количество угольных шахт будет

метана из угольных шахт¹⁴. В своей работе по исследованию влияния угольной отрасли на климат, аналитики отмечают, что сокращение выбросов метана в угольной промышленности будет способствовать замедлению процессов изменения климата. Для снижения выбросов парниковых газов специалисты рассматривают сокращение объемов производства энергии на ТЭС, закрытие шахт с наибольшими утечками метана и применение технологий снижения выбросов ПГ (метана).

Китай является страной с самыми большими антропогенными выбросами парниковых газов, реализующей климатическую повестку с целью достижения к 2060 г. углеродной нейтральности. Энергетическому сектору страны, осуществляющему выбросы при добыче и сжигании всех видов ископаемого топлива, уделяется особое внимание. Одним из ключевых направлений по снижению антропогенных выбросов парниковых газов является снижение выбросов метана от процессов добычи. С целью контроля эмиссии парниковых газов в стране принят стандарт выбросов угольного метана (шахтного газа), который запрещает выбросы высококонцентрированного газа с концентрацией более 30%. Одновременно предприняты меры для его утилизации с полезным использованием. Стандарт предусматривает автоматический контроль выбросов метана и основных параметров смеси с возможностью передачи данных в центр мониторинга отдела охраны окружающей среды [19]. Ключевые мероприятия по снижению выбросов метана приведены в таблице 1.

Большое количество государственных инициатив по снижению выбросов метана и его полезного использования показывает заинтересованность Китая в снижении объемов антропогенных выбросов парниковых газов энергетического сектора и реализации климатической повестки с достижением углеродной нейтральности.

В России метан является загрязняющим веществом, за выбросы которого предусмотрена плата в соответствии с законодательством. Для ведения производственной деятельности предприятиям необходимо ежегодно получать в установ-



Риски выхода метана
Источник: kazpravda.kz

закрыто или заброшено в ближайшие десятилетия из-за стремления к углеродной нейтральности.

Действия России и Китая по снижению выбросов парниковых газов (метана)

Согласно расчетам независимого энергетического аналитического центра Ember (Великобритания), который ведет работу по сбору, обработке и анализу данных о мировом энергетическом секторе и его влиянии на климат, выбросы парниковых газов Китая, России, Индонезии и Индии составляют 76% всех мировых выбросов

¹⁴ Ember. Coal Mine Methane. 2023. – URL: <https://ember-climate.org/topics/coal-mine-methane/> (дата обращения: 10.07.2023).

Год начала реализации инициативы	Государственный орган	Событие	Содержание
2014	Государственный совет	Стратегический план действий по развитию энергетики (2014–2020 гг.)	Разработка месторождений сланцевого газа метана из угольных пластов. Реализация крупных научно-технических проектов по освоению крупных месторождений нефти, газа и метана угольных пластов
2014	Национальная комиссия по развитию и реформам	Методы учета выбросов парниковых газов и руководство по отчетности для китайских угледобывающих предприятий (пилотная версия)	Формирование учета выбросов парниковых газов предприятиями угольной отрасли и мер по снижению и контролю за выбросами парниковых газов
2016	Национальная комиссия по развитию и реформам	Тринадцатый пятилетний план	Ускорение разработки месторождений и использования метана угольных пластов, имеющего большое значение для обеспечения безопасного производства угольных шахт, увеличения поставок чистой энергии и сокращения выбросов парниковых газов
2019	Национальная комиссия по развитию и реформам	Каталог руководств по корректировке промышленной структуры (издание 2019 г.)	Поощрение разведки, разработки месторождений, использования и добычи метана угольных пластов
2020	Национальная комиссия по развитию и реформам	Уведомление о дальнейшем усилении управления воздействием на окружающую среду при освоении угольных ресурсов	Дренажный газ с объемной концентрацией метана более или равной 8% следует утилизировать комплексно из соображений обеспечения безопасности. Стимулировать разведку и освоение комплексной утилизации дегазационных и отходящих газов с объемной концентрацией метана от 2% (включительно) до 8%
2021	Четвертая сессия Всекитайского собрания народных представителей тринадцатого созыва	Четырнадцатый пятилетний план национального экономического и социального развития Китайской Народной Республики и наброски долгосрочных целей на период до 2035 г.	Реализовать установленный на национальном уровне вклад в изменение климата до 2030 г. и усилить контроль над метаном, гидрофторуглеродами, перфторуглеродами и другими парниковыми газами
2021	Главное управление Госсовета	Мнения по усилению реформы системы компенсации за охрану окружающей среды	Включить добровольные проекты по сокращению выбросов парниковых газов в области лесного хозяйства, возобновляемых источников энергии и утилизации метана с экологическими и социальными преимуществами в национальный рынок торговли квотами на выбросы углерода
2021	Государственный совет	План действий по углеродному пику до 2030 г.	Ускорить крупномасштабную разработку нетрадиционных ресурсов нефти и газа, таких как сланцевый газ, метан угольных пластов и нефть (газ) из плотных пород
2021	Государственный совет	Мнения об углубленной борьбе за предотвращение и контроль загрязнения	Реализовать национально определенный вклад в изменение климата до 2030 г. и усилить контроль за выбросами метана и других парниковых газов, не связанных с двуокисью углерода

Таблица 1. Ключевые мероприятия Китая по снижению выбросов метана

Источник: [20]

ленном порядке разрешительную природоохранную документацию, в том числе проекты предельно-допустимых выбросов (ПДВ), в которых фиксируется допустимый объем выбросов загрязняющих веществ (далее ЗВ). При превышении допустимого объема выбросов предприятиями предусматривается плата с применением повышающего коэффициента [21].

Снижение выбросов метана и контроль за их выбросами является одним из перспективных направлений для угледобывающих компаний в России. На сегодняшний день реализовано несколько проектов с применением технологий снижения выбросов метана в России в угольной отрасли, информация о проектах представлена в таблице 2.

Шахта / Компания	Начало проекта, год	Информация о проекте
Красногорская / Прокопьевскуголь	2009	Проект утилизации шахтного метана в блочно-модульной котельной. Передача энергии на нужды теплоснабжения: отопление, горячее водоснабжение и технологические нужды. Шахта закрыта в 2017 г.
Кирова / СУЭК Кузбасс	2009	Проект утилизации шахтного метана в газогенераторной станции для обеспечения электроэнергией потребителей
Комсомолец / СУЭК Кузбасс	2012	Проекты по утилизации шахтного метана факельными установками и в газогенераторной станции для обеспечения электроэнергией потребителей
Северная / Воркутауголь	2013	Проект утилизации шахтного метана в генераторных станциях для обеспечения электроэнергией потребителей
Алардинская, Ерунаковская / Распадская угольная компания	2021	Проекты утилизации шахтного метана факельными установками

Таблица 2. Проекты по утилизации метана в угольной отрасли в России

Источник: составлено автором

Опыт реализации проектов снижения выбросов метана угледобывающими предприятиями России до введения углеродного регулирования показывает заинтересованность в снижении его выбросов. Точечное внедрение технологий снижения выбросов метана за счет утилизации на факеле, выработки тепло- и электроэнергии создают условия для масштабирования проектов по всей стране и снижения будущих рисков при введении углеродного регулирования. Основными сложностями являются большие капитальные затраты на проекты и отсутствие государственного субсидирования.

Технологии снижения выбросов метана

В настоящее время в мире реализовано и запланировано к реализации более 300 проектов по утилизации шахтного метана различными технологиями¹⁵. Распределение проектов по утилизации метана представлено на рис. 1.

В мире наибольшее распространение получили проекты когенерации тепло-

¹⁵ International Coal Mine Methane Projects Database. Global Methane Initiative (GMI). 2021. – URL: <https://www.globalmethane.org/resources/> (дата обращения: 10.06.2023).

Рис. 1. Проекты по утилизации шахтного метана



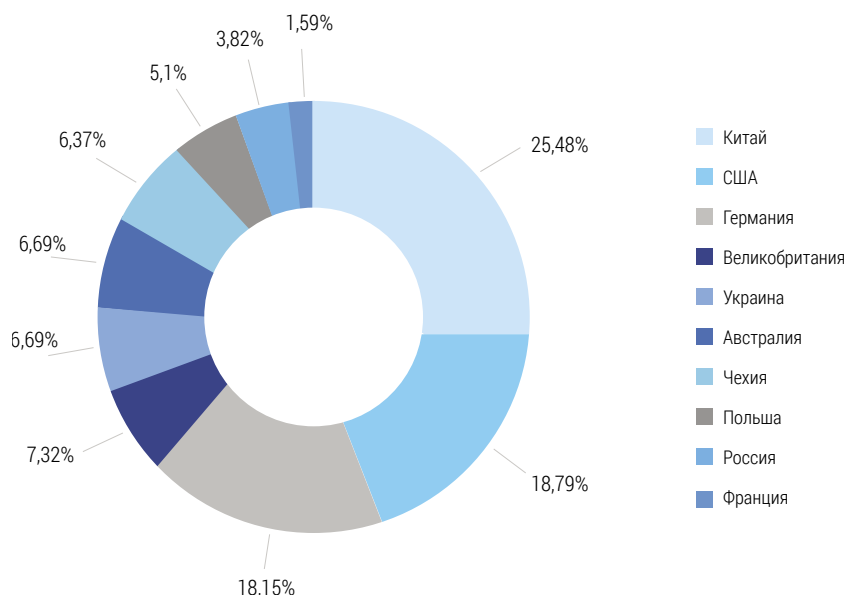


Рис. 2. Распределение проектов утилизации метана по странам

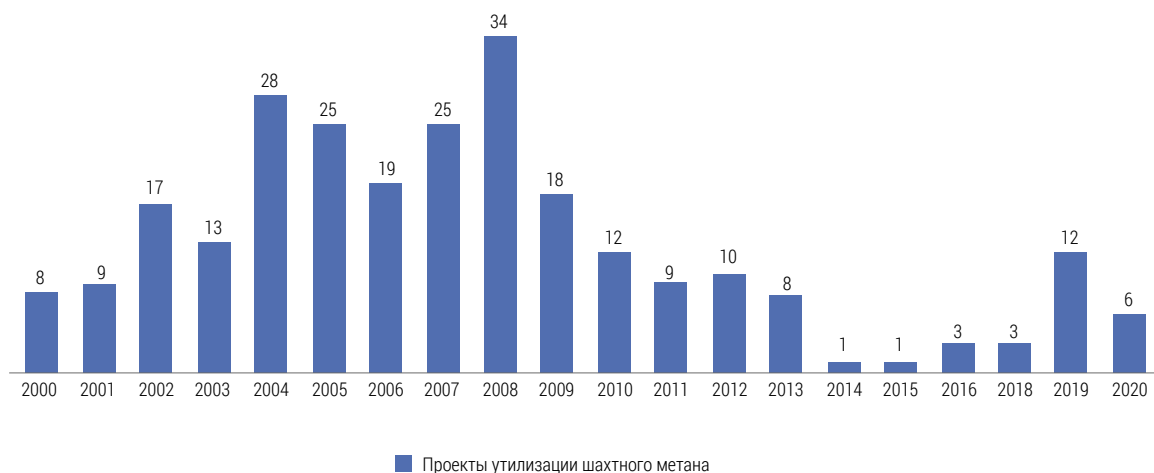
и электроэнергии (101 проект), генерации электроэнергии (70 проектов), сжигания метана на факельных установках (39 проектов), подачи газа в трубопровод (37 проектов), выработки тепла (31 проект) и проекты регенеративного термического окисления метана (21 проект).

Наибольшая часть реализованных и запланированных к реализации проектов приходится на Китай (80 проектов), США (59 проектов) и Германию (57 проектов). Распределение проектов по странам представлено на рис. 2.

Наибольшее количество проектов снижения выбросов парниковых газов реализовано в Китае за счет принятых в стране мер по снижению выбросов метана от топливно-энергетической отрасли, включая меры поддержки и регулирования. Самое большое количество проектов утилизации шахтного метана реализовано с 2003 по 2008 гг. – 179 проектов. Распределение проектов по годам показано на рис. 3.

Как видно из рисунка, по 2008 г. наблюдался интенсивный прирост количества

Рис. 3. Распределение проектов утилизации метана по годам



проектов, а после 2008 г. – интенсивный спад, инвестиции в подобные проекты возобновились в 2015 г., однако их рост был остановлен мировым финансовым кризисом, который привел к резкому падению цен на нефть, колебанию курса валют, нестабильной геополитической обстановки в мире.

Далее представлены распространенные технологии снижения выбросов метана. Описание технологий, капитальные затраты, средний срок эксплуатации и эффективность работы установок приняты на основании анализа информации Global Methane Initiative, IEA, сайтов компаний-производителей оборудования утилизации метана и других открытых источников сети интернет. Ежегодные затраты на эксплуатацию и обслуживание, приняты в размере 15% от капитальных затрат.

1. Генерация электроэнергии. Технология применима к выбросам метана с концентрацией не менее 25%. Газ утилизируется посредством газопоршневых установок, позволяющих использовать метановоздушную смесь, откачиваемую на поверхность средствами дегазации. Наибольшее распространение проектов приходится на Китай (31 проект), Великобританию (19 проектов), Австралию (8 проектов). Установленная мощность всех реализованных проектов генерации электроэнергии оставляет 690 МВт. Капитальные затраты на внедрение технологии в России составляют 80 млн руб., ежегодные затраты на эксплуатацию и обслуживание установки – 12 млн руб./год. Гарантийный период эксплуатации установки 15 лет.

2. Выработка тепла. Технология применима к выбросам метана с концентрацией не менее 30%. Выработка тепла за счет утилизации метана возможна после модернизации уже эксплуатирующегося котельного оборудования.

В работе «Переработка дегазационного метана в энергетических установках на угледобывающих предприятиях» описан опыт переработки дегазационного метана в блочно-модульной котельной и теплоэлектростанции на шахтах Кузбасса для выработки тепловой энергии. Отмечено, что применение энергетических установок на угледобывающих предприятиях способствует улучшению экономических показателей за счет выработки дополнительной тепло- и электроэнергии, уменьшения потребления угля на собственные нужды,



Добыча угля в Южной Африке

Источник: jornaleagora.pt

снижения платы за выбросы метана [22]. В работе приведены экономические показатели реализованных проектов.

Наибольшее распространение получили проекты, реализованные в России (8 проектов) и Польше (8 проектов). Проектами, реализованными в России достигнута выработка 9,7 МВт тепловой энергии. Капитальные затраты на внедрение технологии составляют 21,8 млн руб., ежегодные затраты на эксплуатацию и обслуживание установки – 3,27 млн руб./год. Гарантийный период эксплуатации установки – 20 лет.

3. Комбинированная генерация тепло- и электроэнергии. Технология применима к выбросам метана с концентрацией более 25%. Когенерационные установки позволяют утилизировать высокоцентрированную метановоздушную смесь (далее МВС), откачиваемую на поверхность средствами дегазации. Генерация электроэнергии и тепла производится газопоршневой установкой. Наибольшее распространение технология получила в Германии, где с 2001 по 2011 гг. реализовано 54 проекта установленной мощностью около 206 МВт. Меньшее количество проектов у Чехии (19 проектов) и Китая (12 проектов), с генерацией 23 МВт и 106 МВт соответственно. Капитальные затраты на внедрение технологии составляют 120 млн руб., ежегодные затраты на эксплуатацию и обслуживание установки – 18 млн руб./год. Гарантийный период эксплуатации установки – 15 лет.





4. Регенеративное термическое окисление МВС. Технология регенеративного термического окисления (РТО) метана в метановоздушной струе применима к выбросам с концентрацией метана от 0,3 до 1,2%. Технология менее распространена в мире за счет высоких капитальных затрат и низкого КПД проектов. Вентиляционные выбросы с низким содержанием метана подаются непосредственно в систему окисления РТО, далее происходит беспламенное окисление в неподвижном слое катализатора, с выделением тепла химической реакции. Полученное тепло возможно использовать для генерации электроэнергии и выработки тепла при установке дополнительного оборудования.

Опыт эксплуатации установок РТО описывает канадский производитель установок Biothermica¹⁶, который в 2009 г. внедрил свою первую установку на угольной шахте № 4 Walter Energy в Бруквуде, штат Алабама, США. За четыре года эксплуатации установка снизила объем выбросов шахты на 80,7 тыс. т CO₂ -экв. В 2013 г. было принято решение о приостановке проекта из-за снижения концентрации метана.

Еще один проект РТО реализован в Китае компанией Anguil¹⁷. Крупная угледобывающая компания в провинции Шаньси,

¹⁶ Biothermica. – URL: <https://www.biothermica.com/content/first-vamox-project> (дата обращения: 22.08.2023).

¹⁷ Anguil. – URL: <https://anguil.com/case-studies/vam-oxidization-project-in-shanxi-china/> (дата обращения: 10.06.2023).

Угольная шахта Тай-тона в ЮАР
Источник: s-ova.ru



В мире наибольшее распространение получили проекты когенерации тепло- и электроэнергии (101 проект), генерации электроэнергии (70 проектов), сжигания метана на факельных установках (39 проектов)

Китай, внедрила технологию РТО. Все избыточное тепло, выделяющееся в процессе окисления, направляется от перепускных заслонок горячего газа в котельную систему для выработки достаточного количества пара, который подается в паровую турбину для получения электроэнергии. В отличие от традиционных методов выработки электроэнергии путем сжигания угля или газа, использование избыточного тепла от РТО не приводит к образованию оксида азота и может поддерживать стабильную температуру потока горячего воздуха, что очень важно для последующего производства электроэнергии. Пара достаточно для обогрева здания зимой и охлаждения воздуха в шахте летом. Реализованный проект состоит из шести модулей с объемом утилизируемой МВС 540000 Нм³/ч, при средней концентрации метана 1,2%. Установка генерирует 15 МВт электроэнергии, которую возвращает в сеть общего пользования. Эффективность утилизации метана 99,5%.

Наибольшее распространение проекты РТО получили в Китае (14 проектов), Австралии (3 проекта), США (2 проекта). Капитальные затраты на внедрение технологии составляют 150 млн руб., ежегодные затраты на эксплуатацию и обслуживание установки – 22,5 млн руб./год. Гарантийный период эксплуатации установки – 20 лет.

5. Утилизация метана факельными установками. Данная технология относится к наиболее простым в исполнении технологиям снижения выбросов парниковых газов. К недостаткам технологии в работе «Направления утилизации шахтного метана» научные сотрудники Кузбасских институтов относят отсутствие полезного использования метана [23]. В качестве примера применения технологии приводит-

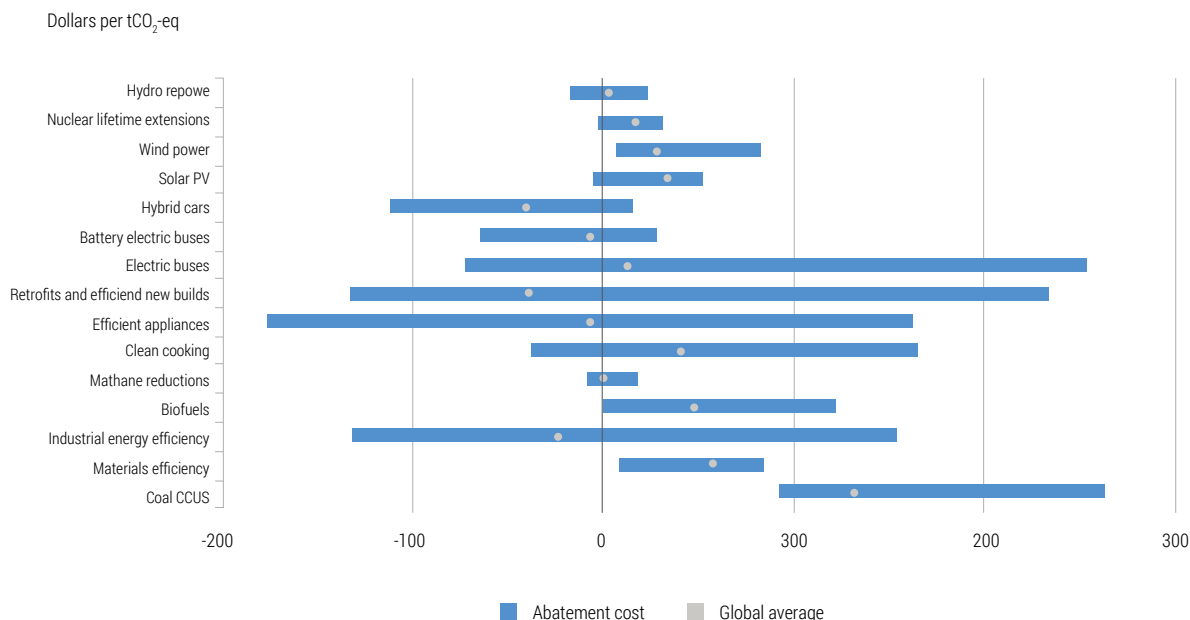


Рис. 4. Диаграмма затрат на борьбу с выбросами парниковых газов (МЭА)

ся факельная установка КГУУ-8 на шахте «Комсомолец», предназначенная для снижения выбросов метана путем деструкции метановоздушной смеси в камере сгорания при температура 1000–1200 °С.

Технология применима к выбросам метана с концентрацией не менее 25%, установки позволяют утилизировать метановоздушную смесь, откачиваемую на поверхность средствами дегазации. Технология наиболее распространена в США (20 проектов) и Австралии (8 проектов). Ключевым недостатком технологии является отсутствие полезного использования метана для нужд предприятия. Капитальные затраты на внедрение технологии составляют 50 млн руб., ежегодные затраты на эксплуатацию и обслуживание установ-

ки 7,5 млн руб./год. Гарантийный период эксплуатации установки 15 лет.

Для принятия решений по реализации проектов, связанных со снижением выбросов парниковых газов, используют показатель оценки затрат на снижение выбросов парниковых газов – Abatement costs. Описание показателя и руководство к применению опубликовано рядом авторитетных изданий.

Международным энергетическим агентством (МЭА) в докладе Sustainable Recovery приведены затраты на борьбу с выбросами парниковых газов¹⁸. В работе обозначено, что затраты на борьбу с выбросами парниковых газов демонстрируют эффективность технологий, связанных с сокращением выбросов парниковых газов (ПГ). Abatement costs зависит от затрат на внедрение технологии и ее эксплуатации в течение всего срока службы и снижения выбросов парниковых газов в этом периоде. Диаграмма затрат на борьбу с выбросами парниковых газов представлена на рис. 4. Затраты с положительным значением на борьбу с выбросами означают, что технология потребует финансовых затрат на сокращение выбросов, в то время как затраты

Точечное внедрение технологий снижения выбросов метана за счет утилизации на факеле, выработки тепло- и электроэнергии создают условия для масштабирования проектов по всей стране

¹⁸ IEA, GHG abatement costs for selected measures of the Sustainable Recovery Plan, IEA, Paris. – URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/ghg-abatement-costs-for-selected-measures-of-the-sustainable-recovery-plan>, IEA. Licence: CC BY 4.0 (дата обращения: 8.09.2023).

с отрицательным значением на борьбу с выбросами ПГ приведут к сокращению выбросов при одновременной экономии средств.

Из диаграммы следует, что технологии повышения энергоэффективности, выпуск гибридных автомобилей и электромобилей позволяют снизить выбросы ПГ при одновременной экономии средств бюджета предприятия – пользователя автомобилей. Технологии производства биотоплива, улавливания и хранения углерода в настоящее время несут только затраты для компаний.

В работе исследователей из Йеля и Гарварда рассматриваются затраты на различные технологии и действия, направленные на сокращение выбросов парниковых газов [24]. В своей работе они приводят кривую затрат на снижение выбросов парниковых газов и получения выгод от реализации проектов по снижению выбросов ПГ, разработанную McKinsey. Кривая затрат представлена на рис. 5. По вертикали – затраты, по горизонтали – снижение выбросов парниковых газов в год.

Предлагаемый методический подход к оценке проектов для перспективного использования в угольной отрасли России

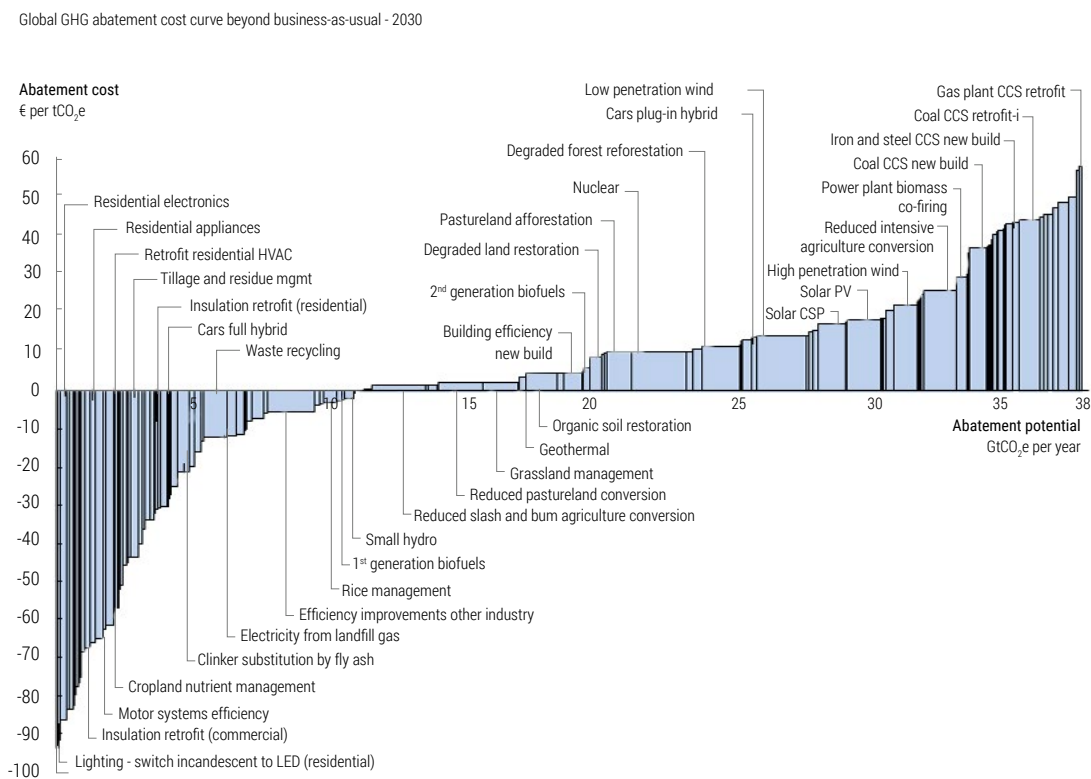
Для выполнения работы автором применен метод сравнительного анализа технологий снижения выбросов ПГ (метана) в угольной отрасли. Максимальная оценка, определяющая наилучшее значение показателя критерия, – 2; среднее значение – 1; худшее значение – 0.

Сравнение проектов осуществлялось по следующим критериям:

1. Затраты на снижение выбросов парниковых газов на одну тонну.

Затраты на снижение выбросов парниковых газов на одну тонну предлагается оценивать на основе показателя оценки затрат на снижение выбросов парниковых газов – Abatement costs. Стоимость снижения тонны выбросов парниковых газов

Рис. 5. Кривая затрат на предотвращение выбросов парниковых газов



для оцениваемой технологии – это отношение совокупности затрат (капитальных и операционных) на реализацию и эксплуатацию проекта по снижению выбросов парниковых газов к объему снижения выбросов парниковых газов за весь период эксплуатации. Затраты на снижение выбросов парниковых газов на одну тонну определяются по формуле:

$$З_{\text{пг}} = \frac{З_{\text{к}} + З_{\text{о}} \cdot T}{\Delta q \cdot T}$$

где:
З_{пг} – затраты на снижение выбросов парниковых газов на одну тонну, руб.;
З_к – капитальные затраты на установку, руб.;
З_о – затраты на эксплуатацию и обслуживание установки, руб./год;
T – гарантийный период эксплуатации установки, год;
Δq – снижение выбросов парниковых газов установкой, т/год.

2. Распространенность.

Количество реализованных проектов в мире. Этот критерий позволяет определить наиболее популярную технологию снижения выбросов парниковых газов, применяемую в мире.

3. Универсальность.

Отсутствие дополнительных внешних факторов (географических, ресурсных, инфраструктурных и т. д.), необходимых для эффективного функционирования технологии.

4. Технологическая эффективность.

Технология, достигающая наибольшего сокращения выбросов парниковых газов.

Предварительная оценка технологий снижения выбросов парниковых газов

Оценка технологий снижения выбросов парниковых газов (метана) на угольных шахтах приведена в таблице 3.

Таблица 3. Предварительная оценка технологий снижения выбросов парниковых газов (метана) в угольной отрасли в мире

№ п/п	Технологии	Критерии			
		Затраты на снижение выбросов ПГ, руб.	Распространенность	Универсальность	Технологическая эффективность, тыс. /год CH ₄
1	Генерация электроэнергии	4333	70 проектов	Установки способны утилизировать метановоздушную смесь с концентрацией метана более 25%. Необходимы дополнительные коммуникации для передачи электроэнергии потребителю	4
2	Выработка тепла	291	31 проект	Для внедрения технологии достаточно модернизировать существующее котельное оборудование, а также построить дополнительные коммуникации для передачи тепла потребителю. Технология применима преимущественно в районах с холодным климатом	15
3	Комбинированная генерация тепло-и электроэнергии	4333	101 проект	Для эффективной работы установок выработки тепла и электроэнергии необходима концентрация метана более 25%, дополнительные коммуникации для передачи тепла и электроэнергии потребителю	6
4	Утилизация метана на факельных установках	2708	39 проектов	Установки способны утилизировать метан с концентрацией не менее 25%	4
5	Регенеративное термическое окисление МВС	6000	21 проект	Установки способны утилизировать МВС с концентрацией от 0,3 до 1,2%	1

№ п/п	Виды технологий	Критерии			
		Затраты на снижение выбросов ПГ	Распространенность	Универсальность	Технологическая эффективность
1	Генерация электроэнергии	1	1	2	1
2	Выработка тепла	2	1	1	2
3	Комбинированная генерация тепло- и электроэнергии	1	2	1	1
4	Утилизация метана на факельных установках	1	1	1	1
5	Регенеративное термическое окисление МВС	0	0	0	0

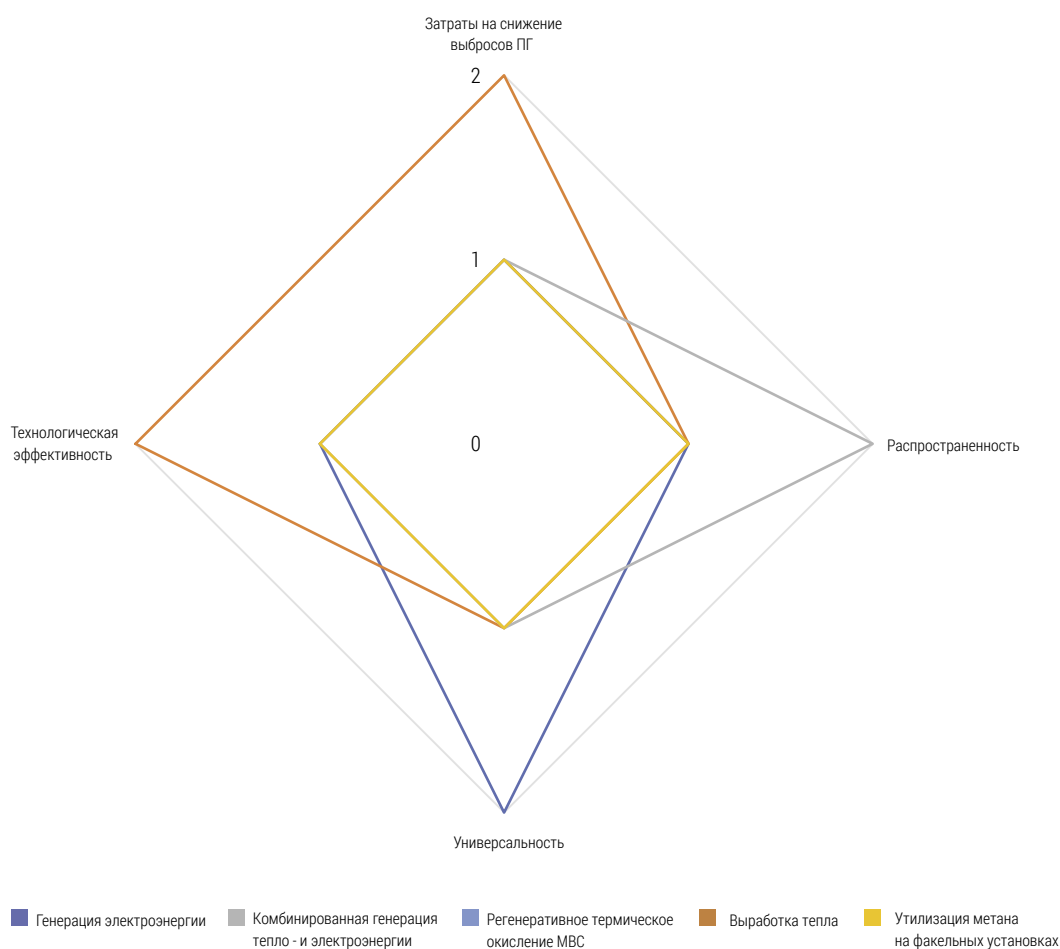
Таблица 4. Сравнение значений критериев оценки технологий

Предварительная оценка технологий снижения выбросов метана на угольных шахтах дает необходимое представление о возможности использования ее в угольной отрасли России с учетом распространенности, затрат на снижение выбросов парниковых газов, универсальности и экологического эффекта в виде снижения выбросов парниковых газов.

Сравнение значений критериев оценки технологий снижения выбросов парниковых газов (метана) в угольной отрасли автором приведено в таблице 4.

Далее для визуализации и интерпретации данных таблицы сравнения значений критериев оценки технологий снижения выбросов метана в угольной отрасли использован график типа «Лепестковая диа-»

Рис. 6. Визуализация предварительной оценки технологий снижения выбросов парниковых газов (метана)



Снижение выбросов метана и контроль за их выбросами является одним из перспективных направлений для угледобывающих компаний в России. На сегодняшний день уже реализовано несколько проектов

аграмма». Обычная лепестковая диаграмма – аналог графика в полярной системе координат [25]. В лепестковой диаграмме отдельная ось определена для каждой категории. Оси направлены наружу от центра диаграммы. Значение каждой точки данных отмечается на соответствующей оси. Диаграмма отображает значения относительно центральной точки с маркерами для отдельных точек данных или без них. Визуализация предварительной оценки технологий снижения выбросов парниковых газов (метана) в угольной отрасли представлена на рис. 6.

Наиболее релевантные технологии: выработка тепла с максимальными оценками

критериев снижения затрат на выбросы парниковых газов и технологической эффективности; комбинированная генерация тепло- и электроэнергии с максимальной оценкой распространенности; генерация электроэнергии с максимальной оценкой универсальности. Дополнительным плюсом от реализации этих технологий станет получение тепла и электроэнергии для нужд предприятия. Наименее привлекательным вариантом снижения выбросов парниковых газов является сокращение выбросов метана за счет применения технологии регенеративного термического окисления с наибольшими затратами на снижение выбросов ПГ, наименьшей распространенностью, универсальностью и низкой технологической эффективностью.

Заключение

Снижение выбросов метана на угольных шахтах является одной из действенных мер по сокращению общих выбросов парниковых газов, большое скопление которых в атмосфере Земли вызывает климатические изменения. Китай, являясь страной с наибольшими выбросами парниковых газов, уже реализовывает ряд мероприятий для

Использованные источники

1. Уткаев Е.А. Цифровая платформа оценки выбросов парниковых газов при угледобыче // Вестник НЦ Востнии. 2022. №4. С. 63–70. DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.62.10.007
2. Carol J Bibler, James S Marshall, Raymond C Pilcher. Status of worldwide coal mine methane emissions and use // *International Journal of Coal Geology*. Volume 35. Issues 1–4. 1998. p. 283–310. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(97\)00038-4](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(97)00038-4).
3. Пармузин П.Н. Зарубежный и отечественный опыт освоения ресурсов метана угольных пластов. Ухта: Изд-во УГТУ, 2017. – 109 с.
4. 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*. Volume 256. 2020. 120489. ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120489>
5. Karacan C.O., Ruiz F.A., Coté M., Phipps S. Coal mine methane: a review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction // *Int. J. Coal Geol.* 86 (2011). pp. 121–156.
6. Yuan-Ping Cheng, Lei Wang, Xiao-Lei Zhang. Environmental impact of coal mine methane emissions and responding strategies in China // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. Volume 5. Issue 1. 2011. p. 157–166. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2010.07.007>.
7. Арзыкулова А.Е. Экономическая целесообразность промышленной добычи метана Карагандинского угольного бассейна // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. С. 381–384.
8. Пучков Л.А. Концептуальные подходы к обеспечению метанобезопасности угольных шахт России и СНГ на 2007-2010 гг. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2007. С. 9–36.
9. Romeo M. Flores. Coalbed methane: From hazard to resource // *International Journal of Coal Geology*. Volume 35. Issues 1–4. 1998. p. 3–26. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(97\)00043-8](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(97)00043-8).
10. Fubao Zhou. Tongqiang Xia. Recent developments in coal mine methane extraction and utilization in China: A review // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. Volume 31. 2016. p. 437–458. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.03.027>.
11. Jun Dong. Yuan-Ping Cheng. Coal mine methane control cost and full cost: The case of the Luling Coal Mine, Huaibei coalfield, China. // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. Volume 26. 2015. p. 290–302. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.05.040>.
12. Smirnova A. Varnavskiy K. Nepsha F. Kostomarov R. Chen S. The Development of Coal Mine Methane Utilization Infrastructure within the Framework of the Concept «Coal-Energy-Information» // *Energies* 2022. 15. 8948. <https://doi.org/10.3390/en15238948>
13. Xinxin Wang. Fubao Zhou. Yihan Ling. Yaning Xiao. Overview and Outlook on Utilization Technologies of Low-Concentration

снижения выбросов метана в топливно-энергетическом секторе. Эти меры направлены на регулирование выбросов метана и государственную поддержку реализации проектов по снижению выбросов парниковых газов. Наибольшее число реализуемых проектов по снижению выбросов метана приходится на Китай. В свою очередь для России реализация проектов по снижению выбросов метана – одно из перспективных направлений для угледобывающих компаний. Для снижения выбросов метана в мире реализуются и планируются к реализации проекты, с применением различных технологий, среди которых наиболее популярными являются: генерация электроэнергии, выработка тепла, комбинированная генерация тепло- и электроэнергии, утилизация метана на факельных установках, регенеративное термическое окисление МВС.

Для принятия решений по реализации проектов в общемировой практике используется показатель оценки затрат на снижение выбросов парниковых газов – Abatement costs, который раскрывает только экономическую составляющую проектов. Для принятия решений по перспективному использованию в угольной отрасли России технологий снижения выбросов метана

предложен методический подход к оценке проектов, основанный на сравнительном анализе. Методический подход предусматривает использование четырех критериев оценки: затраты на снижение выбросов парниковых газов, распространенность, универсальность, технологическая эффективность, с использованием вышеописанного методического подхода.

Сделаны выводы о наиболее релевантных технологиях снижения выбросов метана для угледобывающих предприятий, таких как: выработка тепла, когенерации тепло- и электроэнергии, выработка электроэнергии. Названные технологии имеют наибольший технологический эффект, наименьшие затраты на снижение выбросов парниковых газов и наиболее универсальны по сравнению с другими рассматриваемыми технологиями. Еще одним аргументом в пользу реализации технологий снижения выбросов метана – выработка тепло- и электроэнергии для нужд предприятия. Менее привлекательная технология снижения выбросов метана – снижение эмиссии за счет применения технологии регенеративного термического окисления с самыми низкими оценками критериев, среди рассматриваемых технологий.

- Coal Mine Methane // Energy Fuels* 2021. 35. 19. p. 15398–15423. 2021. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02312>
14. Uddin Noim. Blommerde Mascha. Sustainable development outcomes of coal mine methane clean development mechanism Projects in China // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 45. p. 1–9. 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.01.053
 15. Чжан Яньцзе, Колесник Ю.И. Современные технологии добычи метана в Китае из угольных пластов: тенденции и перспективы развития // *Baikal Research Journal*. 2022. Т. 13. № 2. DOI 10.17150/2411-6262.2022.13(2).20
 16. Karacan C Ozgen. Ruiz Felicia A. Coal mine methane: A review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction // *International Journal of Coal Geology*. 86. 2-3. 2011 p. 121–156. DOI: 10.1016/j.coal.2011.02.009
 17. Su S. Agnew J. Catalytic combustion of coal mine ventilation air methane // *Fuel*. 85. 9. 2006. p. 1201–1210. DOI: 10.1016/j.fuel.2005.11.010
 18. Junlian Gao. Decreasing methane emissions from China's coal mining with rebounded coal production // *Environmental Research Letters*, Volume 16, Number 12. 2021. DOI 10.1088/1748-9326/ac38d8
 19. Coalbed Methane/Mine Gas Emissions Standard of the People's Republic of China (preliminary). 2008. URL: https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhbh/dqgdwrywrfbz/200804/t20080414_121137.htm
 20. Zhang Bo, Li Hinju. Control situation, Problems and Countermeasures China: Decimal point // *Chinese Mining Journal*. 2022. Т. 31, №2. p. 10. DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.2022.02.026
 21. Нагайцев И.А., Петрова Т.В. Влияние изменений в производственном экологическом контроле на нормативную базу эколого-экономических расчетов // *Лесотехнический журнал*. №3 (62). 2023.
 22. Тайлаков О.В., Застрелов Д.Н. Переработка дегазационного метана в энергетических установках на угледобывающих предприятиях // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013. С. 170–176. URL: <http://www.gornaya-kniga.ru/periodic/1730>
 23. Тайлаков О.В., Застрелов Д.Н., Уткаев Е.А. Направления утилизации шахтного метана // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2015. № 6(112). С. 62–67.
 24. Gillingham, Kenneth and James Stock. The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions // *Journal of Economic Perspectives*. 2018. 32(5). p. 1–20. URL: https://resources.environment.yale.edu/gillingham/GillinghamStock_Cost_080919_posted.pdf
 25. Берман Н. Д. Визуализация данных в MS Excel 2010: учеб. пособие // Хабаровск. Издательство Тихоокеанского Государственного университета, 2014. – 72 с.