

УДК 622+504.7

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2022

**Замена нефтяного топлива – декарбонизация горнодобывающей промышленности (в качестве обсуждения)****М.Л. Хазин, Р.А. Апакашев**

Уральский государственный горный университет (Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30)

Fuel oil replacement – decarbonizing the mining industry (as discussion)**Mark L. Khazin, Raphael A. Apakashev**

Ural State Mining University (30 Kuybysheva st., Ekaterinburg, 620144, Russian Federation)

Получена / Received: 25.02.2022. Принята / Accepted: 31.05.2022. Опубликовано / Published: 21.12.2022

Ключевые слова:

водород, горные работы, декарбонизация, дизельное топливо, карьерный самосвал, отработавшие газы, топливные элементы, экология.

С началом развития цивилизации люди стали добывать минералы из недр Земли и транспортировать горную массу. Основной статьей расхода при горных работах являются энергозатраты, необходимые для добычи и транспортировки руд, обеспечиваемые за счет электроэнергии или дизельного топлива, которое для горнодобывающих компаний, работающих в отдаленных районах, является основным источником энергии. Существенными недостатками дизельного оборудования являются выделение токсичных веществ, загазованность атмосферы и повышенная дымность, особенно на глубоких горизонтах. В качестве способов уменьшения выбросов углерода и негативного влияния на окружающую среду актуально использование альтернативных топлив, наиболее экологичным из которых является водород. Горное оборудование, работающее на водороде, не загрязняет воздух отработавшими газами, что делает рабочую атмосферу более чистой, особенно в глубоком карьере или при подземном способе добычи. Следует также учитывать, что в то время как стоимость дизельного топлива постоянно возрастает, стоимость водородного топлива с каждым годом понижается. Затраты на дизельное топливо и электроэнергию на горнодобывающих предприятиях часто чрезмерны, учитывая их относительную изолированность. Условия эксплуатации карьерных самосвалов и другого горного оборудования обеспечивают востребованность водородной энергетики в горнодобывающей промышленности в плане ее декарбонизации.

Keywords:

hydrogen, mining, decarbonization, diesel fuel, mining dump truck, exhaust gases, fuel cells, ecology.

With the beginning of the civilization development, people began to extract minerals from the bowels of the Earth and transport the rock mass. The main expense in mining operations is the energy required to extract and transport ores, provided by electricity or diesel fuel, which is the main source of energy for mining companies operating in remote areas. Significant disadvantages of diesel equipment are the release of toxic substances, gas contamination of the atmosphere and increased smoke, especially at deep horizons. As a way to reduce carbon emissions and negative impact on the environment, it is important to use alternative fuels, the most environmentally friendly of which is hydrogen. Hydrogen-powered mining equipment does not pollute the air with exhaust gases, which makes the working atmosphere cleaner, especially in deep quarry or underground mining. It should also be taken into account that while the cost of diesel fuel is constantly increasing, the cost of hydrogen fuel is decreasing every year. Diesel and electricity costs in mining operations are often prohibitive given their relative isolation. The operating conditions of mining trucks and other mining equipment ensure the demand for hydrogen energy in the mining industry in terms of its decarbonization.

© **Хазин Марк Леонтьевич** – доктор технических наук, профессор (тел.: +007 (343) 283 09 56, e-mail: Khasin@ursmu.ru). Контактное лицо для переписки.© **Апакашев Рафаил Абдрахманович** – доктор химических наук, профессор (тел.: +007 (342) 283 09 56, e-mail: parknedra@yandex.com).© **Mark L. Khazin** (Author ID in Scopus: 6506526940) – Doctor of Engineering, Professor (tel.: +007 (343) 283 09 56, e-mail: Khasin@ursmu.ru). The contact person for correspondence.© **Raphael A. Apakashev** (Author ID in Scopus: 6603092433) – Doctor of Chemical Sciences, Professor (tel.: +007 (342) 283 09 56, e-mail: parknedra@yandex.com).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Хазин М.Л., Апакашев Р.А. Замена нефтяного топлива – декарбонизация горнодобывающей промышленности (в качестве обсуждения) // Недропользование. – 2022. – Т.22, №2. – С.93–100. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.2.6

Please cite this article in English as:

Khazin M.L., Apakashev R.A. Fuel oil replacement – decarbonizing the mining industry (as discussion). *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2022, vol.22, no.2, pp.93-100. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.2.6

Введение

Глобальная декарбонизация во многом зависит от экологичности технологии добычи минералов и сырья. Добыча полезных ископаемых представляет собой глобальную отрасль, которая затрагивает литосферу, атмосферу, гидросферу, биосферу и является одной из наиболее энергоемких промышленных видов деятельности. Эти энергетические потребности обеспечиваются чаще всего за счет электричества или дизельного топлива. Вследствие того, что горнодобывающая промышленность существенно зависит от ископаемого топлива, она вносит значительный вклад в глобальное потепление, являясь основным источником углерода. Поэтому горнодобывающие компании сталкиваются с растущим давлением общества, требующим сокращения выбросов парниковых газов. Согласно отчету проекта Carbon Disclosure Project, половина мировых промышленных выбросов парниковых газов в 2015 г. была связана всего с 50 компаниями, работающими в сфере добычи и обработки ископаемого топлива, включая 20 горнодобывающих компаний.

Интенсификация развития горнодобывающей промышленности при широком использовании дизельной техники ухудшает санитарно-гигиенические условия в рабочем пространстве и окружающей среде, поскольку отработавшие газы дизелей содержат тяжелые металлы и другие токсичные вещества [1–3]. Кроме того, воздух, насыщенный отработавшими газами, поступаая в работающий двигатель, не обеспечивает полного сгорания топлива, что приводит к увеличению его расхода и, соответственно, увеличению объема отработавших газов. Загазованность и задымление рабочей атмосферы, особенно на глубоких горизонтах, существенно снижает производительность работы за счет увеличения перерывов и необходимости дополнительных затрат на проветривание карьеров и подземных выработок [4, 5], ухудшения здоровья персонала и видимости на дорогах [6–8]. Постоянное воздействие отработавших газов на организм человека приводит к повреждению сосудов головного мозга, нервной системы и других органов [9, 10], развитию иммунодефицита, бронхита, вызывает онкологические заболевания [11, 12].

С целью уменьшения простоев персонала и оборудования применялись различные способы: искусственное проветривание карьеров, распыление воды и др. [4, 5, 13]. Но ни один из них не привел к решению проблемы, а экологическая обстановка в карьере продолжает ухудшаться [7, 8, 13–16]. В замкнутом пространстве подземной выработки вытяжные условия еще более усложняются, что вынуждает предприятия вкладывать значительные средства в вентиляцию. Согласно данным исследований [5, 16, 17] на вентиляцию приходится 30–40 % общих эксплуатационных затрат на электроэнергию.

Обезуглероживание горнодобывающего оборудования может дать значительные результаты, поскольку только на карьерные дизельные самосвалы приходится 30–50 % общего энергопотребления горного предприятия. В настоящее время в мире работает около 28 000 карьерных самосвалов, дизельные двигатели которых производят 68 млн т CO₂ в год, что соответствует общему следу парниковых газов таких стран, как Новая Зеландия или Финляндия [18].

Истощение руд с более высоким содержанием и легкодоступностью заставляет горнодобывающие компании искать ресурсы, которые находятся в более удаленных и более глубоких местах. При этом объем выбросов отработавших газов увеличивается по мере того, как горнодобывающие компании транспортируют горную массу на все большие расстояния при открытых разработках или добывают руду на более глубоких уровнях при подземных выработках, а принимаемые меры по охране окружающей среды не успевают за темпами роста добычи и переработки [12, 19–22].

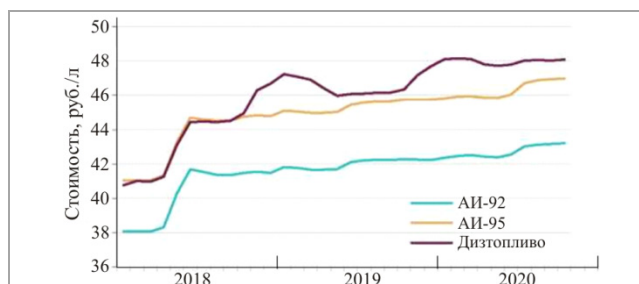


Рис. 1. Розничные цены на бензины и дизтопливо в России (руб./л) [29]

Падение содержания руды также означает, что необходимо добывать, загружать, перевозить, транспортировать и обрабатывать больше материалов, чем ранее. Это увеличивает потребность в энергии для горных работ. Например, при снижении содержания медной руды с 0,4 до 0,2 % потребуется в семь раз больше энергии [23].

Обезуглероживание горнодобывающей отрасли имеет решающее значение для достижения глобальных целей по достижению нулевых выбросов к 2050 г., чтобы сократить расходы и достичь целей по декарбонизации. Это связано с усиливающимся давлением общества, с изменением международных и национальных энергетических стандартов [24], а также возможностью внедрения современных «зеленых» технологий.

Кроме того, к многолетней экологической проблеме горнодобывающего производства добавилось и постоянное увеличение цен на дизельное топливо (рис. 1). Вследствие этого в качестве первого шага горнодобывающие компании рассматривают возможные варианты сокращения выбросов парниковых газов от транспортных средств. Замена дизельного топлива, используемого для транспортирования горной массы, является одним из ключевых моментов, рассматриваемых для достижения сокращения выбросов парниковых газов в ближайшие десятилетия.

Одним из вариантов расширения базы энергоресурсов и уменьшения негативного влияния на окружающую среду является применение альтернативных топлив, которые получают из сырья не нефтяного происхождения [1, 25–28]:

- сжиженный и компримированный природный газ (СПГ и КПГ) (ДСТУ 4047–2001);
- сжиженные углеводородные газы (СУГ) (ДСТУ 4047–2001);
- синтетическое топливо, получаемое из природного газа или угля;
- этанол;
- метанол, диметиловый эфир (ДМЭ), синтетические жидкие углеводороды (СЖУ) (ДСТУ 4058–2001);
- водород (ДСТУ 2655–94).

Основным преимуществом этих видов топлива является меньшее содержание токсичных компонентов в отработавших газах дизельного или бензинового двигателя (таблица). Согласно данным DNV GL, меньше всего парниковых газов выделяется при использовании СПГ – углекислый газ, озон, водяной пар и метан. Но метан производит в 20 раз более сильный парниковый эффект, чем углекислый газ. Поэтому из этих видов топлива наиболее экологически чистым является водород, так как при его сгорании образуется только водяной пар и в незначительном количестве оксид азота (NOx).

Впервые водород в качестве моторного топлива для ДВС применил французский изобретатель Франсуа Исаак де Риваз в 1806 г. Основным достоинством была энергетическая массовая плотность водорода, значительно превышающая значения для дизельного топлива, бензина и метана. В то же время по объемной энергетической плотности даже жидкий водород проигрывает дизелю и бензину в 3,5–4,0 раза. Кроме того, очень сложно решались проблемы хранения и безопасности водорода. По этим причинам начиная с 1870 г.

Выбросы вредных веществ при сгорании различных видов топлива, г/км, по данным [21, 30–34]

| Виды топлива | СО | СН | NOx | CO ₂ | Диоксид серы (SO ₂) | Бенз-а-пирен |
|----------------------------|-----------|----------|---------|-----------------|---------------------------------|---------------|
| Бензин | 25–0,15 | 8,5–0,07 | 9,1–0,1 | 203,1 | 0,009–0,002 | 0,03–0,003 |
| Дизельное топливо | 0,1–1,6 | 0,02–0,2 | 0,7–1,8 | 180,5 | 0,0037 | – |
| Сжиженный нефтяной газ | 19 | 4,8 | 8,7 | – | – | – |
| Сжиженный природный газ | 0,09–0,18 | 0,055 | 0,022 | 189,3 | 0,0018 | – |
| Сжатый природный газ | 8,5–1,5 | 4,5–0,2 | 8,5–0,5 | – | – | 0,0009–0,0003 |
| Бензин в смеси с водородом | 3 | 2,8 | 4,6 | – | – | – |
| Метанол | 28 | 4,6 | 4,4 | – | – | – |
| Метанол в смеси с бензином | 32 | 5,4 | 7,6 | – | – | – |
| Водород | 0 | 0 | 2,5 | – | – | – |

для ДВС стали использовать бензин, а затем и дизельное топливо, забыв про водородное топливо на долгие годы. Стратегические перспективы применения водородного топлива в настоящее время в основном связаны с возможностью уменьшить выбросы парниковых газов.

В качестве достоинств водорода как моторного топлива можно отметить:

- 1) практически нулевые выбросы вредных веществ;
- 2) бесшумность работы;
- 3) более высокая теплотворная способность, в 2–3 раза превышающая количество энергии, получаемой от сопоставимой массы бензина;
- 4) большой запас мощности и крутящий момент;
- 5) комфортные условия работы водителя (минимальные вибрации и отсутствие запаха солянки);
- 6) высокий коэффициент полезного действия;
- 7) отсутствие необходимости охлаждения двигателя;

К недостаткам водорода как моторного топлива относятся:

- 1) высокая летучесть, что создает опасность заполнения водородом замкнутого пространства кабины водителя;
- 2) пожаро- и взрывоопасность при взаимодействии с разогретым выпускным коллектором и моторными маслами;
- 3) отсутствие развитой инфраструктуры (малое количество заправочных станций);
- 4) хранение водорода требует большего объема топливных баков, чем для дизельного топлива;
- 5) отсутствие стандартов применения, хранения и безопасности.

В зависимости от способа получения водород делят на:

- «оранжевый», получаемый электролизом за счет электроэнергии, вырабатываемой АЭС;
- «зеленый», получаемый электролизом с помощью возобновляемых источников энергии (энергии ветра, солнца, воды);
- «голубой», получаемый из углеводородов методом парогововой конверсии (образующийся при этом углекислый газ перерабатывается и не выбрасывается в атмосферу);
- «серый», получаемый из углеводородов методом парогововой конверсии (образующийся при этом углекислый газ выбрасывается в атмосферу);
- «бирюзовый», получаемый методом пиролиза.

При сегодняшней технологии наименее затратным способом получения водорода является паровая конверсия, а наиболее экологическим – электролиз воды, когда чистота выхода водорода близка к 100 %.

Если не учитывать загрязнение окружающей среды при получении электричества, такие установки почти безвредны, поскольку в процессе работы выделяют только водород и кислород. Перспективна также технология пиролиза метана, при которой получают водород и чистый углерод (сажу), не попадающий в атмосферу, но она пока еще находится в стадии разработки. Еще одним безопасным для окружающей среды способом получения водорода является использование реактора с биомассой.

Наиболее перспективными отраслями для использования водорода как средства декарбонизации являются горнодобывающая и металлургическая

промышленность, транспорт и энергетика. Очень перспективно применение автотранспорта на водородных топливных элементах. Количество таких транспортных средств на начало 2020 г. превысило 25 тыс. машин, причем свыше 12 тыс. было продано за 2019 г. (рис. 2) [29].

Потребление водорода в качестве топлива для транспортных средств может составить около 0,4 млн т к 2030 г., что соответствует 0,5 % текущего потребления (рис. 3).

Производство, транспортировка и продажа водорода

Важнейший параметр аккумулятора или бензобака – энергоёмкость. Водород, независимо от способа получения, это весьма неэнергоёмкое топливо, поскольку при содержании эквивалентного количества энергии в комнатных условиях, занимает в 3000 раз больший объем, чем бензин. Поэтому газообразный водород должен быть или сжат (CGH₂), или сжижен криогенным способом (LH₂). Для получения энергии, эквивалентной 1 л бензина, требуется 8 л водорода, сжатого при давлении 40,53 МПа, или 3,73 л жидкого водорода. Жидкий водород имеет высокую энергетическую плотность, но процесс его получения достаточно энергозатратный. Однако транспортировка и заправка жидкого водорода LH₂ отличается высокой экономичностью, и выгода от поставок жидкого газа возрастает пропорционально увеличению спроса на водород на заправочных станциях.

Водородные автозаправочные станции

Водородные автозаправочные станции (ВАЗС) включают в себя раздаточные устройства для заправки автомобилей, компрессоры, системы хранения водорода и охлаждения. Чтобы снизить потери водорода на испарение в процессе хранения, автозаправочные станции должны быть оборудованы специальными теплоизолированными криогенными контейнерами для LH₂. ВАЗС могут обслуживать многие транспортные средства, как и обычные бензозаправочные станции, поскольку время заправки автомобиля составляет 6–8 мин. Оптимальная калибровка водородных заправочных станций является сложной задачей вследствие того, что водород на заправочной станции предоставляется на разных уровнях давления: высокого, среднего и низкого, в диапазоне 35–70 МПа. Чем выше давление, обеспечиваемое заправочной станцией, тем больше необходимо инвестировать в компрессоры (рис. 4). Кроме того, ежедневный спрос, способ производства и форма водорода меняются со временем [40].

Для повышения безопасности хранения и использования водорода рассматриваются различные варианты. В настоящее время в баках с водородом, сжатым до 70 МПа, содержится 5,7 мас.% водорода. Планируется повышение плотности газа до 7,5 мас.% при снижении затрат с 33 долларов за кВт·ч до 8 долларов за кВт·ч. Жидкие органические водородные носители (ЛОНС) достигают плотности 6 мас.% и обеспечивают работу при низком давлении и повышенную безопасность [41].

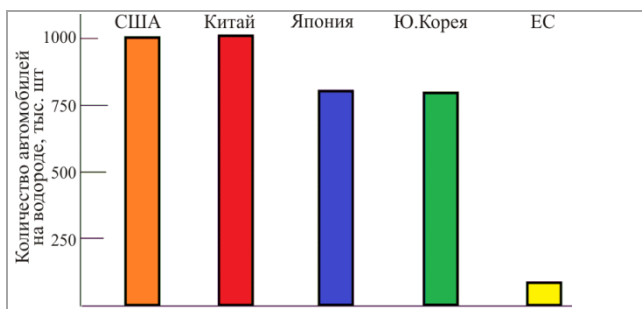


Рис. 2. Структура парка автомобилей на водороде, тыс. шт. Прогноз на 2030 г (по данным [29, 35–39])

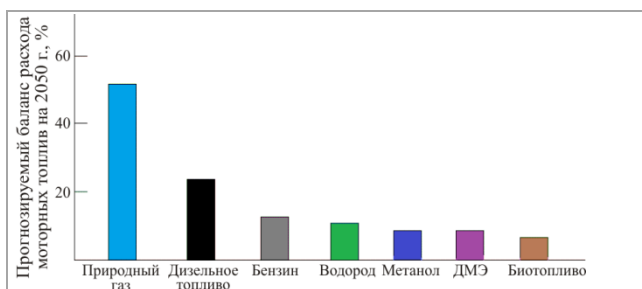


Рис. 3. Прогнозируемый баланс расхода моторных топлив на 2030–2050 гг.

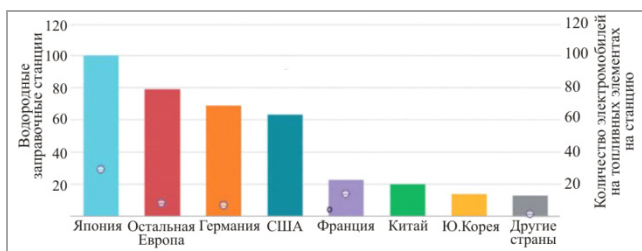


Рис. 4. Водородные заправочные станции и их использование, 2018 г. (по материалам AFC TCP (2019), AFC TCP Survey on the Number of Fuel Cell Electric Vehicles)

Рассматриваются также твердые носители, такие как металлоорганические комплексы, гидриды металлов, углеродные наноструктуры и др. [26, 27, 29, 42]. Их удельная энергоёмкость (около 3 мас.% водорода) сопоставима с газом, сжатым до давления 50 МПа. Поскольку твердые носители работают при атмосферном давлении, то они гораздо безопаснее, чем сжатый или сжиженный водород, что значительно повышает их привлекательность для практического применения. Такие твердые носители уже используются, например, на мотороллерах и подводных лодках.

На основе гидрида магния международной научной группой была разработана паста Powerpaste, сохраняющая в 10 раз больше энергии, чем аналогичные литий-ионные аккумуляторы [43]. Поскольку паста является текучей и перекачиваемой, то для заправки транспортных средств можно использовать обычное заправочное оборудование после его небольшой модернизации. Стоимость такой модернизации составляет несколько десятков тысяч евро, тогда как стоимость ВАЗС высокого давления составляет 1–2 млн евро за одну колонку. Транспортировать пасту можно в обычных цистернах, поэтому нет необходимости в криогенном оборудовании или дорогих резервуарах под давлением. Для заправки транспортного средства достаточно просто заменить картридж с пастой и добавить немного воды. Поэтому паста Powerpaste может быть использована и при отсутствии водородных заправочных станций.

Постепенно будет осуществляться переход на электротранспорт, что экологически и экономически целесообразно. В настоящее время такой транспорт

использует аккумуляторные или троллейные системы, но у них имеются следующие недостатки: малая энергоёмкость (для литий-ионного аккумулятора это максимум 250 Ватт-часов на килограмм, тогда как для большегрузного электротранспорта требуется емкость минимум 600–700 Ватт-часов на килограмм) и длительное время зарядки аккумулятора.

В отличие от дизельных двигателей, водородные топливные элементы работают без вибраций и шума, имеют в среднем КПД 45 % против 35 % у дизельных двигателей, а баллона размером со стандартный бензобак им хватает на то, чтобы проехать 500–600 км [40–42]. При этом среднее время работы водородных топливных элементов составляет от 8 до 10 лет, а переход к массовому производству неизбежно приведет к существенному снижению их стоимости.

Водород в горнодобывающей промышленности

Горнодобывающие предприятия используют огромное количество дизельного топлива, а для компаний, работающих в отдаленных районах, оно является единственным источником энергии. Но водородная энергетика может все это изменить. Водород может стать источником энергии для многих энергоёмких операций:

- погрузки горной массы в самосвалы или ж/д вагоны;
- транспортировки горной массы карьерными самосвалами или карьерным железнодорожным транспортом;
- перевозки персонала малыми и средними транспортными средствами.

Основным движущим фактором перехода к водородному производству при подземных работах могут оказаться требования к содержанию твердых частиц дизельного топлива (DPM) в атмосфере выработок, так как еще в 2012 г. Всемирная организация здравоохранения объявила DPM в замкнутых пространствах канцерогенными. Поэтому для подземного производства имеются два возможных варианта: повысить мощность вентиляции или снизить количество DPM, выделяемых дизельным оборудованием. При соответствии новым требованиям стоимость вентиляции резко возрастет. С другой стороны, убрав дизельное оборудование из-под земли, предприятие может сэкономить до 50 % затрат на проветривание. Для крупной горнодобывающей компании это может составить от сотен тысяч до миллиона долларов в год. В связи с этим в горнодобывающей и строительной отраслях начинается постепенный переход на тяжелое оборудование с нулевым уровнем выбросов на основе использования водородных топливных элементов.

Горнодобывающая компания Anglo American и французская энергетическая компания Engie объявили о заключении партнерского соглашения для создания первого карьерного самосвала класса UFCEV (Ultra-class Fuel Cell Electric Vehicle) массой 290 т на водородном топливе. Дизельный двигатель грузовика заменяется модулем водородных топливных элементов в паре с масштабируемой высокомошной модульной литий-ионной аккумуляторной системой, управляемой высоковольтным блоком распределения энергии, обеспечивающим накопление энергии более 1000 кВт·ч. Самосвал также оснащается рекуперативной тормозной системой, что позволяет возвращать в аккумуляторные батареи часть энергии, вырабатываемой при движении автомобиля под уклон [44].

В 2020 г. турецко-китайское СП JMC Heavy Duty Vehicle Co., Ltd представило тягач JMC Veuron 4 × 2 FCV на водородных топливных элементах с электромотором мощностью 250 кВт и крутящим моментом 1600 Н·м. Китайский производитель двигателей Weichai Power совместно с CRRС Yongji разработал 200-тонный карьерный самосвал CR240E на топливных элементах мощностью 800 кВт. Радиус действия самосвала на одной заправке составляет 400 км при максимальной скорости 85 км/ч [45] (рис. 5, а). Испытания самосвала в карьере начались в конце 2021 г.



Рис. 5. Техника, работающая на водородном топливе: а – водородный карьерный самосвал CR240E компании CRRC Yongji; б – экскаватор JCB с приводом от водородных топливных элементов (по материалам [46])

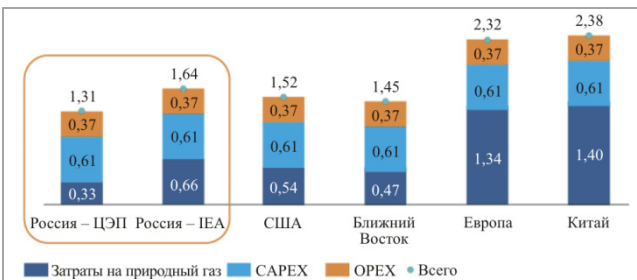


Рис. 6. Стоимость производства водорода из природного газа с учетом затрат на улавливание, хранение и утилизацию углекислого газа (CCUS), долл./к [47]

Английская машиностроительная фирма JCB, лидирующая в секторе нулевых и низкоуглеродных технологий, уже применяет 20-тонный экскаватор 220X, работающий на топливных элементах (рис. 5, б). Это первый в строительной отрасли экскаватор, работающий на водороде.

В горнодобывающей промышленности и строительстве только водородные топливные элементы обеспечивают сопоставимые с дизелем мобильность, мощность и безопасность без каких-либо выбросов. Транспортные средства, работающие на топливных элементах, также обладают реальными экологическими преимуществами: они не наполняют воздух дизельными парами, что делает рабочее место более чистым, особенно в подземных шахтах.

Поскольку водород набирает обороты как альтернатива нефтяному топливу, горные предприятия могут направить свои ресурсы возобновляемой энергии на производство водорода, который может стать устойчивым центром доходов. Хотя еще предстоит преодолеть значительные препятствия, прежде чем более широкая водородная экономика будет взята за основу, эти препятствия для горнодобывающей промышленности меньше, чем для большинства других отраслей. У горнодобывающих компаний есть возможность изменить общественное мнение об их приверженности делу охраны окружающей среды и стать искрой, разжигающей мировую водородную экономику.

Проблемы и перспективы развития водородной энергетики в России

В Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 г. (ЭС-2035) водородная энергетика обозначена в качестве одного из перспективных направлений развития. В октябре 2020 г. утвержден план мероприятий («дорожная карта») по развитию водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 г. План предусматривает формирование и реализацию мер государственной поддержки проектов, совершенствование нормативно-правовой базы в области водородной энергетики, проведение НИОКР и укрепление позиций российских компаний на рынках сбыта водорода. Планируется при участии ГК «Росатом» и ПАО «Газпром» создать ряд пилотных установок низкоуглеродного производства водорода и разработать опытный образец железнодорожного транспорта на водороде. В настоящее время РЖД и «Трансмашхолдинг» покупают малые локомотивы на водородной тяге за рубежом и совместно с «Росатомом» создают водородный кластер на Сахалине, ГАЗ и «Автотор» планируют производить водородные грузовики и легковые автомобили, а КамАЗ – водородные автобусы. Можно отметить, что водородный электротранспорт, в том числе железнодорожный, может уже сейчас стать экономически оправданным даже без особой поддержки государства. Например, большие локомотивы, работающие на водороде, количеством пятнадцать штук, уже несколько лет эксплуатируются в Германии, а автобусы на водороде ездят по Европе на протяжении двадцати лет. При этом имеется достаточное количество ВЭС для их обеспечения.

Хотя в Водородной стратегии ЕС приоритет отдается «зеленому» водороду, произведенному с использованием электроэнергии ВИЭ, пока возможно использовать и водород, который получают из низкоуглеродных источников электроэнергии (в том числе и из ископаемого топлива в комбинации с технологиями CCS). В этом плане для России представляет интерес производство «безуглеродного» или «углеродно нейтрального» водорода на базе электроэнергии, вырабатываемой ГЭС, АЭС, ВИЭ и традиционными энергоносителями в комбинации с технологиями CCS.

По данным МЭА и ЦЭНЭФ, в России водород в основном производится и используется в химической, нефтегазохимической и нефтеперерабатывающей промышленности, что соответствует общемировой структуре спроса на водород. Перспективы развития водородной энергетики в России, согласно Плану и ЭС-2035 в настоящее время, главным образом, направлены на экспорт водорода. При этом в соответствии с ЭС-2035 Россия должна войти в число мировых лидеров-экспортеров водорода, для чего намечены следующие показатели: 2,2 млрд м³ в 2024 г. и 22,2 млрд м³ в 2035 г. Согласно Росстату, производство водорода в России утроилось с 2010 г. и в 2019 г. составило 1,95 млрд м³.

Спад спроса на сырье вследствие COVID-19 дал импульс крупнейшим потребителям российских энергоресурсов (в основном ЕС и Китай), ускорить планы по проведению декарбонизации. Производство и применение водорода позволяет уменьшить выбросы CO₂ и при этом хорошо вписывается в бизнес нефтегазовых компаний. Из всех компаний России более готовой к выходу на рынок водорода является «НОВАТЭК», поскольку покупатели во многом те же, что и у СПГ. «НОВАТЭК» предполагает производить и экспортировать «голубой» и «зеленый» водород (рис. 6). Первая установка по производству водорода будет запущена на действующем проекте «Ямал СПГ», откуда водород можно экспортировать в Азию и Европу. Для реализации этого проекта планируется строительство ветропарков во всех регионах присутствия компании (на Ямале, Гыдане, Камчатке и в Мурманской области).

Транспортировка водорода может осуществляться с использованием имеющейся газотранспортной

инфраструктуры. Пилотные проекты в этом направлении уже реализуются европейскими газовыми компаниями (например, Snam (Италия), National Grid и Northern Gas Networks (Англия) совместно с Equinor).

Реализация водорода конечным потребителям – например, владельцам электромобилей с топливными элементами – тоже потенциально привлекательный сегмент, который может развиваться нефтегазовыми компаниями с помощью их уже существующих сетей заправок. В европейском проекте H2Mobility, направленном на развитие заправочной водородной инфраструктуры, участвуют Total, Shell и австрийская OMV AG. По состоянию на октябрь 2020 г. в рамках проекта функционируют 115 водородных заправок, ожидается ввод еще 50 [48].

Заключение

Горнодобывающая промышленность является энергоемкой отраслью и основным поставщиком сырья для других отраслей, а также основным источником глобальных выбросов парниковых газов вследствие использования нефтяного топлива. Уникальность горнодобывающей промышленности заключается в том, что она является поставщиком и потребителем материалов и топлива для поддержки водородной экономики.

В то же время горнодобывающему сектору доступны многие варианты сокращения производства углерода и использования преимуществ экономии затрат на энергию:

усиление мер по повышению энергоэффективности, расширение использования рекуперации и водорода для удовлетворения потребностей в электроэнергии, транспорте и теплоснабжению. Эти варианты экологически чистой энергии не лишены проблем и в основном остаются неиспользованными в горнодобывающем секторе.

Основными тенденциями и проблемами, формирующими горнодобывающую отрасль и повышающими интерес к замене нефтяного топлива, являются:

1) истощение богатых и легкодоступных руд, что привело к необходимости добывать, загружать, перевозить, транспортировать и обрабатывать больше материалов, а это требует больших затрат энергии и, соответственно, новых инвестиций в энергетические услуги;

2) колебания цен на энергоносители и полезные ископаемые;

3) растущее политическое и социальное беспокойство об окружающей среде по снижению зависимости от ископаемого топлива и улучшения социальных и экологических показателей ГОКов.

Использование энергии водорода, который может храниться и использоваться для производства электроэнергии, транспортирования горной массы и отопления, вызывает интерес в горнодобывающей промышленности. Таким образом, возможности использования водорода в качестве замены нефтяному (дизельному) топливу могут решить некоторые из перечисленных основных проблем, с которыми сталкивается горнодобывающая промышленность.

Библиографический список

- Бойченко С.В., Шкильнюк И.А. Экологические аспекты использования моторных топлив (Обзор) // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2014. – №5-6. – С. 35–44.
- Холод Н.М., Малышев В.С., Эванс М. Снижение выбросов черного углерода карьерными самосвалами // Горная промышленность. – 2015. – № 3 (121). – С. 72–76.
- Эколого-экономическая оценка использования карьерных самосвалов / М.Л. Хазин, П.И. Тарасов, В.В. Фуриков, А.П. Тарасов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2018. – № 7. – С. 85–94. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-7
- Козырев С.А., Амосов П.В. Пути нормализации атмосферы глубоких карьеров // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2014. – Т. 17, № 2. – С. 231–237.
- Старостин И.И., Бондаренко А.В. Проветривание карьеров струйными вентиляторами в комплексе с устройством для аэрации // Наука и образование: научное издание МГТУ им. НЭ Баумана. – 2015. – № 1. – С. 32–41. DOI: 10.7463/0115.0755210
- Koptev V.Y., Kopteva A.V. Developing an Ecological Passport for an Open-Pit Dump Truck to Reduce Negative Effect on Environment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing. – 2017. – Vol. 66, № 1. – P. 012009.
- Шешко О.Е. Эколого-экономическое обоснование возможности снижения нагрузки на природную среду от карьерного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2017. – № 2. – С. 241–252.
- Хазин М.Л., Тарасов А.П. Эколого-экономическая оценка карьерных троллейбусов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 17, № 2. – С. 66–80. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.6
- Kachuri L., Villeneuve P. J., Parent M-É., Johnson K. C. Workplace exposure to diesel and gasoline engine exhausts and the risk of colorectal cancer in Canadian men // Environmental Health. – 2016. – Vol. 15, № 1. – P. 4–16. DOI.org/10.1186/s12940-016-0088-1
- Taxell P., Santonen T. Diesel engine exhaust: basis for occupational exposure limit value // Toxicological Sciences. – 2017. – Vol. 158, № 2. – P. 243–251. DOI: 10.1093/toxsci/kfx110
- Thiruvengadam A., Besch M., Carder D., Oshinuga A. Unregulated greenhouse gas and ammonia emissions from current technology heavy-duty vehicles // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2016. – Vol. 66, № 11. – P. 1045–1060. DOI: 10.1080/10962247.2016.1158751
- Occupational Exposure to Diesel and Gasoline Engine Exhausts and the Risk of Kidney Cancer in Canadian Men / C.E. Peters, M.É. Parent, S.A. Harris [et al.] // Annals of work exposures and health. – 2018. – Vol. 62, № 8. – P. 978–989. DOI: 10.1093/annweh/wxy059
- Морин А.С. Трубопроводная вентиляция на карьерах // Горная промышленность. – 2002. – № 3. – С. 40–43.
- Кузнецов Д.В., Одаев Д.Г., Линьков Я.Е. Особенности выбора технологического автотранспорта для разработки глубоких карьеров Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 5. – С. 54–65.
- Klanfar M., Korman T., Kujundžić T. Potrošnja goriva i koeficijent opterećenja pogonskih motora mehanizacije pri eksploataciji tehničko-građevnog kamena // Tehnički vjesnik. – 2016. – Vol. 23, no. 1. – P. 163–169.
- Гришин Е.Л., Зайцев А.В., Кузьминых Е.Г. Обеспечение безопасных условий деятельности сотрудников по фактору вентиляции в подземных рудниках при работе техники, оснащенной двигателями внутреннего сгорания // Недропользование. – 2020. – Т.20, № 3. – С. 280–290. DOI: 10.15593/2712-8008/2020.3.8
- Viability analysis of underground mining machinery using green hydrogen as a fuel / C.F. Guerra, L. Reyes-Bozob, E. Vyhmeister [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – Vol. 45, no. 8. – P. 5112–5121. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.07.250
- Pocard N. How Proven Fuel Cell Technology Is Decarbonizing Mining and Construction. 2021 [Электронный ресурс]. – URL: <https://blog.ballard.com/decarbonizing-mining-and-construction> (дата обращения: 07.09.2021).
- Immink H., Louw R.T., Brent A.C. Tracking decarbonisation in the mining sector // Journal of Energy in Southern Africa. – 2018. – Vol. 29, no. 1. – P. 14–23. DOI: 10.17159/2413-3051/2018/v29i1a3437
- Humphreys D. Mining productivity and the fourth industrial revolution // Mineral Economics. – 2019. – № 1. – P. 1–11. DOI: 10.1007/s13563-019-00172-9
- IRENA. Global Energy Transformation: A roadmap to 2050, International Renewable Energy Agency. – Abu Dhabi, 2018.
- Integrating Clean Energy in Mining Operations: Opportunities, Challenges, and Enabling Approaches / T. Igogo, T. Lowder, J. Engel-Cox, A. Newman, K. Awuah-Offei // Technical Report. – 2020. – NREL/TP-6A50-76156. July 2020.
- Lezak S., Cannon C., Koch T. Blank, Low-Carbon Metals for a Low-Carbon World: A New Energy Paradigm for Mines, Rocky Mountain Institute, 2019 [Электронный ресурс]. – URL: <https://rmi.org/wp-content/uploads/2019/12/Low-Carbon-Metals-for-a-Low-Carbon-World.pdf> (дата обращения: 07.09.2021).
- Хазин М.Л. Экологические стандарты стран мира для горных машин и оборудования // Недропользование. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 291–300. DOI: 10.15593/2712-8008/2020.3.9
- Афанасьев А.А., Баранов Н.Н. Мировая энергетика: глобальные проблемы и перспективы развития // Энергия: экономика, техника, экология. – 2021. – № 2. – С. 28–47. DOI: 10.7868/S023336192102004X
- Будущее водорода. Использование возможностей сегодняшнего дня. Отчет подготовлен МЭА для саммита G20 в Осаке, Япония // Транспорт на альтернативном топливе. – 2019. – № 5 (71). – С. 12–31.
- Кулагин В.А., Грушевенко Д.А. Сможет ли водород стать топливом будущего? // Теплоэнергетика. – 2020. – № 4. – С. 1–14. DOI: 10.1134/S0040363620040025
- Филиппов С.П., Ярославцев А.Б. Водородная энергетика: перспективы развития и материалы // Успехи химии. – 2021. – Т. 90, № 6. – С. 627–643. DOI: 10.1070/RCR5014
- Водородная энергетика [Электронный ресурс] / В. Гимади, А. Амирагян, И. Поминова [и др.] // Энергетический бюллетень. – 2020. – № 89. – URL: https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo/energo_oct_2020.pdf (дата обращения: 07.09.2021).
- Улучшение качества сжиженного углеводородного газа введением присадок / П.И. Топильнички, В.В. Романчук, А.Ф. Пушак, В.А. Пушак // Химическая техника. – 2014. – № 12. – С. 38.
- Kalantari H., Ghoreishi-Madiseh S. A., Sasmito A. P. Hybrid Renewable Hydrogen Energy Solution for Application in Remote Mines // Energies. – 2020. – Vol. 13. – P. 6365–6388. DOI: 10.3390/en13236365

32. Карпов А.Б., Кондратенко А. Д. Синтетическое топливо vs СПГ Сравнительный анализ использования в качестве моторного топлива // Деловой журнал Neftgaz.RU. – 2019. – № 10 (94). – С. 42–51.
33. Куличенков В.П. Использование водорода в качестве топлива для транспортных средств // Энергетика за рубежом. Приложение к журналу «Энергетик». – 2019. – № 3. – С. 31–38.
34. Ferrara A., Jakubek S., Hametner C. Energy management of heavy-duty fuel cell vehicles in real-world driving scenarios: Robust design of strategies to maximize the hydrogen economy and system lifetime // Energy Conversion and Management. – 2021. – Vol. 232. – P. 113795.
35. Electrification of Medium- and Heavy-Duty Ground Transportation: Status Report / K.L. Fleming, A.L. Brown, L. Fulton [et al.] // Curr Sustainable Renewable Energy Rep. – 2021. DOI: 10.1007/s40518-021-00187-3
36. Rudolf T., Schürmann T., Schwab S. Toward Holistic Energy Management Strategies for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles in Heavy-Duty Applications // PROCEEDINGS OF THE IEEE. – 2021. – Vol. 109, no. 6. – P. 10941–1114.
37. An effective strategy for hydrogen supply: catalytic acceptorless dehydrogenation of N-heterocycles / Y. Zhang, J. Wang, F. Zhou, J. Liua // Catalysis Science & Technology. – 2021. – Vol. 11. – P. 3990–4007. DOI: 10.1039/D1CY00138H
39. Synthesis and characterisation of hydrogen fuel from bio-waste recovery / R.S. Balimane, T.M. Rakshit, B.S. Vijetha, P. Lokesh, A. Rupesh // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2311. – P. 090019. DOI: 10.1063/5.0034505
40. Maroufmashat A., Fowler M. Transition of Future Energy System Infrastructure; through Power-to-Gas Pathways // Energies. – 2017. – No. 10. – P. 1089. DOI: 10.3390/en10081089
41. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system / I. Staffell, D. Scamman, A.V. Abad, P. Balcombe [et al.] // Energy Environ. Sci. – 2019. – Vol. 12. – P. 463–491. DOI: 10.1039/C8EE01157E
42. Materials for hydrogen-based energy storage – past, recent progress and future outlook / M. Hirscher, V.A. Yartys, M. Baricco [et. al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 827. – P. 153548. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.153548
43. Прорыв в водородном топливе – создана высокоэффективная паста Powerpaste [Электронный ресурс]. – URL: <https://zen.yandex.ru/media/energoфикс/proryv-v-vodorodnom-toplive-sozdana-vysokoeffektivnaia-pasta-powerpaste-60281d4d331cb763520172f3> (дата обращения: 07.09.2021).
44. Anglo American построит крупнейший автомобиль на водородном топливе. [Электронный ресурс]. – URL: <https://regnum.ru/news/it/2866425.html> (дата обращения: 07.09.2021).
45. Первый в мире тяжелый грузовик на топливных элементах Hyundai XCIENT Fuel Cell направляется в Европу для коммерческого использования. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.hyundai-avtomir.ru/news/perviy-v-mire-tyazhelyj-gruzovik-na-toplivnyh-ehlementah-hyundai-xcient-fuel-cell-napravlyetsya-v-evropu-dlya-kommercheskogo-ispolzovaniya/> (дата обращения: 07.09.2021).
46. How Proven Fuel Cell Technology Is Decarbonizing Mining and Construction. – URL: <https://blog.ballard.com/decarbonizing-mining-and-construction> (дата обращения: 01.12.2012).
47. Масепенанов А.М. Водородная энергетика России: состояние и перспективы // Энергетическая политика. – 2020. – № 12(154). – С. 54–64. DOI: 10.46920/2409-5516_2020_12154_54
48. Декарбонизация нефтегазовой отрасли: международный опыт и приоритеты России / Т. Митрова, И. Гайда, Е. Грушевенко, С. Капитонов [и др.]. – М.: Сколково, 2021. – 158 с.

References

- Boichenko S.V., Shkil'niuk I.A. Ekologicheskie aspekty ispol'zovaniia motornykh topliv (Obzor) [Ecological Aspects of Petroleum Motor Fuels Usage (Review)]. *Energotekhnologii i resursosberezhenie*, 2014, no. 5-6, pp. 35-44.
- Kholod N.M., Malyshev V.S., Evans M. Snizhenie vybrosov chernogo ugleroda kar'ernymi samosvalami [Reducing black carbon emissions from mining trucks]. *Gornaia promyshlennost'*, 2015, no. 3 (121), pp. 72-76.
- Khazin M.L., Tarasov P.I., Fuzrikov V.V., Tarasov A.P. Ekologo-ekonomicheskaiia otsenka ispol'zovaniia kar'ernykh samosvalov [Ecological and economic evaluation of open pit dump trucks use]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2018, no. 7, pp. 85-94. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-7
- Kozzyrev S.A., Amosov P.V. Puti normalizatsii atmosfery glubokikh kar'erov [Ways of atmosphere normalization of deep open-pits]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 2, pp. 231-237.
- Starostin I.I., Bondarenko A.V. Provetriwanie kar'erov struinymi ventilatorami v komplekse s ustroistvom dlia aeratsii [Jet Fans Airing Quarries in Combination with a Device for Aerating]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU imeni N.E. Baumana*, 2015, no. 1, pp. 32-41. DOI: 10.7463/0115.0755210
- Koptev V.Y., Kopteva A.V. Developing an Ecological Passport for an Open-Pit Dump Truck to Reduce Negative Effect on Environment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2017, vol. 66, no. 1, 012009 p. DOI 10.1088/1755-1315/66/1/012009
- Sheshko O.E. Ekologo-ekonomicheskoe obosnovanie vozmozhnosti snizheniia nagruzki na prirodnuuiu sredu ot kar'ernogo transporta [Ecological and economic substantiation of the possibility to reduce the load on the nature environment from open pit transport]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2017, no. 2, pp. 241-252.
- Khazin M.L., Tarasov A.P. Ekologo-ekonomicheskaiia otsenka kar'ernykh trolleivozov [Ecological and economic evaluation of quarry trolley trucks]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*, 2018, vol. 17, no. 2, pp. 66-80. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.6
- Kachuri L., Villeneuve P. J., Parent M.-É., Johnson K. C. Workplace exposure to diesel and gasoline engine exhausts and the risk of colorectal cancer in Canadian men. *Environmental Health*, 2016, vol. 15, no. 1, pp. 4-16. DOI.org/10.1186/s12940-016-0088-1
- Taxell P., Santonen T. Diesel engine exhaust: basis for occupational exposure limit value. *Toxicological Sciences*, 2017, vol. 158, no. 2, pp. 243-251. DOI: 10.1093/toxsci/kfx110
- Thiruvengadam A., Besch M., Carder D., Oshinuga A. Unregulated greenhouse gas and ammonia emissions from current technology heavy-duty vehicles. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2016, vol. 66, no. 11, pp. 1045-1060. DOI: 10.1080/10962247.2016.1158751
- Peters C.E., Parent M.E., Harris S.A. et al. Occupational Exposure to Diesel and Gasoline Engine Exhausts and the Risk of Kidney Cancer in Canadian Men. *Annals of work exposures and health*, 2018, vol. 62, no. 8, pp. 978-989. DOI: 10.1093/annweh/wxy059
- Morin A.S. Truboprovodnaia ventilatsiia na kar'erakh [Piping ventilation in quarries]. *Gornaia promyshlennost'*, 2002, no. 3, pp. 40-43.
- Kuznetsov D.V., Odaev D.G., Lin'kov Ia.E. Osobennosti vybora tekhnologicheskogo avtotransporta dlia razrabotki glubokikh kar'erov Severa [Peculiarities of technological motor transport selection used for Deep North open pits operation]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2017, no. 5, pp. 54-65.
- Klanfar M., Korman T., Kujundžić T. Potrošnja goriva i koeficijenti opterećenja pogonskih motora mehanizacije pri eksploataciji tehničko-gradevnog kamena. *Tehnički vjesnik*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 163-169. DOI: 10.17559/TV-20141027115647
- Grishin E.L., Zaitsev A.V., Kuz'minykh E.G. Obespechenie bezopasnykh uslovii deiatel'nosti sotrudnikov po faktoru ventilatsiia v podzemnykh rudnikakh pri rabote tekhniki, osnovshchennoi dvigateliami vnutrennego sgoraniia [Ensuring safe workplace conditions when working equipment with internal combustion engines by ventilation in underground mines]. *Nedropol'zovanie*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 280-290. DOI: 10.15593/2712-8008/2020.3.8
- Guerra C.F., Reyes-Bozob L., Vyhmeister E. et al. Viability analysis of underground mining machinery using green hydrogen as a fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, vol. 45, no. 8, pp. 5112-5121. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.07.250
- Pocard N. How Proven Fuel Cell Technology Is Decarbonizing Mining and Construction. 2021, available at: <https://blog.ballard.com/decarbonizing-mining-and-construction> (accessed 07 September 2021).
- Immink H., Louw R.T., Brent A.C. Tracking decarbonisation in the mining sector. *Journal of Energy in Southern Africa*, 2018, vol. 29, no. 1, pp. 14-23. DOI: 10.17159/2413-3051/2018/v29i1a3437
- Humphreys D. Mining productivity and the fourth industrial revolution. *Mineral Economics*, 2019, no. 1, pp. 1-11. DOI: 10.1007/s13563-019-00172-9
- IRENA. Global Energy Transformation: A roadmap to 2050, International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, 2018.
- Igogo T., Lowder T., Engel-Cox J., Newman A., Awuah-Offei K. Integrating Clean Energy in Mining Operations: Opportunities, Challenges, and Enabling Approaches. *Technical Report*, 2020, NREL/TP-6A50-76156. July 2020.
- Lezak S., Cannon C., Koch T. Blank, Low-Carbon Metals for a Low-Carbon World: A New Energy Paradigm for Mines, Rocky Mountain Institute, 2019, available at: <https://rmi.org/wp-content/uploads/2019/12/Low-Carbon-Metals-for-a-Low-Carbon-World.pdf> (accessed 07 September 2021).
- Khazin M.L. Ekologicheskie standarty stran mira dlia gornykh mashin i oborudovaniia [Environmental standards around the world for mining machines and equipment]. *Nedropol'zovanie*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 291-300. DOI: 10.15593/2712-8008/2020.3.9
- Afanas'ev A.A., Baranov N.N. Mirovaia energetika: global'nye problemy i perspektivy razvitiia [World energy: global problems and development prospects]. *Energiia: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 2021, no. 2, pp. 28-47. DOI: 10.7868/S023336192102004X
- Budushchee vodoroda. Ispol'zovanie vozmozhnostei segodniashnego dnia. Otchet podgotovlen MEA dlia sammita G20 v Osake, Iaponiia [The future of hydrogen. Taking advantage of today's opportunities. Report prepared by the IEA for the G20 Summit in Osaka, Japan]. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2019, no. 5 (71), pp. 12-31.
- Kulagin V.A., Grushevenko D.A. Smozhet li vodorod stat' toplivom budushchego? [Can hydrogen become the fuel of the future?]. *Teploenergetika*, 2020, no. 4, pp. 1-14. DOI: 10.1134/S0040363620040025
- Filippov S.P., Iaroslavtsev A.B. Vodorodnaia energetika: perspektivy razvitiia i materialy [Hydrogen energy: development prospects and materials]. *Uspekhi khimii*, 2021, vol. 90, no. 6, pp. 627-643. DOI: 10.1070/RCR5014

29. Gimadi V., Amiragian A., Pominova I. et al. Vodorodnaia energetika [Hydrogen energy]. *Energeticheskii biulleten'*, 2020, no. 89, available at: https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo/energo_oct_2020.pdf (accessed 07 September 2021).
30. Topil'nitskii P.I., Romanchuk V.V., Pushak A.F., Pushak V.A. Uluchshenie kachestva szhizhennogo uglevodorodnogo gaza vvedeniem prisadok [Improving the quality of liquefied petroleum gas by introducing additives]. *Khimicheskaya tekhnika*, 2014, no. 12, 38 p.
31. Kalantari H., Ghoreishi-Madiseh S.A., Sasmito A.P. Hybrid Renewable Hydrogen Energy Solution for Application in Remote Mines. *Energies*, 2020, vol. 13, pp. 6365-6388. DOI: 10.3390/en13236365
32. Karpov A.B., Kondratenko A.D. Sinteticheskoe toplivo vs SPG Sravnitel'nyi analiz ispol'zovaniia v kachestve motornogo topliva [Synthetic fuel vs LNG Comparative analysis of use as a motor fuel]. *Delovoi zhurnal Neftegaz.RU*, 2019, no. 10 (94), pp. 42-51.
33. Kulichenkov V.P. Ispol'zovanie vodoroda v kachestve topliva dlia transportnykh sredstv [Use of hydrogen as fuel for vehicles]. *Energetika za rubezhom. Prilozhenie k zhurnalu "Energetik"*, 2019, no. 3, pp. 31-38.
34. Ferrara A., Jakubek S., Hametner C. Energy management of heavy-duty fuel cell vehicles in real-world driving scenarios: Robust design of strategies to maximize the hydrogen economy and system lifetime. *Energy Conversion and Management*, 2021, vol. 232, 113795 p. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113795
35. Fleming K.L., Brown A.L., Fulton L. et al. Electrification of Medium- and Heavy-Duty Ground Transportation: Status Report. *Curr Sustainable Renewable Energy Rep.*, 2021. DOI: 10.1007/s40518-021-00187-3
36. Rudolf T., Schürmann T., Schwab S. Toward Holistic Energy Management Strategies for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles in Heavy-Duty Applications. *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, 2021, vol. 109, no. 6, pp. 10941-1114. DOI: 10.1109/JPROC.2021.3055136
37. Zhang Y., Wang J., Zhou F., Lina J. An effective strategy for hydrogen supply: catalytic acceptorless dehydrogenation of N-heterocycles. *Catalysis Science & Technology*, 2021, vol. 11, pp. 3990-4007. DOI: 10.1039/D1CY00138H
38. Balimane R.S., Rakshit T.M., Vijetha B.S., Lokesh P., Rupesh A. Synthesis and characterisation of hydrogen fuel from bio-waste recovery. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2311, 090019 p. DOI: 10.1063/5.0034505
39. Maroufmasht A., Fowler M. Transition of Future Energy System Infrastructure; through Power-to-Gas Pathways. *Energies*, 2017, no. 10, 1089 p. DOI: 10.3390/en10081089
40. Staffell I., Scamman D., Abad A.V., Balcombe P. et al. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy Environ. Sci.*, 2019, vol. 12, pp. 463-491. DOI: 10.1039/C8EE01157E
41. Hirscher M., Yartys V.A., Baricco M. et al. Materials for hydrogen-based energy storage - past, recent progress and future outlook. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 827, pp. 153548. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.153548
42. Proryv v vodorodnom toplive - sozdana vysokoeffektivnaia pasta Powerpaste [Breakthrough in hydrogen fuel - high-performance paste Powerpaste is created], available at: <https://zen.yandex.ru/media/energofiksik/proryv-v-vodorodnom-toplive-sozdana-vysokoeffektivnaia-pasta-powerpaste-60281d4d331cb763520172f3> (accessed 07 September 2021).
43. Anglo American postroit krupneishii avtomobil' na vodorodnom toplive [Anglo American will build world's largest hydrogen-powered car], available at: <https://regnum.ru/news/it/2866425.html> (accessed 07 September 2021).
44. Pervyi v mire tiazhelyi gruzovik na toplivnykh elementakh Hyundai XCIENT Fuel Cell napravliaetsia v Evropu dlia kommercheskogo ispol'zovaniia [World's First Heavy Fuel Cell Truck Hyundai XCIENT Fuel Cell Heading to Europe for Commercial Use], available at: <https://www.hyundai-avtomir.ru/news/pervyj-v-mire-tyazhelyj-gruzovik-na-toplivnykh-ehlementah-hyundai-xcient-fuel-cell-napravlyaetsya-v-evropu-dlya-kommercheskogo-ispolzovaniya/> (accessed 07 September 2021).
45. How Proven Fuel Cell Technology Is Decarbonizing Mining and Construction, available at: <https://blog.ballard.com/decarbonizing-mining-and-construction> (accessed 01 December 2012).
46. Mastepanov A.M. Vodorodnaia energetika Rossii: sostoianie i perspektivy [Hydrogen power engineering in Russia: state and prospects]. *Energeticheskaya politika*, 2020, no. 12(154), pp. 54-64. DOI: 10.46920/2409-5516_2020_12154_54
47. Mitrova T., Gaida I., Grushevenko E., Kapitonov S. et al. Dekarbonizatsiia neftegazovoi otrasli: mezhdunarodnyi opyt i priority Rossii [Decarbonization of the Oil and Gas Industry: International Experience and Russia's Priorities]. Moscow: Skolkovo, 2021, 158 p.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
 Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
 Вклад авторов равноценен.