

ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД,
РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА
GEOMECHANICS, DESTRUCTION OF ROCKS BY EXPLOSION,
MINE AEROGASDYNAMICS AND MINING THERMOPHYSICS

Научная статья

УДК 551.583, 662.764, 504.054

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-68-75

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ
МЕТАНА НА ДЕЙСТВУЮЩИХ УГЛЕДОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Уткаев Евгений Александрович, Снетова Екатерина Сергеевна,
Соколов Сергей Владиславович, Черкасов Александр Васильевич

Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН

*для корреспонденции: utkaev@mail.ru



Информация о статье

Поступила:

08 августа 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 ноября 2024 г.

Принята к публикации:

02 декабря 2024 г.

Опубликована:

05 декабря 2024 г.

Ключевые слова:

фугитивные выбросы,
парниковые газы, цифровая
платформа, мониторинг,
инвентаризация выбросов,
шахтный метан, углекислый
газ, утилизация шахтного
метана.

Аннотация.

При реализации перехода к экономике устойчивого низкоуглеродного развития в Российской Федерации и мире важна корректность количественной оценки выбросов парниковых газов. В связи с этим разработка специализированного программного обеспечения, позволяющего осуществлять расчеты эмиссий на уровне отдельных промышленных предприятий, приобретает особую актуальность. Современная угольная промышленность характеризуется наличием готовых к внедрению технологий утилизации и деструкции газа, выделяемого дегазационными и вентиляционными системами действующих шахт. Соответственно, внедрение цифровых технологий для оценки выбросов метана на действующих угледобывающих предприятиях в перспективе позволит обеспечить не только учет, но и сокращение эмиссий метана, а также использование его энергетического потенциала. В статье приведен краткий анализ проблематики изменения климата в международном масштабе и в условиях Российской Федерации. Рассматриваются основные действующие в РФ законы, направленные на регулирование отношений в сфере хозяйственной и иной деятельности, которая сопровождается выбросами парниковых газов. Обсуждаются вопросы эмиссии и утилизации метановоздушной смеси на угольных шахтах Кузбасса. Рассматриваются примеры успешного опыта использования газа, извлекаемого шахтами в качестве топлива на энергетических установках. Приводятся расчеты фугитивных выбросов метана и углекислого газа при добыче угля подземным способом, а также с учетом утилизированного метана на отдельном угольном предприятии. Представлено программное обеспечение, предназначенное для автоматизации учета эмиссии парниковых газов на угледобывающих предприятиях на основе расчетов фугитивных выбросов метана и углекислого газа при добыче угля подземным и открытым способами, а также при выполнении операций последующего обращения с углем, добытого подземным способом.

Для цитирования: Уткаев Е.А., Снетова Е.С., Соколов С.В., Черкасов А.В. Применение цифровых технологий для оценки выбросов метана на действующих угледобывающих предприятиях // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 6 (166). С. 68-75. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-68-75, EDN: VLGTF0

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. №1144-р (Соглашение № 075-15-2022-1196)

Введение

В настоящее время актуальным направлением в мире и в России является переход к экономике устойчивого низкоуглеродного развития. Для поддержания концентраций парниковых газов в атмосфере на уровне, ограничивающем опасное антропогенное воздействие на климатическую систему, Рамочной конвенцией Организации Объединенных наций об изменении климата (РКИК ООН) в 1997 г. был принят Киотский протокол, который обязывал страны, ратифицировавшие этот протокол, обеспечить снижение выбросов парниковых газов в 2008-2012 гг. на 5,2 % по сравнению с уровнем 1990 г. В 2015 г. в Париже на 21-й конференции сторон РКИК ООН было одобрено новое всеобъемлющее соглашение на период после 2020 г., определяющее рамки международного взаимодействия по климатической проблематике на длительную перспективу с целью удержать рост глобальной средней температуры в пределах 1,5–2°C по отношению к соответствующему показателю доиндустриальной эпохи. Вводимые международными соглашениями по климату положения предопределяют необходимость Сторон соглашений, в том числе России, исполнения обязательств, для выполнения которых требуется формирование соответствующей нормативной правовой базы, эффективных национальных механизмов, в том числе и правовых [1].

Основным документом, регулирующим выбросы парниковых газов в Российской Федерации, является Федеральный закон № 296 «Об ограничении выбросов парниковых газов», вступивший в силу 30.12.2021 г. Концепция документа соответствует Указу Президента «О сокращении выбросов парниковых газов», который требует обеспечить к 2030 г. сокращение выбросов парниковых газов до 70% относительно уровня 1990 г. с учетом максимально возможной поглощающей способности лесов и иных экосистем. В соответствии с Указом Правительству поручено разработать Стратегию долгосрочного развития РФ до 2050 г. с низким уровнем выбросов парниковых газов. Закон «Об ограничении выбросов парниковых газов» определяет основы правового регулирования отношений в сфере хозяйственной и иной деятельности, которая

сопровождается выбросами парниковых газов, предусматривает ведение государственного учета выбросов парниковых газов и создание соответствующего реестра, а также вводит обязанность «регулируемых организаций» представлять ежегодные отчеты о выбросах парниковых газов.

В целях реализации п. 2 ч. 2 ст. 5 Федерального закона Приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 27.05.2022 г. № 371 утверждена Методика количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов, которая устанавливает порядок количественного определения объемов выбросов парниковых газов [2].

Согласно закону, юридические лица и индивидуальные предприниматели вправе реализовывать климатические проекты, направленные на сокращение выбросов парниковых газов или увеличение их поглощения. Сведения о климатических проектах включаются в реестр углеродных единиц. Для выпуска в обращение углеродных единиц результаты реализации климатических проектов подлежат верификации. Углеродные единицы, выпущенные в обращение в результате реализации климатического проекта, подлежат зачислению на счет исполнителя климатического проекта в реестре углеродных единиц. Впоследствии владелец сможет либо зачесть данные единицы, чтобы уменьшить свой углеродный след, либо передать их другому предприятию.

Добыча угля подземным способом сопровождается значительной эмиссией метана, который влияет на ускорение процессов изменения климата в большей степени, чем углекислый газ, с потенциалом глобального потепления, превышающим CO₂ в 25 раз [3]. Таким образом, количественный учет эмиссии углекислого газа и метана в угледобывающей промышленности [4-6] является актуальной задачей, для решения которой предлагается использовать цифровую платформу мониторинга фугитивных выбросов парниковых газов при угледобыче.

Методы

Основными направлениями снижения антропогенных выбросов этих газов являются модернизация оборудования нефтегазового

комплекса и угольной промышленности, использование альтернативных источников тепловой и электрической энергии, повышение мер безопасности на объектах хранения и транспортировки нефти и газа, обеспечивающих снижение утечек метана.

На сегодняшний день в России извлечение метана в основном осуществляется при разработке угольных месторождений подземным способом системами дегазации и вентиляции. Дегазация проводится на неразгруженных и разрабатываемых угольных пластах. Извлечение угольного метана из неразгруженных пластов осуществляется путем бурения вертикальных или наклонно-направленных скважин с поверхности. Через скважины откачивается газ с концентрацией метана 85-98% (ввиду отсутствия выработок подсоса воздуха не происходит) вакуум-насосными станциями, расположенными на дневной поверхности. При этом на выходе из скважины получают газ с высоким содержанием механических примесей и влажностью. На угольных шахтах РФ заблаговременная дегазация широкого применения не нашла, так как физические характеристики ископаемых углей (малопроницаемые) не позволяют эффективно применять данную технологию. Дегазация разрабатываемых пластов осуществляется бурением вертикальных и наклонных скважин с поверхности при проведении стволов и направленным бурением из забоев выработок или в пласт при проведении горных выработок по угольным пластам. Метановоздушная смесь по системе трубопроводов поступает на дневную поверхность. Согласно Инструкции по аэрологической безопасности угольных шахт метановоздушную смесь можно транспортировать при концентрации метана более 25%. Концентрация метана в метановоздушной смеси на выходе может изменяться в пределах 25-80% за счет подсоса воздуха из горных выработок. При этом использование дегазации разрабатываемых угольных пластов обусловлено тем, насколько экономически выгодно извлечение и утилизация метановоздушной смеси.

Основными технологиями в области утилизации метановоздушной смеси с концентрацией CH_4 более 25%, которая характерна для смеси, извлекаемой дегазационными системами шахт, являются:

- деструкция (факелы);
- выработка тепловой энергии (котельные);
- получение электрической энергии (газогенераторы, газотурбинные установки).

Наиболее простым в исполнении способом утилизации дегазационного метана при его концентрации более 25% является его сжигание

или деструкция в факельных установках (Рис. 1). Недостатком способа является то, что в процессе сокращения выбросов не осуществляется генерация тепловой и электрической энергии. На сегодняшний день в мире существует множество модификаций факельных установок для различных эксплуатационных условий. При этом на угольных шахтах Кузбасса данная технология нашла свое применение.



Рис. 1. Контейнерная газоприборная установка КГУУ

Fig. 1. Containerized gas recovery plant KGUV

Вместе с тем технологии для получения тепловой и электрической энергии также внедряются на угольных предприятиях и успешно используются в настоящее время. Так, тепло, вырабатываемое в котельных установках при сжигании шахтного метана, может быть использовано угледобывающими предприятиями для отопления помещений и снабжения горячей водой. При этом кондиционная метановоздушная смесь используется как самостоятельно, так и совместно с углем. Котельная установка позволяет обеспечить снижение вредных выбросов в атмосферу и получение тепла при нагревании сетевой воды. В котельную метановоздушная смесь с концентрацией метана более 30% поступает по надземному трубопроводу от скважин за счет работы дегазационных установок на базе водокольцевых или ротационных насосов. Котел и горелка оборудуются комплектами автоматики, обеспечивающей поддержание заданной температуры теплоносителя, контроль давления газа, тяги в газоходах и прекращение подачи газа при возникновении нештатных ситуаций,

например, при загазованности помещения (CH_4 и CO).

Когенерация энергии выполняется в контейнерных теплоэлектростанциях (КТЭС), в которых используются газопоршневые или газотурбинные установки. Контейнерная теплоэлектростанция включает в себя также системы подачи газа, управления, охлаждения, отвода отработанных газов, подачи масла и вентиляции. Полученная электрическая энергия используется для нужд предприятия, а ее избыток поступает в общую сеть электроснабжения (Рис. 2) [7, 8].

Альтернативным вариантом получения тепловой и электрической энергии является использование газовой турбины. Принцип работы газовой турбины и двигателя внутреннего сгорания во многом схожи. В специальной камере сгорания осуществляется совместное сжигание газового топлива и очищенного атмосферного воздуха. Для повышения давления газа используется штатный встроенный дожимной компрессор. Покидая камеру сгорания, выхлопные газы, нагретые до температуры 926°C , попадают в колесо турбины, где, расширяясь, совершают работу, вращая его, колесо компрессора и ротор высокоскоростного синхронного генератора. Съем тепла осуществляется в котле-утилизаторе (газоводяном теплообменнике), в котором сетевая вода нагревается до заданной температуры [9, 10].

Для повышения эффективности учета фугитивных выбросов парниковых газов и их сокращений необходимо совершенствование систем мониторинга на основе разработки и внедрения современных цифровых технологий контроля и количественного учета эмиссии метана и углекислого газа в реальном секторе экономики. В развитие этого подхода в ФИЦ

угля и углехимии СО РАН разработана Цифровая платформа мониторинга фугитивных выбросов парниковых газов, позволяющая автоматизировать процедуры расчета, ретроспективного и прогнозного анализа эмиссии метана и углекислого газа при добыче, транспортировке и переработке угля, а также сокращений эмиссии этих газов при использовании чистых угольных технологий деструкции и переработки угольного метана. Цифровая платформа расчета фугитивных выбросов основана на использовании коэффициентов выбросов, которые представляют собой объем парниковых газов, выбрасываемых на тонну добытого угля. Эти коэффициенты выбросов определяются посредством исследований и анализа данных о выбросах и используются для оценки общих выбросов от данной деятельности. Данные, собранные в результате инвентаризации таких выбросов, могут быть использованы для разработки стратегии сокращения выбросов и смягчения воздействия добычи угля на окружающую среду [11, 12].

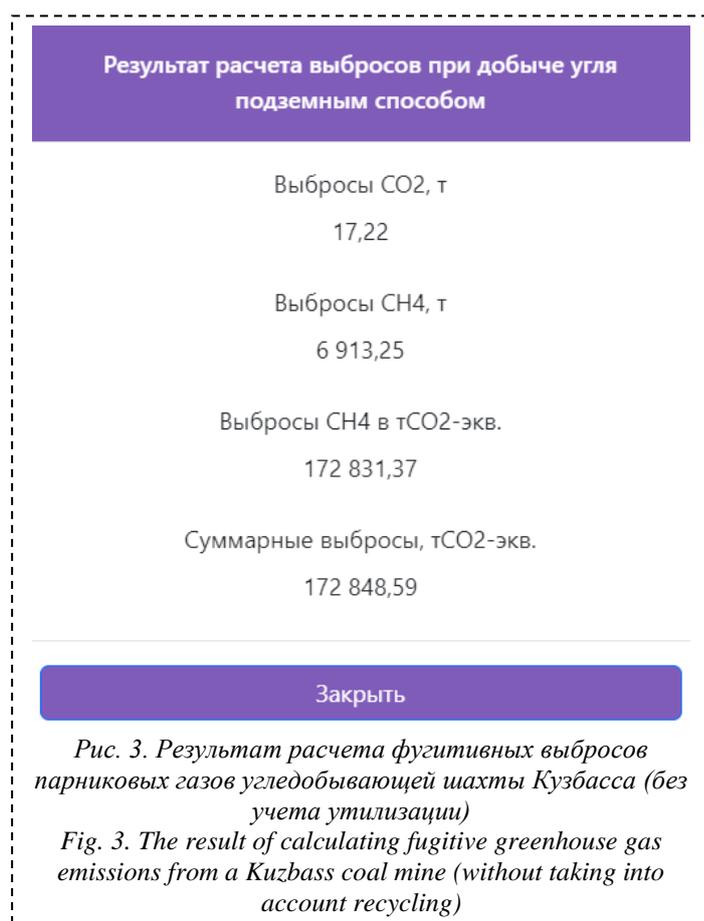
Методологическая основа оценки фугитивных выбросов парниковых газов изложена в Приказе Минприроды России от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» и «Руководящих принципах национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006».

В соответствии с этими документами инвентаризация парниковых газов включает в себя выбор метода оценки, сбор данных о деятельности, коэффициенты выбросов и другие параметры, оценку выбросов, контроль и обеспечение качества выполненных работ, проверку достоверности (верификацию)



Рис. 2. Когенерационная установка (400 кВт_{эл})

Fig. 2. Cogeneration plant (400 kW_{el})



расчетов, оценку их неопределенности и подготовку отчета в виде комплекта стандартизованных таблиц отчетности.

Результаты исследования

Разработанное программное решение – Цифровая платформа мониторинга фугитивных выбросов парниковых газов использована для оценки выбросов метана и углекислого газа при добыче, транспортировке и переработке угля на действующей угольной шахте Кузбасса. Результаты расчетов фугитивных выбросов для данного угледобывающего предприятия, полученные на основе коэффициентов выбросов, характеризующих объем парниковых газов, выделяющихся на тонну добытого угля, представлены на Рис. 3.

По итогам выполненного автоматизированного расчета выбросы метана без учета его утилизации для рассматриваемой угольной шахты Кузбасса составят 172 849 тCO₂-экв.

Обсуждение

На основе полученных результатов были выполнены расчеты, направленные на оценку потенциального объема утилизации шахтного метана с сопутствующей выработкой тепловой и электрической энергии. По данным расчетов установлено, что выбросы метана с учетом его утилизации на стационарных источниках с целью выработки тепловой и электрической энергии для рассматриваемой шахты составят

143 755 тCO₂-экв. Таким образом, расчетный потенциал сокращения выбросов парниковых газов для рассматриваемого угледобывающего предприятия – 29 094 тCO₂-экв, что составляет ≈ 17% от общего объема выбросов шахты. Достоверность полученных данных была подтверждена путем их сравнения с результатами расчета, выполненного специалистами на основе методологических принципов, изложенных в Приказе Минприроды России от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» и «Руководящих принципах национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006». Полученные результаты с учетом их подтверждения свидетельствуют о работоспособности разработанной Цифровой платформы мониторинга фугитивных выбросов парниковых газов в части заявленных возможностей автоматизации процедуры расчета, ретроспективного и прогнозного анализа эмиссии метана и углекислого газа при добыче, транспортировке и переработке угля, а также сокращений

эмиссии этих газов при использовании чистых угольных технологий деструкции и переработки угольного метана.

Выводы

Разработанная цифровая платформа мониторинга фугитивных выбросов позволяет автоматизировать процедуры расчета выбросов метана и углекислого газа при добыче угля с учетом утилизованного метана в факеле или в энергетических установках. Применение разработанного программного обеспечения позволяет снизить затраты ресурсов времени при выполнении расчетов и повысить качество отчетных документов об инвентаризации выбросов парниковых газов на угледобывающих предприятиях в соответствии с требованиями действующей нормативной базы в РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нагайцев И. А. Оценка источников выбросов парниковых газов на угледобывающих предприятиях // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 1(3). С. 111–123.
2. Федеральный закон от 02.07.2021 г. № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании «КонсультантПлюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_388992/ (дата обращения 16.07.2024).

3. Нагайцев И. А., Петрова Т. В. Сравнительный анализ перспективных технологий снижения выбросов метана на угольных шахтах // Энергетическая политика. 2024. № 1(192). С. 38–57.

4. Mehdi N., Rafiee R. Development of a new index for methane drainageability of a coal seam using the fuzzy rock engineering system // Rud. Geol. Naft. Zb. 2019. № 34. Pp. 33–44.

5. Qingdong Qu, Hua Guo, Rao Balusu. Methane emissions and dynamics from adjacent coal seams in a high permeability multi-seam mining environment // Int. J. Coal Geol. 2022. № 253. P. 103969.

6. Qiang Wei, Xianqing Li, Baolin Hu, Xueqing Zhang, Jizhen Zhang, Yukai He, Yachao Zhang, Wenwei Zhu Reservoir characteristics and coalbed methane resource evaluation of deep-buried coals: A case study of the No.13–1 coal seam from the Panji Deep Area in Huainan Coalfield, Southern North China // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. Vol. 179. P. 867–884.

7. Садов А. П., Костеренко В. Н., Тайлаков О. В., Уткаев Е. А., Застрелов Д. Н., Смыслов А. И. Опыт использования вентиляционного метана в качестве дополнительного топлива для двигателей внутреннего сгорания // Уголь. 2015. № 12 (1077). С. 61–67.

8. Артемьев В. Б., Костеренко В. Н., Садов А. П., Тайлаков О. В., Застрелов Д. Н., Уткаев Е. А.

Извлечение и переработка угольного метана. Сер. Библиотека горного инженера. Том 9, Книга 4. Рудничная аэрология. М. : «Горное дело», ООО «Киммерийский центр». 2016. 208 с.

9. Fu X., Qin Y., Wang G.G.X. Rudolph V. Evaluation of gas content of coalbedmethane reservoirs with the aid of geophysical logging technology // Fuel. 2009. Vol. 88. P. 2269–2277.

10. Hindistan A. M., Tercan E. A., Ünver B. Geostatistical coal quality control in Longwall mining // Int. J. Coal Geol. 2010. Vol. 81. P. 139–150.

11. Тайлаков О. В., Соколов С. В., Уткаев Е. А., Михалев Д. С. Алгоритмическое обеспечение цифровой платформы мониторинга фугитивных выбросов парниковых газов при угледобыче // Уголь. 2023. № 5(1167). С. 84–89.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680466 Российская Федерация. Цифровая платформа мониторинга фугитивных выбросов парниковых газов и их сокращений при использовании чистых угольных технологий: № 2023669065: заявл. 18.09.2023; опубл. 29.09.2023 / О. В. Тайлаков, Е. А. Уткаев, М. П. Макеев [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук».\

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Уткаев Евгений Александрович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: utkaev@mail.ru

Снетова Екатерина Сергеевна, ведущий инженер, Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: katty.snetova.97@mail.ru

Соколов Сергей Владиславович, канд. техн. наук, научный сотрудник, Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: sokolovsviuii@bk.ru

Черкасов Александр Васильевич, лаборант, Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: alexandr.cherkasov1997@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Уткаев Евгений Александрович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент.

Снетова Екатерина Сергеевна – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных.

Соколов Сергей Владиславович – обработка и интерпретация результатов научных исследований, написание текста, выводы.

Черкасов Александр Васильевич – концептуализация исследования, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

APPLICATION OF THE DIGITAL TECHNOLOGIES FOR ASSESSMENT OF THE METHANE EMISSION ON ACTIVE COAL MINES

Evgeny A. Utkaev, Ekaterina S. Snetova,
Sergey V. Sokolov, Alexander V. Cherkasov

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS

*for correspondence: utkaev@mail.ru



Article info

Received:
08 August 2024

Accepted for publication:
22 November 2024

Accepted:
02 December 2024

Published:
05 December 2024

Keywords: fugitive emissions, greenhouse gases, digital platform, monitoring, inventory of emissions, coal mine methane, carbon dioxide, utilization of mine methane.

Abstract.

When implementing the transition to an economy of sustainable low-carbon development in the Russian Federation and the world, it is important to correctly quantify greenhouse gas emissions. In this regard, the development of specialized software that allows emissions calculations at the level of individual industrial enterprises is becoming particularly relevant. The modern coal industry is characterized by the availability of ready-to-implement technologies for the utilization and destruction of gas released by degassing and ventilation systems of operating mines. Accordingly, the introduction of digital technologies to assess methane emissions at existing coal mining enterprises in the future will ensure not only accounting, but also reduction of methane emissions, as well as the use of its energy potential. The article provides a brief analysis of the problems of climate change on an international scale and in the conditions of the Russian Federation. The main laws in force in the Russian Federation are considered, aimed at regulating relations in the field of economic and other activities that are accompanied by greenhouse gas emissions. Issues of emission and utilization of methane-air mixture in Kuzbass coal mines are discussed. Examples of successful experience in using gas extracted from mines as fuel in power plants are considered. Calculations of fugitive emissions of methane and carbon dioxide during underground coal mining, as well as taking into account the utilized methane at a separate coal enterprise, are provided. The paper presents software designed to automate the accounting of greenhouse gas emissions at coal mining enterprises based on calculations of fugitive emissions of methane and carbon dioxide during coal mining by underground and open-pit methods, as well as when performing operations for the subsequent handling of coal mined underground.

For citation: Utkaev E.A., Snetova E.S., Sokolov S.V., Cherkasov A.V. Application of the digital technologies for assessment of the methane emission on active coal mines. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 6(166):68-75. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-68-75, EDN: VLGTF0

The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of a comprehensive scientific and technical program of a full innovation cycle «Development and implementation of a set of technologies in the areas of exploration and mining of mineral resources, ensuring industrial safety, bioremediation, creation of new products of deep transformation. processing from coal raw materials while consistently reducing the environmental load on the environment and risks to the lives of the population», approved by Order of the Government of the Russian Federation dated May 11, 2022 No. 1144-r (Agreement No. 075-15-2022-1196).

REFERENCES

1. Nagajcev I.A. Ocenka istochnikov vybrosov parnikovyh gazov na ugledobyvayushchih predpriyatiyah. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2023; 1(3):111–123.
2. Federal'nyj zakon ot 02.07.2021 g. № 296-FZ «Ob ogranichenii vybrosov parnikovyh gazov» [Elektronnyj resurs]: Oficial'nyj sayt kompanii

«Konsul'tantPlyus».

URL:

http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_388992/ (data obrashcheniya 16.07.2024).

3. Nagajcev I.A., Petrova T.V. Sravnitel'nyj analiz perspektivnyh tekhnologij snizheniya vybrosov metana na ugol'nyh shahtah. *Energeticheskaya politika*. 2024; 1(192):38–57.

4. Mehdi N., Rafiee R. Development of a new index for methane drainageability of a coal seam using the fuzzy rock engineering system. *Rud. Geol. Naft. Zb.* 2019; 34:33–44.

5. Qingdong Qu, Hua Guo, Rao Balusu. Methane emissions and dynamics from adjacent coal seams in a high permeability multi-seam mining environment. *Int. J. Coal Geol.* 2022; 253:103969.

6. Qiang Wei, Xianqing Li, Baolin Hu, Xueqing Zhang, Jizhen Zhang, Yukai He, Yachao Zhang, Wenwei Zhu Reservoir characteristics and coalbed methane resource evaluation of deep-buried coals: A case study of the No.13–1 coal seam from the Panji Deep Area in Huainan Coalfield, Southern North China. *Journal of Petroleum Science and Engineering.* 2019; 179:867–884.

7. Sadov A.P., Kosterenko V.N., Tajlakov O.V., Utkaev E.A., Zastrelov D.N., Smyslov A.I. Opyt ispol'zovaniya ventilyacionnogo metana v kachestve dopolnitel'nogo topliva dlya dvigatelej vnutrennego sgoraniya. *Ugol'*. 2015; 12(1077):61–67.

8. Artem'ev V. B., Kosterenko V. N., Sadov A. P., Tajlakov O. V., Zastrelov D. N., Utkaev E. A. Izvlechenie i pererabotka ugol'nogo metana. Ser. Biblioteka gornogo inzhenera. Tom 9, Kniga 4.

Rudnichnaya aerologiya. M.: «Gornoe delo», OOO «Kimmerijskij centr»; 2016. 208 s.

9. Fu X., Qin Y., Wang G.G.X. Rudolph V. Evaluation of gas content of coalbedmethane reservoirs with the aid of geophysical logging technology. *Fuel.* 2009; 88:2269–2277.

10. Hindistan A.M., Tercan E.A., Ünver B. Geostatistical coal quality control in Longwall mining. *Int. J. Coal Geol.* 2010; 81:139–150.

11. Tajlakov O.V., Sokolov S.V., Utkaev E.A., Mihalev D.S. Algoritmicheskoe obespechenie cifrovoj platformy monitoringa fugitivnyh vybrosov pamirkovyh gazov pri ugledobyche. *Ugol'*. 2023; 5(1167):84–89.

12. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2023680466 Rossijskaya Federaciya. Cifrovaya platforma monitoringa fugitivnyh vybrosov pamirkovyh gazov i ih sokrashchenij pri ispol'zovanii chistyh ugol'nyh tekhnologij: № 2023669065: zayavl. 18.09.2023: opubl. 29.09.2023 / O.V. Tajlakov, E.A. Utkaev, M.P. Makeev [i dr.]; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe nauchnoe uchrezhdenie «Federal'nyj issledovatel'skij centr uglya i uglekhimii Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk».

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Evgeny A. Utkaev, Cand. Sci. in Engineering, Senior Researcher, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: utkaev@mail.ru

Ekaterina S. Snetova, Leading Engineer, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: katya.snetova.97@mail.ru

Sergey V. Sokolov, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: sokolovsviuu@bk.ru

Alexander V. Cherkasov, Laboratory Assistant, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: alexandr.cherkasov1997@gmail.com

Contribution of the authors:

Уткаев Евгений Александрович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент.

Снетова Екатерина Сергеевна – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных.

Соколов Сергей Владиславович – обработка и интерпретация результатов научных исследований, написание текста, выводы.

Черкасов Александр Васильевич – концептуализация исследования, выводы.

All authors have read and approved the final manuscript.

