

УДК 628.336.6

Система совместного использования обедненного метана угольных пластов и биогаза для выработки электроэнергии в угольных шахтах

А. Л. Харитonenko¹, А. Б. Завьялов¹, Я. В. Зачиняев²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² Петрозаводский государственный университет, Российская Федерация, 185910, Петрозаводск, пр. Ленина, 33

Для цитирования: Харитonenko А. Л., Завьялов А. Б., Зачиняев Я. В. Система совместного использования обедненного метана угольных пластов и биогаза для выработки электроэнергии в угольных шахтах // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 595–603. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-595-603

Аннотация

Цель: Обоснование и разработка новых ресурсосберегающих технологий, направленных на утилизацию метана угольных пластов. Проблема низкой эффективности утилизации бедных метановоздушных смесей обусловлена в первую очередь низким содержанием непосредственно самого метана в зависимости от вида угля или концентрацией, которая резко варьируется. В данной работе рассматривается концепция системы совместного производства, в которой смешиваются метановоздушные смеси с низким содержанием метана и биогаз для получения электроэнергии. **Методы:** Анализ возможных объемов утилизируемого метана, потребностей в биогазе и пригодности первичного сырья для целей совместного производства тепла и электроэнергии. Подбор соответствующих параметров процессов утилизации шахтного метана. Анализ достоинств предложенного способа использования бедного метана, извлекаемого из угольных шахт. **Результаты:** Рекомендуется добавлять биогаз, вырабатываемый сельским и лесным хозяйством вблизи шахт, в поток отбензиненного метана для получения необходимой концентрации газа с целью выработки электроэнергии. Также была проведена оценка потенциального производства электроэнергии и снижения выбросов парниковых газов. Результат показывает, что система совместного производства может значительно повысить эффективность использования бедных метановоздушных смесей на угольных шахтах. **Практическая значимость:** Совместное использование обедненного метана и биогаза из соломы имеет практическую выгоду — как в экономическом плане, обеспечивая достаточное энергоснабжение в шахтах, так и в качестве задела для широких перспектив на будущее, позволяющего уменьшить затраты энергии, снизить загрязнение окружающей среды, например сократив выбросы углекислого газа.

Ключевые слова: Метан угольных пластов, метановоздушные смеси, биогаз, производство электроэнергии, ресурсосбережение, сокращение выбросов, низкоуглеродные системы.

Введение

Производство и потребление угля как базового ресурса в течение многих лет серьезно влияет на экономику и социальное развитие в России. Несмотря на некоторый спад в использовании этого ресурса и увеличение роли природного газа

в промышленности страны за последние годы, уголь все также остается серьезным игроком на рынке природных ископаемых и имеет важное значение в развитии страны. Среди стран — лидеров по добыче угля наша страна многие годы занимает 6 место [1], а поскольку в энергетическом

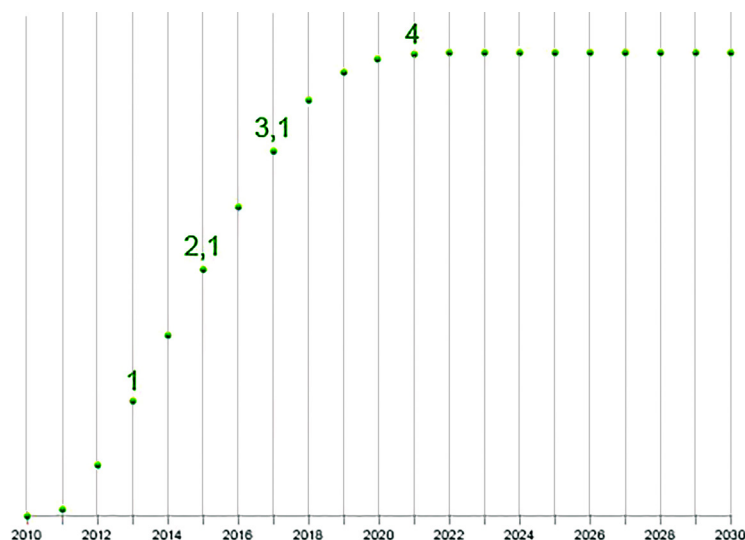


Рис. 1. Объемы добычи шахтного метана в Кузбассе, млрд м³/ год [4]

балансе страны доля угля составляет 11 % [2], то можно сделать вывод, что выбросы углекислого газа в процессе работы на этом топливе остаются внушительными. Стоит подчеркнуть, что эти выбросы помимо непосредственного сжигания угля появляются и при его добыче в виде низкоконцентрированного метана (< 10 %), который выбрасывается в атмосферу без эффективного дополнительного использования.

Метан, будучи антропогенным парниковым газом и обладающим громадным потенциалом для способствования глобальному потеплению в течение века по сравнению с углекислым газом [3], наносит огромный урон климату планеты — глобальное потепление уже стало экологической проблемой, требующей повышенного внимания. Бешеные темпы развития промышленности приводят к увеличению спроса на источники энергии, что, в свою очередь, вызывает дефицит легкодоступных источников топлива. Противопоставление экономики страны и окружающей среды — это проблема и вызов для развития России, но концепция низкоуглеродного перехода энергетики страны должна привести к сокращению вредных выбросов в атмосферу.

Рассмотрим шахтный метан, побочный продукт угледобычи, в качестве кандидата для низкоуглеродного перехода энергетической системы. Выбросы углерода при сжигании или утилизации шахтного метана, по сравнению с ископаемым топливом, намного ниже, есть возможность использовать как запасное топливо, компенсация нехватки возобновляемых источников энергии — вот 3 составляющих, которые позволят защитить окружающую среду и увеличить экономический эффект от его использования.

Прогнозируемые объемы метана в основных угольных бассейнах России, таких как Кузбасс и Печорский район, — 49 трлн м³, что составляет примерно 20 % от прогнозируемых ресурсов природного газа в России. На данный момент времени ежегодно только 0,5 млрд м³ метана/год удаляется системами шахтной дегазации [4].

Важно отметить, что процесс целенаправленной добычи шахтного метана все-таки был запущен в Кузбассе на одном из месторождений и начал давать свои плоды — за последние годы добыто более 10 млрд м³ шахтного метана. Подземная добыча метана угольных пластов, объем и коэффициент использования в России с 2008 по 2020 год показаны на рис. 1.

Итоговый объем потребления топливно-энергетических ресурсов в РФ

Топливо-энергетический ресурс	2017	2018	2019	2020
Всего (в том числе по видам топлива и энергии, процентов), млн т условного топлива в угольном эквиваленте	923	945	933	885
Электричество	36,5	36,7	37,0	38,2
Газообразное топливо	22,2	23,8	23,7	22,6
Тепло	18,2	18,1	17,8	18,4
Жидкое топливо	17,2	16,2	16,4	16,2
Кокс, уголь, торф	4,7	4,2	4,0	3,8
Биомасса и отходы	0,7	0,8	0,9	0,8

Низкоконцентрированный метан (< 30 об. %) из подземных шахт очень тяжело утилизировать ввиду переменчивых условий источника газа, а также сокращений обычных методов сжигания. Метановая генерация энергии в качестве ядра при реализации энергетической системы в угольной шахте уменьшает ее потребность в энергии, что дает экономическую и экологическую выгоду.

Одним из способов эффективного использования запаса отходов при производстве топлива является производство биогаза. Его производство не увеличивает концентрацию углекислого газа в атмосфере, а значит, целесообразно его применять для борьбы с глобальным потеплением и уничтожением отходов. Биогаз получается из биомассы, содержа в себе метан от 45 до 70 % [5]. Несмотря на то, что Российская Федерация обладает огромными ресурсами биомассы, страна их использует мало, как показано в табл. 1 [6].

И хотя на сегодняшний день и нет идеальной схемы развития энергетики страны, основанной на использовании биомассы, а также присутствуют финансовые трудности, использование биогаза как источника электроэнергии позволит быстро перерабатывать отходы сельского и лесного хозяйства, уменьшая выбросы углерода, а значит, сокращая риски потенциальных пожаров и вреда окружающей среде, что, несомненно, вызовет положительный эффект для экономики и экологии в стране.

Метан можно использовать как источник энергии, поэтому грамотное получение и применение его позволит сберечь как энергию, так и окружающую среду. Представим систему совместного производства на основе отбензиненного метана и биогаза для выработки электроэнергии в угольных шахтах. Биогаз в зависимости от концентрации метана (от низкой до достаточно большой) контролируется вводится в вышележащий поток метана, тем самым достигается нужная степень смешанного газа, который в дальнейшем производит электроэнергию. Также можно устранить затруднения с нестабильными источниками шахтного газа. Данный способ поможет сократить выбросы парниковых газов и повысить энергоэффективность, перейдя на чистую энергию.

Материалы и методы исследования

Шахтный метан, образующийся в процессе добычи угля, сохраняется в угольном пласте и прилегающих слоях породы. Количество газа, выделяемого в результате горных работ, определяется рангом угля и глубиной залегания в угольном пласте. Как чистая энергия с высокой теплотворной способностью он привлекает все большее внимание, но он также представляет большую опасность при добыче в угольных шахтах. Внезапные взрывы и вспышки газа представляют серьезную опасность для шахтеров, особенно в Кузбасском угольном бассейне. При

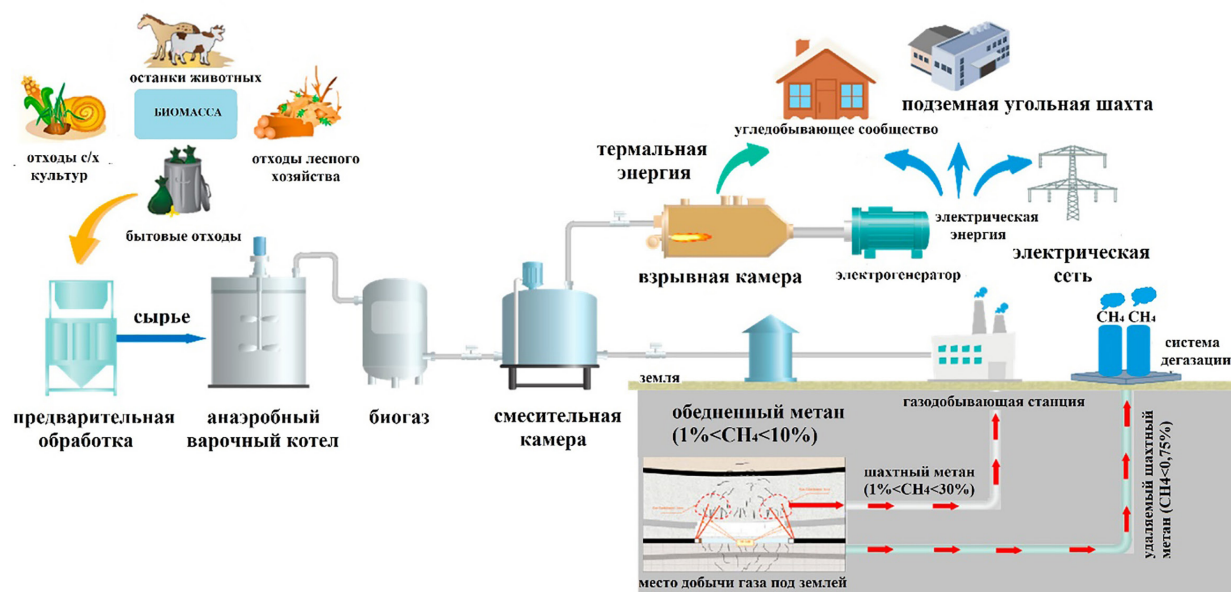


Рис. 2. Система совместного производства с бедным метаном и биогазом для выработки электроэнергии

стабильной подземной добыче угля в России в среднем 105 млн т в год [7] количество аварий доходило до 34 случаев. Поэтому добыча шахтного метана ведется в соответствии с правилами безопасности на угольных шахтах для обеспечения безопасности шахтеров.

Применимость технологий утилизации шахтного метана в основном зависит от концентрации метана. В целом его можно классифицировать следующим образом: метан высокой концентрации ($CH_4 > 80\%$), метан средней концентрации ($CH_4 > 30\%$), метан низкой концентрации ($10\% < CH_4 < 30\%$), метан обедненной концентрации ($1\% < CH_4 < 10\%$) и метан вентиляционного воздуха ($CH_4 < 1\%$).

Шахтный метан с концентрацией менее 10 % составляет 83 % от общего объема шахтного метана, но из-за риска взрыва и неудобства традиционного способа сжигания огромная часть этого неиспользованного метана попадает прямо в атмосферу, загрязняя воздух, при этом теряется большое количество чистой энергии. Необходимы мероприятия для повышения эффективности использования этого обедненного метана для

решения проблемы с энергетическим и экологическим ущербом.

Как страна с богатым сельскохозяйственным производством, Россия обладает богатыми ресурсами биомассы, которые в основном состоят из зерновых, лесных культур и их побочных продуктов, остатков животноводства и органических фракций твердых бытовых отходов (ТБО). Сельское хозяйство в России за 2020 год обеспечило 63 млн т CO_2 -эквивалента в год в виде выбросов в окружающую среду и составило почти столько же, как от добычи твердых ископаемых топлив [6], что говорит о серьезном потенциале для работы по снижению таких выбросов. Биогаз, образующийся с разными концентрациями в процессе ферментации (обычно содержание метана 45–70 %), — это возобновляемый источник энергии, при его использовании для получения энергии снижается зависимость от рынков ископаемого топлива. Его остатки можно использовать как удобрения, повышая урожайность, что, несомненно, положительно скажется на экологическом развитии страны. Анализ имеющихся биогазовых установок выявил, что солома как сырье для производ-

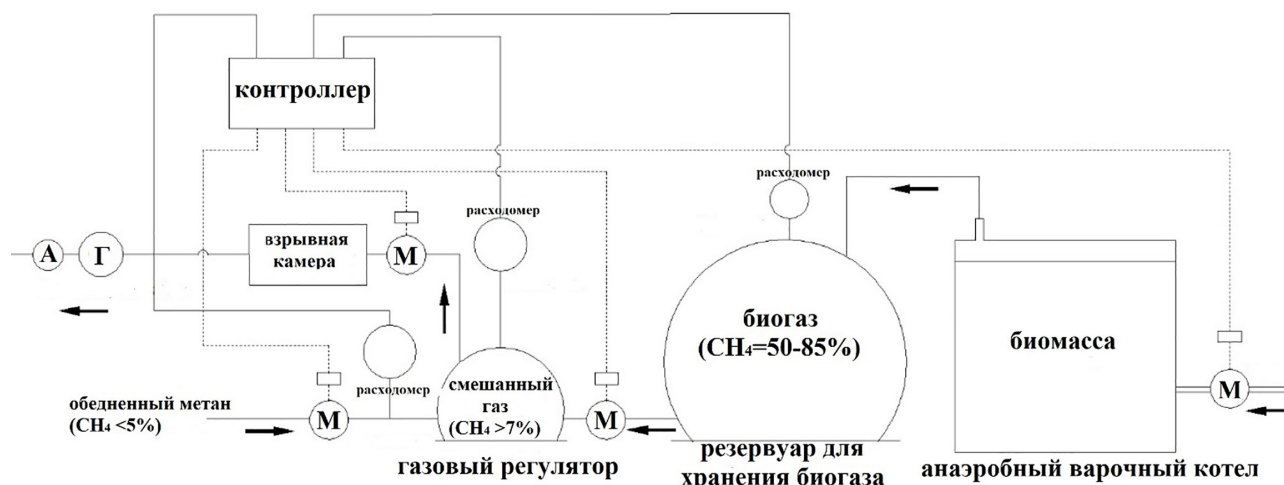


Рис. 3. Система управления совместным производством бедного метана и биогаза в угольных шахтах

ства биогаза — главная доминирующая культура, которая не загрязняет окружающую среду, а также защищает от лесных пожаров. Если использовать собранную в районе добычи топлива сельскохозяйственную солому как сырье для биомассы, можно получить значительный экономический эффект, экономя на транспортировке.

Система производства электроэнергии требует содержания метана до 7 % в смешанном газе. С практической точки зрения в большинстве случаев концентрация бедного метана ниже 5 %, а в части случаев концентрация метана резко меняется, вследствие чего значительная часть метана просто выбрасывается в атмосферный воздух и не будет эффективно использована.

Представим систему совместного производства на основе бедного метана и биогаза для выработки электроэнергии в угольных шахтах (рис. 2) для повышения энергоэффективности.

Данная система позволяет реализовывать полное использование энергии отходов, повышает процент использования обедненного метана, сокращает дефицит и создает устойчивое энергоснабжение. Принцип управления системой совместного производства показан на рис. 3.

Датчики расхода и концентрации непрерывно в режиме реального времени следят за колебани-

ями метана, аналогично происходит контроль за впрыскиваемой в анаэробный реактор биомассой и выходом биогаза.

После подмешивания в трубопровод биогаза с низкой концентрацией метана в резервуаре для хранения биогаза происходит его буферизация. Возможно постепенное открытие и закрытие клапана при помощи контроллера, что позволит системе следить и при необходимости менять концентрацию смешанного газа, необходимой для выработки двигателями, работающими на метане, электроэнергии. В случае изменения концентрации обедненного метана и биогаза система мониторинга газового регулятора будет регулировать скорость всасываемого потока, чтобы получить необходимую концентрацию метана. Это позволит обеспечить стабильную работу источника газа, а системе выработки электроэнергии функционировать без сбоев.

Производимый биогаз образуется из различного сырья, такого как зерновые и лесные культуры, отходы животноводства и бытовые отходы. С помощью анаэробного сбраживания данных отходов получается энергия, сокращающая вредные выбросы метана в окружающую среду. В зависимости от вида сырья меняется и потенциальная эффективность производства газа.

Россия является одним из крупнейших производителей зерна, выращивает его в том числе и в районах, богатых углем, поэтому недостатка в зерновых культурах, например в соломе, в стране нет. И хотя при ее сжигании образуются различные вредные вещества, такие как пыль, оксид азота и диоксид серы, солома, собранная рядом с местом добычи угля, может быть сырьем для поддержания поставок биогаза, что повысит эффективность использования биомассы. Одновременно снизится риск загрязнения атмосферы из-за сжигания соломы на открытом пространстве.

Теплотворная способность биогаза напрямую зависит от содержания в нем метана (теплотворная способность самого метана обычно равна 20–26 МДж/Нм³). В целом на каждую тонну произведенного зерна приходится 1,5 тонны соломы. Объем соломы, который может быть использован, равняется максимальному объему соломы, собранной с поля. Для целей добычи биогаза на угольных шахтах можно рассчитать общую урожайность соломы (1) как отношение всего объема таких ресурсов к коэффициенту их собираемости:

$$V_{\text{сол}} = V_{\text{с.б}}/K_{\text{соб}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{сол}}$ — общая урожайность соломы, т;
 $V_{\text{с.б}}$ — требуемый объем ресурсов соломы для производства биогаза, т;
 $K_{\text{соб}}$ — коэффициент собираемости соломы, равный 0,84 [8].

Общая же площадь сельхозугодий, необходимых для добычи биогаза из соломы, определяется как отношение общей урожайности, выраженной в тоннах соломы к урожайности с одного квадратного метра (2):

$$S_{\text{с/х}} = V_{\text{сол}}/V_{\text{ед}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{с/х}}$ — общая площадь сельскохозяйственных угодий, м²;

$V_{\text{сол}}$ — общая урожайность соломы, т;

$V_{\text{ед}}$ — единичная урожайность соломы, т/м².

Потенциал выработки электроэнергии можно определить следующим образом. Добыча угля считается энергоемким процессом, который требует значительных затрат электроэнергии для работы оборудования (горные машины, обогатительные устройства, конвейеры подачи угля), работающего круглосуточно. Установка метановых электростанций на шахтах повысит утилизацию выбросов метана и уменьшит электропотребление при производстве работ. Электрическая энергия (кВт·ч), которая может быть получена системой совместного производства, оценивается как:

$$P = (V_{\text{ут CH}_4} \cdot C_{\text{CH}_4} \cdot \rho \cdot Q \cdot \lambda \cdot \eta)/3,5, \quad (3)$$

где P — суммарная электрическая энергия при системе совместного производства;

Q — теплотворная способность топлива (для CH₄ принимается равным 48 МДж/кг [9]);

$V_{\text{ут CH}_4}$ — объем утилизации CH₄ в системе совместного производства, м³;

C_{CH_4} — содержание метана, об%;

ρ — плотность CH₄ (принимается равным 0,66 кг/м³);

λ — концентрация метана, 95 %;

3,5 — коэффициент преобразования из МДж в кВт·ч, где η задается 35 % как КПД генератора.

Результаты исследования и их обсуждение

Комплексный анализ системы совместного производства позволил установить следующие положения. Первое — это экономия энергии. Добыча угля потребляет много энергии во время производства и в то же время выбрасывает большое количество шахтного метана от дегазационных установок, который может быть использован для выработки электроэнергии через систему совместного производства энергии. Большинство основных угольных шахт в России являются шахтами

с высоким содержанием сопутствующих газов и относительно богаты метаном угольных пластов.

В отличие от шахтного метана с концентрацией более 30 %, который можно эффективно использовать сразу, обедненный метан из-за непостоянной концентрации метановой составляющей использовать затруднительно, вследствие чего большая часть потенциального ресурса выбрасывается в окружающую среду и загрязняет ее. С учетом больших объемов соломы и других сельскохозяйственных отходов поблизости от угольных разрезов необходимо развивать биогазовую систему и повышать коэффициент использования биогазовой энергии как альтернативных источников электроэнергии.

В заключение следует отметить, что организация системы, совмещающей использование бедного метана и биогаза, поможет достичь рационального использования ресурсов, их экономии, снижения выбросов парниковых газов, обеспечения промышленной безопасности при эксплуатации такого опасного производственного объекта, как угольная шахта. Также сбор органических отходов, в первую очередь представленных соломой, позволит снизить риск пожаров, сократить площади ее хранения, придать ценности энергии, полученной из отходов.

Экологическая составляющая представленной технологии также несомненна [10] ввиду рационального и бережного отношения к ресурсам, в том числе возобновляемым. Значительное использование ископаемых видов энергии приводит к сильному загрязнению окружающей среды, особенно к большим выбросам парниковых газов, таких как CO_2 , поэтому технологии, дающие низкий выброс углекислого газа и прочих парниковых газов, должны рассматриваться как приоритетные и способствующие сохранению природы планеты в целом.

Концепция зеленого перехода промышленности и экономики России планомерно развивается и нуждается в энергосберегающих малоотходных технологиях и технологиях, использующих невос-

требованное или вторичное сырье [11], таких как представленная система производства электроэнергии из биогаза и бедных метановоздушных смесей. Утилизация бедного метана в генераторе производства электроэнергии из биогаза – это очень хороший способ снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду, снизить эксплуатационные расходы, получить субсидии для реализации зеленых технологий, толчок к совершенствованию котельного оборудования, расположенного на шахтах, но рискованный с точки зрения взрывоопасности метановоздушных смесей, логистических цепочек, технологических особенностей, законодательства и прибыльности.

Выводы

Одним из главных источников выбросов газа в атмосферу является метан угольных шахт, обладающий высоким парниковым эффектом, поэтому необходимо провести экологические мероприятия по сокращению выбросов метана в атмосферу при добыче угля. Предлагается использовать систему совместного использования обедненного метана угольных пластов и биогаза для выработки электроэнергии на угольных шахтах — это позволит сберечь энергию, повысить эффективность развития производства и защитить атмосферу от вредных выбросов.

Было подобрано такое количество биогаза, которое необходимо для работы системы, а также соответствующая площадь сельскохозяйственных угодий и количество соломы, что доказывает целесообразность внедрения системы совместного производства в горнодобывающем районе. Кроме того, была проведена оценка потенциального производства электроэнергии и сокращения парникового эффекта. Рассмотренная система может эффективно интегрировать региональные ресурсы, превратить отходы в богатство, реализовать энергосбережение, сокращение выбросов и устойчивую чистую энергию на угольных шахтах.

Для энергосбережения в районах угольных шахт и замены нынешних источников тепла и электричества в шахтах рекомендуется использование системы совместного производства, что повысит эффективность использования электроэнергии изолированных ресурсов в районе угольных шахт, принесет экономический эффект угледобывающим предприятиям, сократит выбросы в атмосферу таких вредных веществ, как углерод и метан, и будет полностью соответствовать политике РФ в области экологии окружающей среды.

Библиографический список

1. Global coal production slumps in 2020. Yet looks to increase in 2021. — URL: <https://www.iea.org/reports/coal-2020/supply> (дата обращения: 12 января 2022).
2. Statistical Review of World Energy 2022/71st edition. — URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf> (дата обращения: 28.06.2022).
3. IPCC Climate Change 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III, Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014. — P. 151.
4. О перспективах добычи в России угольного газа. — URL: <https://www.gazprom.ru/about/production/extraction/metan/?ysclid=lh66my8nfp78333850> (дата обращения: 11.11.2022).
5. Биогaz из соломы. — URL: <https://zorg-biogaz.com/ru/blog/biogaz-iz-solomy> (дата обращения: 27.01.2023).
6. Охрана окружающей среды в России. — М.: Стат. сб. / Росстат, 2022. — 115 с.
7. Анализ аварийности и пожароопасности угольных шахт // Вестник. — 2018. — № 4. — 39 с.
8. Михалев С. С. Кормопроизводство с основами земледелия / С. С. Михалев, Н. Ф. Хохлов, Н. Н. Лазарев. — М.: ИНФРА-М, 2021. — С. 259–261.
9. Удельная теплота сгорания топлива и горючих материалов. — URL: <http://thermalinfo.ru/eto-interesno/udelnaya-teplota-sgoraniya-topliva-i-goryuchih-materialov#teplota-sgoraniya-gazoobraznogo-topliva> (дата обращения: 05.04.2023).
10. Харитоненко А. Л. Влияние технологий по очистке резервуаров от нефтепродуктов на окружающую / А. Л. Харитоненко, Я. В. Зачиняев, Т. С. Титова и др. // Экологическая химия. — 2013. — Т. 22. — № 4. — С. 198–202.
11. Машарский Б. Л. Безопасность жизнедеятельности. Законодательные и нормативно-правовые акты по промышленной безопасности, охране труда и экологии / Б. Л. Машарский, О. И. Тихомиров, А. Б. Завьялов // Электронный практикум. — СПб., 2022.

Дата поступления: 10.07.2023

Решение о публикации: 28.08.2023

Контактная информация:

ХАРИТОНЕНКО Александр Леонидович — канд. техн. наук, доц.; tsar-87@mail.ru
 ЗАВЬЯЛОВ Алексей Борисович — ассистент, аспирант; zenitpiter91@inbox.ru
 ЗАЧИНЯЕВ Ярослав Васильевич — д-р хим. наук, проф.; iaroslav@hotmail.com

A System for the Joint Use of Coalbed Lean Methane and Biogas to Generate Electricity in Coal Mines

A. L. Kharitonenko¹, A. B. Zavyalov¹, Ya. V. Zachinyaev²

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Petrozavodsk State University, 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, 185910, Russian Federation

For citation: Kharitonenko A. L., Zavyalov A. B., Zachinyaev Ya. V. A System for the Joint Use of Coalbed Lean Methane and Biogas to Generate Electricity in Coal Mines // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 595–603. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-595-603

Summary

Purpose: Justification and development of new resource-saving technologies aimed at utilization of coal bed methane. The problem of low efficiency of utilization of lean methane-air mixtures is primarily due to the low content of methane itself, which varies significantly depending on the type of coal or concentration. This paper discusses the concept of a co-production system that mixes low-methane methane-air mixtures and biogas to generate power. **Methods:** Analysis of the possible volumes of utilized methane, biogas requirements and the suitability of the primary feedstock for co-generation of heat and electricity. Selection of appropriate parameters for the processes of utilization of mine methane. Analysis of the merits of the proposed method of utilization of lean coal mine methane. **Results:** It is recommended that biogas produced by agriculture and forestry in the vicinity of the mines be added to the dry methane stream to obtain the necessary gas concentration for electricity generation. Potential electricity production and greenhouse gas emission reductions have also been evaluated. The result shows that the co-production system can significantly improve the efficiency of poor methane-air mixtures in coal mines. **Practical significance:** The joint use of lean methane and biogas from straw offers practical advantages both economically, ensuring sufficient energy supply in mines, and as a foundation for broad future prospects. It allows for energy cost reduction and environmental pollution reduction, such as decreasing carbon dioxide emissions.

Keywords: Coalbed methane, methane-air mixtures, biogas, power generation, resource conservation, emission reduction, low-carbon systems.

References

1. Global coal production slumps in 2020. Yet looks to increase in 2021. Available at: <https://www.iea.org/reports/coal-2020/supply> (accessed: January 12, 2022).
2. Statistical Review of World Energy 2022/71st edition. Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf> (accessed: June 28, 2022).
3. IPCC Climate Change 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III, Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014, p. 151.
4. *O perspektivah dobychi v Rossii ugol'nogo gaza* [On the prospects for coal gas production in Russia]. Available at: <https://www.gazprom.ru/about/production/extraction/metan/?ysclid=lh66my8nfp78333850> (accessed: November 11, 2022).
5. *Biogaz iz solomy* [biogas from straw]. Available at: <https://zorg-biogaz.com/ru/blog/biogaz-iz-solomy> (accessed: January 27, 2022).
6. *Okhrana okruzhayushchey sredy v Rossii* [Environmental Protection in Russia]. Moscow: Stat. sb. / Rosstat, 2022, p. 115. (In Russian)
7. Analiz avariynosti i pozharoopasnosti ugol'nykh shakht [Analysis of accident rate and fire hazard in coal mines]. *Vestnik* [Bulletin]. 2018, Iss. 4, p. 39. (In Russian)
8. Mixalev S. S., Hohlov N. F., Lazarev N. N. *Kormo-proizvodstvo s osnovami zemledeliya* [Fodder production with the basics of farming]. Moscow: INFRA-M Publ., 2021, pp. 259–261. (In Russian)
9. *Udel'naya teplota sgoraniya topliva i goryuchih materialov* [Specific heat of combustion of fuel and combustibles]. Available at: <http://thermalinfo.ru/eto-interesno/udel'naya-teplota-sgoraniya-topliva-i-goryuchih-materialov#teplota-sgoraniya-gazooobraznogo-topliva> (accessed: March 5, 2023).
10. Haritonenko A. L., Zachinyaev Ya. V., Titova T. S. et al. Vliyanie texnologij po ochistke rezervuarov ot nefteproduktov na okruzhayushchuyu [Impact of oil tank cleaning technologies on the environment]. *Ekologicheskaya khimiya* [Ecological chemistry]. 2013, vol. 22, Iss. 4, pp. 198–202. (In Russian)
11. Masharskij B. L., Tixomirov O. I., Zav'yalov A. B. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Zakonodatel'ny'e i normativno-pravovy'e akty' po promy'shlennoj bezopasnosti, ohrane truda i ekologii [Life safety. Legislative and Regulatory Acts on Industrial Safety, Labor Protection and Ecology]. *E'lektronny'j praktikum* [Electronic workshop]. St. Petersburg, 2022. (In Russian)

Received: July 10, 2023

Accepted: August 28, 2023

Author's information:

Alexander L. KHARITONENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; tsar-87@mail.ru
Alexey B. ZAVYALOV — Assistant, Postgraduate Student; zenitpiter91@inbox.ru
Yaroslav V. ZACHINYAEV — Dr. Sci. in Chemistry, Professor; iaroslav@hotmail.com