

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 539.3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ БИОТЕХНОЛОГИЙ ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

М. В. Курленя¹, Е. К. Емельянова^{2,3}, И. С. Андреева³, А. В. Савченко¹

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

E-mail: sav@eml.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный медицинский университет,

Красный проспект, 52, 630091, г. Новосибирск, Россия

³Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии "Вектор",
630559, р. п. Кольцово, Новосибирская область, Россия

Дан анализ современного состояния и направлений развития биологического способа дегазации угольных месторождений. Показано, что десорбция метана является следствием деструкции породного массива в результате жизнедеятельности микроорганизмов и выделения бактериальных метаболитов. Отмечено влияние микроорганизмов на уголь, зависящее от преобладающего микробного сообщества и его разнообразия, доступа кислорода, питательных субстратов. Рассмотрено развитие биологического метода дегазации угольных месторождений на основе использования метанотрофии.

Метанотрофы, метаноокисляющие микроорганизмы, дегазация угольных пластов, метан, горные выработки

DOI: 10.15372/FTPRPI20190608

Проблема дегазации угольных месторождений остается актуальной в течение последнего столетия. Метанообильность угольных шахт Кузбасского, Воркутинского и других бассейнов в России составляет ~8–9 кг/т и является главным фактором безопасности при ведении горных работ [1]. Газообильность одного из угольных пластов Донбасса на глубине 1 км достигает 31 м³ метана на 1 т добываемого угля. Более 80 % из числа действующих на территории бывшего СССР шахт характеризуются повышенной газообильностью (> 10–15 м³ на 1 т угля) [2]. С увеличением глубины освоения месторождения просматривается устойчивая закономерность нарастания метаноносности пластов и миграции метана в выработки, а также вероятность возникновения внезапных выбросов угля и газа. Эмиссия метана из угольных пластов составляет 5–20 м³/т [3].

В настоящее время создан целый ряд способов дегазации угольных пластов, основанных на идее перераспределения напряженно-деформированного состояния массива горных пород и изменения его физико-механических свойств [4, 5]. К ним относятся наработка и подработка угольных пластов [6, 7], методы гидроразрыва [8, 9] и динамические воздействия на массив, способствующие миграции метана [10]. В последние годы активно ведутся исследования и разработки в области создания технологий дегазации неразгруженных угольных пластов до начала освоения месторождений с целью добычи метана в промышленном масштабе [11]. Используемые на практике методы дегазации угольных пластов не всегда эффективны, поэтому необходимы поиск новых решений и совершенствование методов снижения концентрации метана как в угленосных толщах, так и в выработанных пространствах.

Цель настоящей работы — анализ многолетних исследований и развития биологического способа дегазации угольного массива, а также поиск направлений его совершенствования.

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ БИОЛОГИЧЕСКОГО СПОСОБА ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНОГО МАССИВА

Микробная экология земных недр плохо изучена из-за физической изоляции и экстремальных физико-химических характеристик, несмотря на важную роль протекающих здесь глобальных геохимических процессов. Первые упоминания в СССР о возможном применении биологического метода дегазации угольного массива относятся к 1939 г. [12]. Однако практическое использование на шахтах началось позднее. Основой биологического воздействия на угольную среду и связанный с ней метан являются метанотрофные микроорганизмы. Десорбция метана — следствие деструкции угля в результате воздействия бактерий и синтеза метаболитов, понижающих его гидрофобность. В процессе жизнедеятельности микроорганизмы продуцируют поверхностно-активные вещества, кислоты и разнообразные ферменты. Общая численность бактерий в угле достигает $(2.4–2.5) \cdot 10^7$ клеток/г угля. Лабораторные работы по увлажнению образцов бурого угля выявили увеличение численности бактерий и грибов [13]. Установлено, что часть микробного сообщества способствует дегазации угля, а другие наоборот, синтезируют метан и освобождают его из макропор угольного массива. Основные биологические воздействия микроорганизмов на пласт угля — утилизация метана метанотрофными микроорганизмами, десорбция метана вследствие деградации угля микроорганизмами-деструкторами и биосинтез метана микроорганизмами из компонентов угля (биометаногенез).

Газоассимилирующие микроорганизмы делятся на следующие группы:

- метанотрофы, т. е. высокоспециализированные микроорганизмы, использующие в качестве субстрата для роста метан (основные представители из родов *Methylococcus*, *Methylosinus*, *Methylomonas*);
- алканассимилирующие микроорганизмы, утилизирующие этан, пропан, бутан и неспособные расти на метане (*Rhodococcus*, *Mycobacterium*, *Nocardia*);
- алкенассимилирующие микроорганизмы, растущие на этилене, пропилене, бутилене и бутadiене (*Mycobacterium*, *Xanthobacter*, *Nocardia*) [14].

Исследования угольных пластов показали, что микробные сообщества, связанные с твердыми частицами угля, отличаются по составу от сообществ в шахтных водах [15]. Индексы видового разнообразия шахтных вод выше по сравнению с образцами угля [16]. Отмечается незначительное присутствие метанотрофов в каменноугольных пластах и вмещающих их породах, не контактировавших с рудничной атмосферой, и, наоборот, наличие их в большом количестве вблизи вентиляционной системы шахты [17, 18].

Образцы из застойных вод отстойников и выработанных пространств шахт Донбасса содержали метанотрофы в количестве $10^5 - 10^6$ клеток/мл, в то время как в водах, просачивающихся через угольные пласты и породы, метанотрофы отсутствовали или присутствовали в небольшом количестве. Интенсивность микробиологического окисления метана в воде каменноугольных шахт составляла 0.036–0.990 мл CH_4 /л воды в сутки [19].

Биологический метод борьбы с метаном в шахтах все предшествующие годы разрабатывался на основе применения метанотрофных микроорганизмов, в природе встречающихся в разнообразных экосистемах: тундровых болотах, сфагновых торфяниках, донных отложениях озер, сточных водах, геотермальных полях и др. Метанооксиляющие бактерии — уникальная группа микроорганизмов, способных включать в метаболизм насыщенное одноуглеродное соединение (метан в качестве единственного субстрата для роста). Первый метанотроф описан немецким исследователем Н. Зенгеном, который выделил бактерию, способную расти на метане, с поверхности растений пресноводного пруда и назвал ее *Bacillus methanicus* [20]. На данный момент способность к аэробному росту на метане выявлена у представителей *Alpha-* и *Gamma*proteobacteria, *Verrucomicrobia*. Основная часть аэробных метанотрофов узко специализирована на использовании метана и метанола в качестве единственных субстратов для роста, однако представители рода *Methylocella*, помимо метана, растут на относительно широком спектре органических соединений [21]. Метанотрофы окисляют метан через образование метанола, формальдегида и формиата в качестве интермедиатов до углекислого газа и воды. Первичная реакция с участием молекулы CH_4 катализируется уникальным мультикомпонентным комплексом метанмонооксигеназной, существующей в мембраносвязанной (pMMO) или растворимой форме (sMMO).

С целью снижения концентрации метана в шахтах перспективно введение суспензий метанотрофов в угольные пласты, горные выработки и выработанные пространства. Опытные промышленные испытания технологии снижения метанообильности в угольных шахтах проводились по двум схемам: снижение выделения метана в угольном пласте до начала его разработки и в процессе горных работ. Предлагаемые методы дегазации основаны на предварительной закачке в угольный пласт суспензии метанотрофов и создании условий для их жизнедеятельности, а также обработке забоев очистных и подготовительных выработок суспензией метанотрофов. В этом случае создается бактериальный фильтр на пути метана, диффундирующего из близлежащей угольной толщи [22].

Технология применения метанотрофов для снижения содержания метана до начала выемки угля более сложная. Она связана с введением культур бактерий в угольный пласт через систему специально пробуренных скважин. В 1966 г. в Московском горном институте (МГИ) предложен способ микробиологического окисления метана в угольном массиве [23]. Первое промышленное опробование осуществлено в Донецком бассейне на шахте “Суходольская” № 2 при проведении подготовительной выработки по пласту l_6 . Экспериментальный участок угольного пласта протяженностью 350 м разделили на пять равных секций. В двух секциях по пласту угля пробурили три скважины, средняя из которых использовалась для закачки экспериментальных растворов и последующей пневмообработки, а две крайние — для оттока части метана и продуктов его окисления. Остальные секции контрольные: в них определялись газоносность угля и содержание углекислоты в газовой фазе. В угольный массив закачивали суспензию клеток чистой культуры метанооксиляющих бактерий в растворе минеральной питательной среды, а за-

тем в течение 15 дней через этот участок продували воздух. В результате газоносность угля в этой секции снизилась с 3.50 до 1.48 м³ метана на 1 т добываемого угля, а содержание углекислоты, т. е. продукта окисления метана, выросло в 3.3 раза. Содержание жизнеспособных бактерий в закачиваемой суспензии составляло 10⁷ клеток/мл, в угле после закачки суспензии — 10⁶–10⁷ клеток/г угля, после 150 ч пневмообработки — 10¹¹ клеток/г угля, при этом в пробах на необработанных участках метанотрофы отсутствовали. Поскольку на экспериментальном участке газоносность угля изменялась под действием трех процессов: вытеснения части метана жидкой фазой суспензии, пневмообработки и окислительной деятельности метаноокисляющих бактерий, то провели дополнительный контрольный эксперимент с обработкой угольного пласта так же, но без добавления суспензии микроорганизмов. Газоносность угля снизилась на 1.3 м³ метана на 1 т добываемого угля, и чистый эффект от окислительной деятельности микроорганизмов составил 0.7 м³ метана на 1 т угля.

На шахте 5-бис “Перевальская” (Донбасс) в угольный пласт в течение 90 дней непрерывно закачивалась в режиме фильтрации суспензия метаноокисляющих бактерий. Необходимый для окислительного процесса воздух поступал в пласт одновременно с суспензией, поэтому специальная продувка воздуха через пласт не проводилась. В результате микробиологической обработки содержание метана в пласте снизилось с 23.0 до 11.4 м³/т угля, причем более половины метана окислено микроорганизмами. Высокая численность микроорганизмов, обнаруженная в фильтрате из пласта и обработанном массиве угля, свидетельствует о том, что микроорганизмы активно размножились в угольном массиве [2]. Позднее МГИ выполнил работы по микробиологическому окислению метана через скважину, пробуренную с поверхности, с применением гидрорасчленения в Кузбассе на шахте им. М. И. Калинина [23, 24]. Участок пласта обрабатывался с поверхности земли через существовавшую скважину разведочного бурения. Для облегчения проникновения микроорганизмов в угольный пласт и увеличения площади экспериментального участка еще до начала эксперимента осуществлено гидрорасчленение угольного пласта, что привело к значительному повышению пористости и трещиноватости угля. Затем через разведочную скважину в течение 83 дней непрерывно закачивалась суспензия метаноокисляющих бактерий. Всего использовано 5520 м³ суспензии, содержащей 50 кг бактериальной биомассы в расчете на сухой вес. Обработанный и контрольный участки пласта вскрыты подземными горными выработками, по мере проходки которых обнаружено, что содержание метана снизилось с 15.0 до 6.9 м³/т угля, причем за счет жизнедеятельности бактерий на обработанном участке окислено ~4 м³/т метана. Метаноокисляющая микробиота обнаруживалась в радиусе 80 м от скважины, через которую проводилась обработка пласта [2]. За счет образования углекислоты произошло растворение части карбонатных включений и увеличение эффективной пористости угольного пласта [25].

Принципиальная возможность применения метанотрофов для снижения газообильности в горных выработках реализована ИГТМ АН УССР в 1978 г. на шахте Ясиновская-Глубокая, где 60–70 % метана выделялось из выработанного пространства [2]. С целью снижения общей газоносности часть его размером 30 × 20 м по мере продвижения угольной лавы в течение 15 сут обрабатывали суспензией метаноокисляющих микроорганизмов *Methylococcus capsulatus* 1–70, предварительно выращенной в ферментере. В периоды микробиологического воздействия газообильность добычных участков снижалась на 40–60 %, что обеспечивало условия безопасного ведения горных работ. В процессе исследований отработаны основные приемы де-

газации пластов, транспортировки и хранения метанотрофов, а также способ получения больших объемов высокоактивной суспензии клеток из откачиваемого газа, содержавшегося в угольных пластах [22]. Результаты испытаний биологического метода борьбы с метаном в выработанном пространстве шахт Донбасса показали эффективность краткосрочных (12–20 сут) обработок обрушенных пород суспензией микроорганизмов: относительное снижение метана составляло от 23–36 % (Ясиновская-Глубокая) до 55–60 % (им. Ленинского Комсомола Украины) [26].

В 1981–1988 гг. совместными усилиями МГИ, ИГТМ АН УССР, ИБФМ АН СССР, ВНИИ Синтезбелок и производственных объединений Минуглепрома СССР в Донбассе проведены крупные работы по промышленному освоению микробиологического окисления метана, выделяющегося из выработанных пространств в угольных шахтах [27]. С 1988 г. МГИ в ПО “Торезантрацит” выполнил работы по микробиологическому окислению метана, содержащегося в шахтной атмосфере. В 1987 г. ИГТМ АН УССР провел эксперименты по наращиванию биомассы на шахтном метане в ПО “Павлоградуголь”.

В зависимости от места потребления метана микроорганизмы размещают в порово-трещинном пространстве угольного пласта, обрушенных горных породах, шахтном воздухе или на искусственных носителях [23].

Под технологической схемой биоокисления метана понимают совокупность механизмов, оборудования и функциональных связей между ними для выработки конечного продукта на основе использования метанотрофов.

Выделяют следующие схемы биоокисления метана:

- в пластах из горных выработок;
- пластах с поверхности;
- массиве горных пород;
- выработанных пространствах очистных забоев;
- локальных скоплениях метана в подготовительных выработках [23].

В случае использования нагнетательного способа проветривания с поверхности микробиологическое воздействие осуществляется через технологические скважины или скважины гидрорасчленения. Нагнетательное оборудование устанавливают в выработках, биообработку осуществляют через подземные скважины. При набрызговом способе для рабочей биосуспензии применяют гибкие шланги или стационарные промышленные трубы с последующим распылением суспензии на породы выработанных пространств, отбитую горную массу и стенки выработок. Дегазация породного массива выполняется также путем распыления в выработках из специальных емкостей рабочей биосуспензии или сухой биомассы в виде порошка. Воздух подается одновременно с рабочей суспензией. Такое технологическое решение называется совместным. При последовательной схеме подачи компонентов рабочую суспензию и воздух нагнетают раздельно. Рабочая суспензия представляет собой питательную среду с биомассой клеток. В биофильтре, который создают в обрушенных породах выработанного пространства, как правило, используют порционный способ. При нагнетании в пласт биосуспензии применяются порционный и непрерывный способы. Воздействие рабочей суспензии на метан достигается заблаговременно до начала ведения работ в зоне биообработки (эксперимент на шахте им. М. И. Калинина). Схема биоокисления метана пластов из выработок характеризуется наличием нагнетательных скважин, пробуренных по пласту или вкрест его залегания [28].

Исследования метанотрофных сообществ в угольных шахтах проводились в разных областях мира [29–32]. Функционирование микробного консорциума метанотрофных бактерий в зависимости от соотношения метана и кислорода показало, что при низких концентрациях CH_4 и высоких концентрациях O_2 в микросообществе преобладают метанотрофы I типа, в то время как метанотрофы II типа доминируют в условиях высокого уровня метана / низкого уровня кислорода [32]. Процесс окисления метана в микроаэробных и гипоксических условиях осуществляют разные виды метанотрофов, что продемонстрировано в сконструированных лабораторных колоночных четырехсекционных биореакторах из нержавеющей стали объемом 14 л с внутренним диаметром 13 см [33]. С помощью лабораторного газофазного биореактора из цилиндрической стеклянной колонны обнаружена скорость утилизации метана в зависимости от соотношения подачи метана и воздуха от 23 до 38 мг метана в 1 ч (скорость циркуляции метана 200 мл/мин), что перспективно для практического применения удаления метана из атмосферы угольных шахт [35]. Сконструированный экспериментальный биофильтр (биоскрубер), использующий биопленку метанотрофа *M. fodinorum*, снижал уровень метана на 70 % за 15 мин работы и 90 % через 20 мин при условии 0.25–1.00 % метана в воздухе, обычно встречающегося в атмосферах угольных шахт [35].

Создание технологии дегазации угля в породном массиве невозможно без трех составляющих:

- отбора проб угля непосредственно в шахте и доставке угольного керна в герметичном контейнере с поддержанием постоянной температуры и давления выделяющегося газа к реактору, установленному в лаборатории;
- выращивания клеток микроорганизмов в реакторе и селективного отбора целевых групп метанотрофов;
- доставки культур микроорганизмов в шахту, поддержания их жизнеспособности и внесения их в угольный пласт.

Наиболее трудоемкая часть работы — выращивание и отбор целевых групп микроорганизмов в биореакторе, который должен удовлетворять следующим требованиям:

- полная герметичность и автономность реактора;
- обеспечение постоянной рециркуляции питательного субстрата, орошающего уголь;
- поддержание постоянной температуры и давления в реакторе;
- реализация в конструкции реактора способа отбора микроорганизмов и смены угля без его разгерметизации, доступа кислорода и с сохранением постоянной температуры внутри реактора;
- производство реактором объема биомассы микроорганизмов в количестве, достаточном для обработки экспериментального участка угольного пласта.

Поскольку условия для развития микроорганизмов должны быть максимально приближены к шахтовым условиям, т. е. естественной среде их обитания, то помимо реактора необходимо предусмотреть дополнительные вспомогательные устройства, выполняющие перегрузку угля из транспортировочной камеры к реактору с выравниванием температуры, донасыщением метаном.

Влияние микроорганизмов на уголь в лабораторных и условиях шахтного эксперимента зависит от преобладающего микробного сообщества и его разнообразия, доступа кислорода, питательных субстратов, а также других условий (рН, токсичных металлов и др.). Для дегазации угольных месторождений используется метанотрофия — утилизация метана микроорганизмами, исключая биометаногенез (синтез метана из компонентов угля, нежелательный в условиях шахты).

ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАНОТРОФНЫХ БАКТЕРИЙ В ТЕХНОЛОГИИ ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Несмотря на то что метанообильность угольных шахт снижалась за счет деятельности внесенных метанотрофов как в поровом, так и выработанном пространстве (от 30 до 60 % от исходной концентрации метана [2]), возникают трудности их практического применения. Для подачи в шахту требуется большое количество бактериальной биомассы, которую необходимо наработать в лабораторно-промышленных условиях, располагающихся на большом расстоянии от мест добычи угля. В процессе транспортировки биомасса может инактивироваться.

К числу микроорганизмов, обладающих слабой способностью к адгезии на твердых поверхностях, относят метанотрофы. Показано, что для таких микроорганизмов золь-гель метод двойной иммобилизации позволяет приготовить биокатализаторы, обладающие сравнительно высокой ферментативной активностью по сравнению с биокатализаторами, полученными методом адсорбции в различных его вариациях [37]. Другой способ иммобилизации заключается в нанесении и закреплении метанооксиляющих бактерий на пористых проницаемых для метана материалах, не оказывающих ингибирующего воздействия на активность: лигносульфонате, поливинилового пленке, грубоотканом легкосмачиваемом материале, полиакриламидном геле [38].

При изучении кинетики монооксигеназной реакции суспензиями газоассимилирующих бактерий выявлено, что реакция биоокисления метана останавливается через 2–4 ч из-за необратимого ингибирования и токсичности конечных окси-продуктов [14]. Для предотвращения ингибирования развития основной метанотрофной бактериальной культуры в биореактор дополнительно вносят микробный консорциум из нескольких гетеротрофных видов неметанотрофных бактерий, утилизирующих эти токсичные продукты.

Управляемое культивирование метанотрофных бактерий вызывает технологические трудности в связи с особенностями метана как единственного субстрата для роста: процесс требует сложного аппаратного оформления стадии ферментации в проточном режиме с рециркуляцией газовой смеси и повышенное давление. Для выращивания метанотрофных бактерий используют аэробные биореакторы с подачей воздуха (или смеси воздуха с кислородом) и природного газа в качестве источника углерода, технологическую воду, концентрированный раствор источников минерального питания, раствор для стабилизации рН среды выращивания (аммиачная вода), выполняющий в процессе роль источника азота для микроорганизмов [39]. Низкая растворимость метана до 0.02 г/л при нормальном давлении в питательной среде — лимитирующий фактор, определяющий скорость роста бактериальной культуры.

Высокая восстановленность молекулы метана требует для его микробного окисления большое количество кислорода, т. е. в 5 раз больше, чем при росте на углеводах, и в 2–3 раза больше, чем при окислении жидких углеводородов. Потребности в кислороде у микробных клеток в 2–3 раза превышают их потребности в метане. Однако из-за взрывоопасности субстрата стехиометрическое соотношение данных газов принимается не оптимальным для развития бактерий, и процесс реализуют при лимите по кислороду и избытке метана.

Радиоизотопным методом установлено, что углерод потребляемого микроорганизмами метана аккумулируется в экзометаболитах и углекислом газе и лишь 8.2–14.0 % его расходуется на синтез клеточных веществ микроорганизмов (биомассу) [19]. Применение метанотрофов в промышленности затруднено ввиду их относительно низкой скорости роста и низкой плотности клеток.

Одним из альтернативных подходов является создание функциональной системы экспрессии генов метанмонооксигеназ в штаммах-хозяевах, растущих на многоуглеродных соединениях в качестве источника питания, а не только на метане, и способных достигать высокой плотности клеток. Однако считается, что экспрессия рММО или sММО затруднена. Предприняты попытки для экспрессии генов sММО в *Pseudomonas putida* F1, *Agrobacterium tumefaciens* и *Rhizobium meliloti*, но активность sММО во всех экспериментах чрезвычайно низкая. Как сообщается, экспрессия рММО в клетках *Escherichia coli* не осуществлена из-за неправильной сборки фермента [40].

В состав питательной среды входят ионы азота, фосфора, магния, калия, меди, железа, марганца, цинка, кобальта и другие микроэлементы преимущественно в виде сульфатов. Состав сред варьируется по элементному составу в зависимости от фазы, скорости роста, плотности бактериальной культуры. Ключевую роль в регуляции ферментной системы играют ионы меди и железа, входящие в состав метанмонооксигеназ.

Сложны и трудоемки методы хранения метанооксиляющих культур в непосредственной близости от шахты, поскольку микробиологические предприятия обычно находятся на удалении. Поэтому актуальным остается вопрос выращивания биомассы непосредственно в угольных шахтах с применением выделяющегося метана, что избавило бы от необходимости транспортировки биомассы.

Производственный штамм для использования в шахте должен быть функционально активным при температуре в забое 18–20 °С, что облегчит наработку, в то время как основная масса метанотрофов требует для роста 30–35 °С.

В последнее время, несмотря на открытие новых штаммов метанотрофных микроорганизмов, приоритетной остается задача поиска и выделения такого газоассимилирующего микроорганизма, культивирование и наработка биомассы которого осуществляется при более простых условиях, например на жидких углеводородах нефти или других негазообразных органических соединениях.

ВЫВОДЫ

С увеличением глубины разработки метаноносных угольных пластов и ростом температуры горных пород создаются благоприятные условия для комфортного жизнеобеспечения бактерий и реальные возможности развития биологического способа дегазации. Область применения биологического метода дегазации охватывает трудно проветриваемые участки шахт, где происходит накопление метана и затруднительна вентиляция. Биохимическое окисление метана микроорганизмами, осуществляемое в угольных пластах и выработках, — безопасный технологический процесс для сотрудников, выполняющих горные работы. Метанотрофные бактерии снижают метановыделение и концентрацию метана в горных выработках и могут стать хорошим инструментом для разработки технологии дегазации угольных месторождений.

Успешное использование биологического способа дегазации угольных пластов на шахтах следует рассматривать в сочетании с вентиляцией горных выработок и методами десорбции метана. Развитие биотехнологий дегазации должно основываться на применении новых микроорганизмов, утилизирующих метан в температурных условиях шахты, и их росте на простых питательных средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хаутиев А. М. Обоснование и разработка метода дегазации угольного пласта на основе циклического газодинамического воздействия: дисс. ... канд. техн. наук. — М., 2015. — 143 с.
2. Иванов М. В. Микробиологический метод борьбы с метаном в угольных шахтах // Юбилейный сборник к 70-летию Института микробиологии им. С. Н. Виноградского, В. Ф. Гальченко. — М.: Наука, 2004. — 423 с.
3. Breas O., Guillou C., Reniero F., and Wada E. The global methane cycle: isotopes and mixing ratios, sources and sinks, *Isotopes Environ, Health Stud*, 2001, Vol. 37. — P. 257–379.
4. Зорин А. Н., Халимендик Ю. М., Колесников В. Г. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых. — М.: Недра, 2001. — 420 с.
5. Артемьев В. Б., Коршунов Г. И., Логинов А. К., Шик В. М. Динамические формы проявлений горного давления. — СПб.: Наука, 2009. — 347 с.
6. Горная энциклопедия в 5 т. Т. 3 / под ред. Е. А. Козловского. — М.: Сов. энциклопедия, 1987. — 425 с.
7. Горная энциклопедия в 5 т. Т. 4 / под ред. Е. А. Козловского. — М.: Сов. энциклопедия, 1989. — 171 с.
8. Курленя М. В., Сердюков С. В., Патутин А. В., Шилова Т. В. Интенсификация подземной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2017. — № 6. — С. 3–9.
9. Сердюков С. В., Курленя М. В., Рыбалкин Л. А., Шилова Т. В. Влияние гидроразрыва угля на фильтрационное сопротивление зоны дренирования дегазационной скважины // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 3–13.
10. Курленя М. В., Цупов М. Н., Савченко А. В. Влияние Бачатского землетрясения в Кузбассе на эмиссию метана в горные выработки угольных шахт // ФТПРПИ. — 2019. — № 5. — С. 3–9.
11. О перспективах добычи в России угольного газа. Газпром. <https://www.gazprom.ru/about/production/extraction/metan/>.
12. Yurovskii A. Z., Kapilash G. P., and Mangubi B. V. Methane control in coal mines by means of methane-consuming bacteria, Preliminary Report, 1939, *Ugol* 7.
13. Буланкина М. А., Лысак Л. В., Звягинцев Д. Г. Микроорганизмы бурого угля // Изв. РАН. Серия Биологическая. — 2007. — Т. 2. — С. 239–243.
14. Коваленко Г. А. Селективное окисление газообразных углеводородов бактериальными клетками // Успехи химии. — 1996. — Т. 65. — № 7. — С. 676–691.
15. Vick S., Greenfield P., Pinetown K., Sherwood N., Gong S., Tetu S., Midgley D., and Paulsen I. Succession patterns and physical niche partitioning in microbial communities from subsurface coal seams, *Science*, 2019, Vol. 12. — P. 152–167.
16. Wei M., Yu Z., and Zhang H. Microbial diversity and abundance in a representative small-production coal mine of central China, *Energy Fuels*, 2013, Vol. 27. — P. 3821–3829.
17. Малашенко Ю. Р., Соколов И. Г., Романовская В. А. Микробный метаболизм неростовых субстратов. — Киев: Наукова думка, 1987. — 191 с.
18. Han B., Chen Y., Abell G., Jiang H., Bodrossy L., Zhao J., Murrell J., and Xing X-H. Diversity and activity of methanotrophs in alkaline soil from a Chinese coal mine, *FEMS Microbiology Ecology*, 2009, Vol. 70, Issue 2. — P. 196–207. doi: org/10.1111/j.1574-6941.2009.00707.x.
19. Иванов М. В., Нестеров А. И., Намсараев Б. Б., Гальченко В. Ф., Назаренко А. В. Распространение и геохимическая деятельность метанотрофных бактерий в водах угольных шахт // Микробиология. — 1978. — Т. 47. — С. 489–494.
20. Söhngen N.L. Über bakterien, welche methan ab kohlenstoffnahrung and energiequelle gebrauchen, *Parasitenkd. Infektionskr.*, 1906, Vol. 15. — P. 513–517.
21. Dunfield P. and Dedysh S. Methylocella: a gourmand among methanotrophs, *Trends Microbiol.*, 2014, Vol. 22. — P. 368–369.

22. **Мякенький В. И., Курдиш И. К.** Микробиологическое окисление метана угольных шахт. — Киев: Наукова думка, 1991. — 148 с.
23. **Васючков Ю. Ф.** Биотехнология управления метановыделением в шахтах // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2018. — Вып. 4. — С. 168–179.
24. **Васючков Ю. Ф.** Совершенствование управления метановыделением в очистных забоях микробиологическими способами. — М.: ЦНЭИ-уголь, 1989. — 37 с.
25. **Исмаилов А. С.** Разработка методов борьбы с метаном в шахтах с использованием микробиологического воздействия на угольные пласты через скважины с поверхности. — М.: МГИ, 1985. — 19 с.
26. **Иванов М. В.** Микробиологические методы борьбы с метаном в угольных шахтах // Вест. АН СССР, Сер. Биол. — 1988. — № 3. — С. 16–26.
27. **Мякенький В. И.** Обоснование микробиологического способа снижения метанообильности выработанного пространства // Уголь Украины. — 1983. — № 12. — С. 32–33.
28. **Ржевский В. В., Братченко Б. Ф., Бурчаков А. С., Ножкин Н. В.** Управление свойствами и состоянием угольных пластов с целью борьбы с основными опасностями в шахтах. — М.: Недра, 1984. — 327 с.
29. **Xing X., Jiang H., Jiang P.-X., Zhang C., Chen Y., and Murrell J.** Bioengineering of methanotrophic consortia for reduction of methane emission in coal mines, *J. Biotechnology*, 2010, Vol. 150. — P. S541–S542. doi: 10.1016/j.jbiotec.2010.09.892.
30. **Stepniewska Z., Pytlak A., and Kuźniar A.** Methanotrophic activity in Carboniferous coalbed rocks, *Int. J. Coal Geology*, 2013, Vol. 106. — P. 1–10.
31. **Thielemann T., Luecke A., Schleser G., and Littke R.** Methane exchange between coal-bearing basins and the atmosphere: the Ruhr Basin and the Lower Rhine Embayment, Germany, *Organic Geochemistry*, 2000, Vol. 31. — P. 1387–1408.
32. **Wei M., Yu Z., and Zhang H.** Molecular characterization of microbial communities in bioaerosols of a coal mine by 454 pyrosequencing and real-time PCR, *J. Environmental Sciences*, 2015, Vol. 30. — P. 241–251.
33. **Karthikeyan O., Chidambarampadmavathy K., Nadarajan S., Lee P., and Heimann K.** Effect of CH₄/O₂ ratio on fatty acid profile and polyhydroxybutyrate content in a heterotrophic-methanotrophic consortium, *Chemosphere*, 2015, Vol. 141. — P. 235–242.
34. **Cao Q., Liu X., Ran Y., Li Z., and Li D.** Methane oxidation coupled to denitrification under microaerobic and hypoxic conditions in leach bed bioreactors, *Science of the Total Environment*, 2019, Vol. 649. — P. 1–11.
35. **Apel W., Dugan P., and Wiebe M.** Use of methanotrophic bacteria in gas phase bioreactors to abate methane in coal mine atmospheres, *Fuel*, 1991, Vol. 70. — P. 1001–1003.
36. **Sly L., Bryant L., Cox J., and Anderson J.** Development of a biofilter for the removal of methane from coal mine ventilation atmospheres, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 1993, Vol. 39. — P. 400–404.
37. **Коваленко Г. А.** Катализ ферментами и нерастущими бактериальными клетками, иммобилизованными на неорганических носителях: автореф. дис. ... д-ра хим. наук. — Новосибирск, 2006. — 33 с.
38. **Пат. SU 1 475 249 A1.** Способ борьбы с метаном в угольных шахтах / В. А. Бондарь, Ю. Ф. Васючков, В. Н. Захарченко, А. М. Зякун, А. С. Исмаилов, М. В. Иванов, В. В. Качак, А. И. Нестеров // Оpubл. в БИ. — 1999. — № 3. — С. 34.
39. **Пат. 2064016 РФ.** Способ получения биомассы метанооксиляющих микроорганизмов и способ управления непрерывным процессом получения биомассы метанооксиляющих микроорганизмов / В. В. Лалов, А. В. Назаров, Н. В. Осокина // Оpubл. в БИ. — 1996. — № 4. — С. 65.
40. **Gou Z., Xing X.-H., Luo M., Jiang H., Han B., Wu H., Wang L., and Zhang F.** Functional expression of the particulate methane mono-oxygenase gene in recombinant *Rhodococcus erythropolis*, *FEMS Microbiology Letters*, 2006, Vol. 263, Issue 2. — P. 136–141.

Поступила в редакцию 18/XI 2019

После доработки 25/XI 2019

Принята к публикации 27/XI 2019