

КАРЬЕРНЫЕ САМОСВАЛЫ НА ВОДОРОДНОМ ТОПЛИВЕ

М.Л. Хазин¹, Р.А. Апакашев¹

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия,
e-mail: Khasin@ursmu.ru

Аннотация: Одной из самых больших статей расхода горного производства являются энергозатраты, необходимые для добычи и переработки минеральных руд, которые обеспечиваются за счет дизельного топлива или электроэнергии. Для горнодобывающих компаний, работающих в отдаленных районах, основным источником энергии является дизельное топливо. Существенный недостаток применения дизельного оборудования — выделение токсичных веществ, загазованность атмосферы и повышенная дымность, особенно на глубоких горизонтах. В качестве способов расширения базы энергоресурсов и уменьшения негативного влияния на окружающую среду актуально применение альтернативных топлив, например, водорода, самого экологичного альтернативного топлива, получаемого с использованием возобновляемой энергии. Самосвалы, работающие на водороде, обладают существенными преимуществами, это подтверждается опытом их эксплуатации в европейских странах, США и Японии. Такие самосвалы не загрязняют воздух отработавшими газами, что делает рабочую атмосферу более чистой, особенно в глубоком карьере или при подземном способе добычи. В то время как стоимость дизельного топлива постоянно возрастает, стоимость водородного топлива с каждым годом понижается. Условия эксплуатации карьерных самосвалов обеспечивают востребованность водородной энергетики в горнодобывающей промышленности. Затраты на дизельное топливо и электроэнергию на горнодобывающих предприятиях часто чрезмерны, учитывая их относительную изолированность. Поэтому горные компании более других заинтересованы в переходе на водородную энергетику.

Ключевые слова: экология, карьерный самосвал, дизельное топливо, горные работы, отработавшие газы, водород, топливные элементы

Для цитирования: Хазин М. Л., Апакашев Р. А. Карьерные самосвалы на водородном топливе // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 1. – С. 47–59. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_47.

Hydrogen-powered mining trucks

M.L. Khazin¹, R.A. Apakashev¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia,
e-mail: Khasin@ursmu.ru

Abstract: One of the largest expense items in the mining industry is power consumed by mineral mining and processing operations and supplied by diesel fuel or electric energy. For mines in remote areas, the main source of energy is diesel fuel. An essential fault in operation of diesel equipment is emission of toxic substances, gas contamination of air and high smokiness,

especially at deep levels in mines. Actually, it is possible to expand energy supply and to abate the adverse effect on the environment using alternative fuels, for instance, hydrogen which is the eco-friendliest alternative fuel produced using renewable energy. Dump trucks powered by hydrogen possess essential benefits, which is proved by their field experience in European countries, in the USA and in Japan. Such dump trucks produce no exhaust gases, which makes air in the work zone purer, especially in deep open pits or in underground mining. While the cost of diesel fuel consistently grows, the cost of hydrogen fuel gets lower year after year. The operational environment of dump trucks guarantees the demand for hydrogen energy in the mining industry. The costs of diesel fuel and electric energy in mining are unreasonable, especially in remote and isolate areas. Mining companies, more than any other, are interested in transition to hydrogen power.

Key words: ecology, dump truck, diesel fuel, mining operations, exhaust gas, hydrogen, fuel cells.

For citation: Khazin M. L., Apakashev R. A. Hydrogen-powered mining trucks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(1):47-59. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_47.

Введение

Горнодобывающая промышленность является одной из наиболее энергоемких производственных отраслей. Повышение спроса на полезные ископаемые в сочетании с падением их содержания в исходной руде увеличивает потребность горнодобывающей промышленности в энергии, которая на сегодня составляет до 6,2% мирового потребления [1–3]. Эта потребность обеспечивается за счет электроэнергии или дизельного топлива.

подавляющее число горных машин и оборудования (экскаваторы, буровые станки, карьерные самосвалы и др.) оснащены дизельными двигателями, значительными недостатками которых являются повышенная дымность и загазованность рабочей атмосферы, особенно на глубоких горизонтах. В настоящее время в мире работает около 28 000 карьерных самосвалов, дизельные двигатели которых выбрасывают 68 млн т CO₂ в год [21]. Увеличение глубины карьеров удлиняет дорожный серпантин и время движения карьерных самосвалов, что приводит, соответственно, к повы-

шению расхода топлива и объема выбросов отработавших газов в 2–3 раза. Условия естественной вентиляции с увеличением глубины карьера ухудшаются, и отработавшие газы накапливаются в рабочей зоне. Загрязненный воздух, поступая в двигатель, не обеспечивает полное сгорание топлива, что вызывает его повышенный расход и дополнительное ухудшение экологической ситуации. В отработавших газах дизельных двигателей содержатся различные вещества, многие из которых токсичны [1, 4], что создает угрозу здоровью работающего персонала и оказывает влияние на производительность труда из-за увеличения перерывов для проветривания карьеров [1, 4–6].

В замкнутом пространстве подземной выработки условия проветривания менее благоприятны, что вынуждает компании вкладывать значительные средства в вентиляцию. По данным фирмы Stantec, при подземных работах на вентиляцию приходится от 30 до 40% общих эксплуатационных затрат на электроэнергию. Перевод оборудования и автотранспорта с дизельного топлива на

электропривод улучшает условия работы и позволяет снизить расходы на вентиляцию почти на 50% [7, 8].

Изменения в сфере энергоснабжения затрагивают все отрасли промышленности, и производственные предприятия вынуждены адаптироваться к новым условиям. Это усиливающееся общественное давление, изменение международных и национальных энергетических стандартов [9], а также возможность внедрения современных «зеленых» технологий. Одновременно горнодобывающие компании стремятся удовлетворить растущий спрос на минералы, снизить эксплуатационные расходы и негативное воздействие на окружающую среду.

Кроме экологических проблем при горных работах следует учитывать непрекращающийся рост цен на моторное топливо (рис. 1).

Теория вопроса

Для уменьшения негативного техногенного влияния на окружающую среду рассматривается использование альтернативных топлив, получаемых из сырья не нефтяного происхождения.

Основными из них являются [10–12]:

- сжиженные углеводородные газы (СУГ, ДСТУ 4047-2001);

- сжиженный и компримированный природный газ (СПГ и КПГ, ДСТУ 4047-2001);

- синтетическое топливо, получаемое из природного газа или угля;

- метанол, диметиловый эфир (ДМЭ), синтетические жидкие углеводороды (СЖУ, ДСТУ 4058-2001);

- этанол;

- водород (ДСТУ 2655-94).

Основным преимуществом альтернативных топлив является уменьшение содержания токсичных компонентов в отработавших газах по сравнению с нефтяным топливом (дизельным или бензином) (табл. 1). Из них наиболее экологически чистым топливом является водород, поскольку при его сгорании образуется только водяной пар.

В зависимости от способа получения водорода различают:

- «зеленый» водород, получаемый электролизом с помощью возобновляемых источников энергии (энергии ветра, солнца, воды);

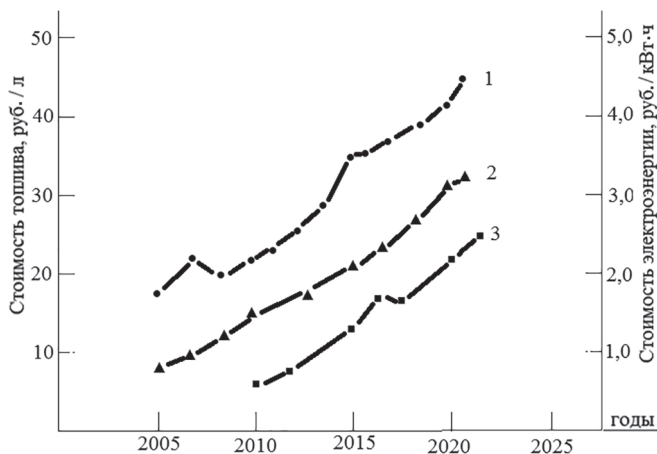


Рис. 1. Динамика стоимости дизельного топлива (1), электроэнергии (2) и природного газа (3) в России (по данным Росстата)

Fig. 1. Dynamics of cost of diesel fuel (1), electric energy (2) and natural gas (3) in Russian (according to the data of the Federal State Statistics Service)

Таблица 1

Загрязняющие вещества отработавших газов двигателя внутреннего сгорания (по данным [10, 11, 13])

Pollutants in combustion engine exhaust (according to [10, 11, 13])

Вид топлива	Загрязняющие вещества, %					
	СО	С _n Н _m	NO _x	Сажа	Бенз(а) пирен	СО ₂
Бензин	100	100	100	100	100	100
Дизельное топливо	10	10	50–65	100	50	70
СУГ	15	60	40–50	3	8	0,6
КПГ	8	7	30–38	1	6	1,0
СПГ	8–10	10–12	18–25	1	2–6	

- «серый» водород, получаемый из углеводородов методом паргазовой конверсии (образующийся при этом углекислый газ выбрасывается в атмосферу);

- «голубой» водород, получаемый тем же способом (но углекислый газ перерабатывается и не выбрасывается в атмосферу);

- «оранжевый» водород, получаемый электролизом за счет электроэнергии, вырабатываемой АЭС;

- «бирюзовый» водород, получаемый методом пиролиза.

К достоинствам водорода как моторного топлива можно отнести следующие:

- практически нулевые выбросы вредных веществ;

- теплотворная способность, обеспечивающая превышение в 2–3 раза количества энергии, получаемой от сопоставимой массы бензина (табл. 2);

- большой запас мощности и крутящий момент двигателя внутреннего сгорания;

- комфортные условия работы водителя (минимальные вибрации, отсутствие шума и запаха солянки);

- высокий коэффициент полезного действия;

- отсутствие необходимости охлаждения двигателя;

- налоговые льготы и государственные субсидии в случае использования.

Из недостатков водорода как моторного топлива можно отметить:

- высокую летучесть, вследствие чего есть опасность заполнения газообразным водородом замкнутого пространства кабины самосвала;

- легкость воспламенения, взрывоопасность;

- отсутствие необходимой инфраструктуры (для заправки водородом тре-

Таблица 2

Теплотворная способность различных видов топлива

Calorific power of different fuels

Топливо	МДж/л	МДж/кг	Топливо	МДж/л	МДж/кг
Дизельное топливо	36,6	42,6	метан	19,5	50,1
Бутанол	36,0	29,1	этанол	16,7	21,2
Керосин	34,3	44,0	метанол	15,7	19,9
Бензин	34,1	45,5	водород	8,5	120,9
Пропан	23,3	47,5	уголь	—	29,3

буется построить сеть заправочных станций);

- существующие доступные технологии хранения водорода, как правило, являются несовершенными, требуется больший объем топливных баков, чем для дизельного топлива;
- отсутствуют стандарты применения, хранения и безопасности.

Обсуждение результатов

Важнейшими параметрами бензобака или аккумулятора являются вместимость и энергоемкость. Независимо от способа получения водород является самым неэнергоемким топливом на Земле. В обычных условиях при содержании эквивалентного количества энергии водород занимает объем в 3000 раз больший, чем бензин. Поэтому газообразный водород должен быть или сжат (CGH_2), или сжижен криогенным способом (LH_2). Для получения энергии, эквивалентной 1 л бензина, требуется 8 л водорода, сжатого под давлением 40,53 МПа, или 3,73 л жидкого водорода. Жидкий водород имеет очень высокую энергетическую плотность, но процесс его сжижения, в свою очередь, также требует затрат большого количества энергии. Однако транспортировка и заправка жидкого водорода LH_2 отличается высокой экономичностью, а выгода от поставок жидкого газа возрастает пропорционально увеличению спроса на водород на заправочных станциях.

Водородные автозаправочные станции (ВАЗС) являются неотъемлемой частью цепи подачи топлива для транспортных средств и состоят из систем хранения водорода и охлаждения, компрессора и раздаточных устройств для заправки автомобилей. Автозаправочные станции необходимо оборудовать специальными теплоизолированными криогенными контейнерами для LH_2 , чтобы меньше водорода испарялось в процессе хране-

ния. ВАЗС может заправить автомобиль в течение 6–8 мин, поэтому одна станция может обслуживать много транспортных средств, как и существующие бензозаправочные станции. Оптимальная калибровка водородных заправочных станций является сложной задачей вследствие того, что ежедневный спрос, способ производства и форма водорода меняются со временем. Водород на заправочной станции предоставляется на разных уровнях давления: высокое, среднее и низкое, в диапазоне 35–70 МПа. Чем выше давление, обеспечиваемое заправочной станцией, тем больше необходимо инвестировать в компрессоры [14].

В настоящее время в баках с водородом, сжатым до 70 МПа, содержится 5,7 мас.% водорода. Планируется повышение плотности до 7,5 мас.% при снижении затрат с 33 до 8 долл. за кВт·ч [15].

Жидкие органические водородные носители (ЛОНС) достигают среднего содержания водорода 6 масс.% и обеспечивают работу при низком давлении и повышенную безопасность.

В настоящее время изучаются альтернативные носители водорода, в частности, на основе гидридов металлов [12, 16]. Их удельная энергоемкость (примерно 3% водорода по весу) сопоставима со сжатым газом при давлении 50 МПа. При этом они работают при низком давлении и, следовательно, более безопасны, чем сжатый или сжиженный водород. Это делает их более привлекательными с точки зрения практического применения. Такие твердые носители уже используются, например, на мотоллерах и подводных лодках.

Международная научная группа работала на основе гидрида магния пасту Powerpaste [22], которая способна сохранять в 10 раз больше энергии, чем аналогичные литий-ионные аккумуля-

торы. Для заправки транспортного средства достаточно просто заменить картридж с пастой и добавить незначительное количество воды. Поэтому паста Powerpaste может быть использована и при отсутствии водородных заправочных станций. Поскольку паста является текучей и перекачиваемой, то она может заправляться с помощью обычного заправочного оборудования после небольшой модернизации. Стоимость такой модернизации составляет несколько десятков тысяч евро, а стоимость ВАЗС с высоким давлением водорода составляет от 1 до 2 млн евро за одну колонку. Транспортировка пасты может осуществляться в цистернах, и нет необходимости в дорогих резервуарах под давлением или в криогенном оборудовании.

Электрификация карьерных самосвалов привлекает большое внимание. Однако относительно низкая удельная энергия аккумуляторов по сравнению с дизельным топливом, а также рабочие характеристики тяжелых грузовиков делают применение электрифицированной трансмиссии в этих условиях сложной задачей [17]. В отличие от аккумуляторов водородные топливные элементы служат 8–10 лет, работают без вибраций и шума при среднем КПД 45% против 35% у дизельных двигателей, а баллона размером со стандартный бензобак им хватает на то, чтобы проехать 500–600 км [14–17]. Хотя топливные элементы пока еще остаются дорогими в связи с небольшими объемами их выпуска, переход к массовому производству неизбежно приведет к существенному снижению стоимости.

По сравнению с аккумуляторами, топливные элементы обеспечивают автомобилю:

- мобильность и мощность, сопоставимые с дизельным двигателем;
- сокращение времени заправки: для зарядки аккумулятора электрического

самосвала требуется 5–6 ч, а замена топливных элементов происходит за 8–10 мин;

- увеличение радиуса действия на одной заправке;
- более высокую выходную мощность, без утяжеления горных машин и оборудования, поскольку топливные элементы обладают большей плотностью энергии;
- больше вариантов инфраструктуры для заправки топливом: топливные элементы можно заправлять на центральных станциях или удаленно, тогда как установка инфраструктуры для подзарядки аккумуляторов является сложной и дорогостоящей.

Компания Toyota разработала грузовой автомобиль Project Portal Beta с силовой установкой на водородных топливных элементах и электробатарее емкостью 12 МВт·ч при мощности двигателя 670 л.с. с максимальным крутящим моментом 1796 Н·м, что позволяет перевозить до 36 т груза на расстояние 480 км. В 2018 г. грузовик поступил в порты Лонг-Бич и Лос-Анджелеса [18].

Компания Nikola Motor Co. представила свой вариант водородного грузовика — Nikola One. Дальность хода автомобиля составляет от 1287 до 1931 км, в зависимости от формы баков и емкости батарей. При этом тягач примерно на 900 кг легче, а по расходу топлива в 1,5–2 раза экономичнее сопоставимой по характеристикам модели на дизельном топливе [18].

Hyundai Motor разработала грузовик XCIENT Fuel Cell [23], мощностью 190 кВт на водородном топливе. 7 резервуаров вмещают до 32 кг водорода при времени заправки машины 8–20 мин. Запас хода Hyundai XCIENT Fuel Cell на одной заправке составляет около 400 км. В 2020 г. Hyundai выпустил 50 экземпляров машин, а к 2025 г. планирует довести их количество до 1600 шт. Сейчас

Hyundai разрабатывает тягач с запасом хода в 1000 км на одной заправке.

Концерн Daimler представил тягач GenH2 Truck, работающий на водородных топливных элементах и литий-ионном батарейном блоке емкостью 1000 кВт·ч, что позволяет проезжать 1000 км без дозаправки. Грузовик оснащен двумя моторами, каждый из которых имеет максимальную мощность в 330 кВт и рассчитан на перевозку грузов весом до 25 т. Серийная версия поступит в производство после 2025 г. [18].

Французская энергетическая компания Engie и горнодобывающая компания Anglo American объявили о заключении партнерского соглашения для создания первого карьерного самосвала класса UFCEV (Ultra-class Fuel Cell Electric Vehicle) [24] 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. Кроме того, самосвал оснащен рекуперативной тормозной системой, позволяющей возвращать в аккумуляторные батареи часть энергии при движении автомобиля под уклон.

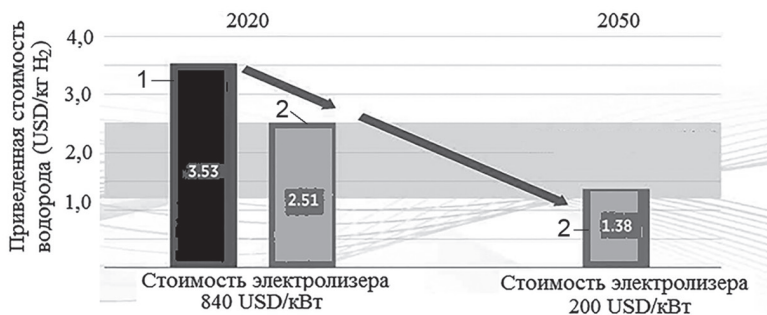
В 2020 г. турецко-китайское совместное предприятие JMC Heavy Duty Vehicle Co., Ltd представило тягач JMC Veyron 4×2 FCV на водородных топливных элементах с электромотором мощностью 250 кВт и крутящим моментом 1600 Н·м. Китайский производитель двигателей Weichai Power совместно с CRRC Yongji разработал карьерный самосвал CR240E, работающий от 200 литий-водородных батарей. Водород объемом 140 л хранится в 8 баллонах под давлением 35 МПа. Радиус действия самосвала на одной заправке составля-

ет 400 км при максимальной скорости 85 км/ч [18].

Отечественная компания «Эвокарго» провела испытания беспилотного грузовика на водородном топливе на Центральной кольцевой автомобильной дороге в Московской области. В 2021 г. «КамАЗ» [25] предполагает приступить к разработке грузовых автомобилей и автобусов на водородном топливе.

В соответствие с «Зеленым планом восстановления» в Европе должно значительно увеличиться производство «зеленого» водорода. В России есть опыт разработки и освоения водородных энергетических технологий. Имеющиеся запасы газа, воды и угля позволяют развивать производство водорода в России различными способами. 12 октября 2020 г. правительство России приняло план мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года» [26]. Среди российских компаний наиболее готовой к выходу на рынок водорода является НОВАТЭК, предполагающая выпускать и экспортировать «зеленый» и «голубой» водород, поскольку покупатели в основном те же, что и у СПГ. Для этого компания планирует масштабное строительство ветропарков на Ямале, Гыдане, Камчатке и в Мурманской области. Пилотное производство водорода планируется на «Ямал СПГ», откуда водород можно экспортировать в Азию и Европу. На сегодняшний день выпуск водорода в России составляет 5 млн т в год при мировом потреблении в 72 млн т [19].

Снижение цен на возобновляемую электроэнергию и электролизеры делает экологически чистый водород достаточно экономичным вариантом. На сегодняшний день стоимость 1 кг водорода составляет 8–9 долл. и при расходе 1,2–1,3 кг на 100 км средняя стоимость такой поездки уже сопоставима с эксплуатацией дизельного автомобиля [14].



1 ■ LCOE Стоимость электроэнергии USD/МВт (40) 2 ■ LCOE Стоимость электроэнергии USD/МВт (20)

Рис. 2. Затраты на водород при разных ценах на электроэнергию и капитальных затратах на электролизер (коэффициент загрузки – 48%) [2]

Fig. 2. Hydrogen expenses at different prices of electric energy and capital costs for chemical reactor (load factor 48%) [2]

К 2035 г. возобновляемые источники энергии средней стоимости станут конкурентоспособными. Конкурентоспособность водорода из возобновляемых источников энергии повышается, и к 2050 г. затраты на производство зеленого водорода будут ниже, чем на нефтяное топливо (рис. 2) [2]. Установление цен на выбросы CO₂ от ископаемого топлива еще больше повышает конкурентоспособность зеленого водорода. Поэтому водород может стать конкурентоспособным уже в ближайшие 3–5 лет по сравнению с ископаемым топливом (рис. 3) [2].

Горнодобывающие предприятия в удаленных районах для выработки электроэнергии на месте в значительной степени зависят от ископаемых видов топлива (нефть, уголь), что приводит к значительным выбросам отработавших газов и углекислого газа. Использование водорода для получения энергии благодаря относительно более дешевой технологии может облегчить применение возобновляемых источников энергии в горнодобывающей промышленности. Водород может служить источником энергии для многих операций, например, применяться в качестве моторного топлива для ма-

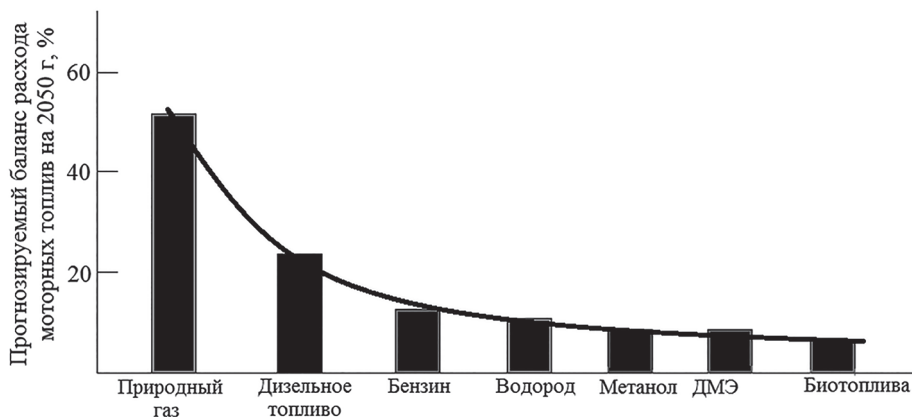


Рис. 3. Прогнозируемый баланс расхода моторных топлив на 2050 г. [25]

Fig. 3. Predicted engine fuel consumption balance for 2050 [25]

лых и средних транспортных средств, используемых для перевозки персонала, для карьерных самосвалов, экскаваторов и другого оборудования.

Карьерный самосвал на топливных элементах более эффективен, чем с дизельным двигателем, поскольку топливный элемент комбинируется с аккумулятором, что позволяет регенерировать энергию при торможении или движении автомобиля по инерции, повышая тем самым эффективность всей энергетической цепочки и обеспечивая экологически чистоту окружающей среды.

Стоимость владения водородными карьерными самосвалами может стать конкурентоспособной уже к 2030 г. благодаря их более высокой эффективности, а также более низким капитальным затратам и уменьшению нормированной стоимости водорода [2, 20].

Заключение

В настоящее время все большее число карьерных самосвалов работает на электроэнергии. При этом привод электрогенератора осуществляется дизельным двигателем. Затраты на дизельное топливо и электроэнергию на горнодобывающих предприятиях часто значительны, учитывая их относительную изолированность, а розничные цены на дизельное топливо в отдаленных районах могут превышать среднюю цену по стране более чем на 15%. Поэтому горняки больше других заинтересованы в переходе на водородное топливо, а также имеют больше возможностей для производства зеленого водорода за счет использования инфраструктуры возобновляемых источников энергии.

Технология добычи полезных ископаемых и способ эксплуатации карьерных самосвалов делает горнодобывающую промышленность логичным первопрободцем в области водородной энергетики по следующим причинам:

- Централизованная инфраструктура заправки. Карьерные самосвалы возвращаются для дозаправки на один и тот же участок в конце каждой смены. Таким образом, извлекается выгода из централизованной инфраструктуры заправки с соответствующей экономией. Этот парк требует максимальной загрузки и высокой скорости заправки, которую в настоящее время не могут обеспечить аккумуляторные батареи.

- Более целенаправленное и эффективное техническое обслуживание, поскольку механически стандартизированный парк тяжелых транспортных средств на руднике или карьере сосредоточен в одном месте.

Поскольку для тяжелых транспортных средств пробег и габариты не столь важны, ожидается, что в случае с карьерными самосвалами будут использоваться резервуары для хранения водорода с давлением до традиционных 35 МПа, в отличие от легких транспортных средств, для которых потребовались бы более компактные и сложные резервуары с давлением до 70 МПа. Это снизит затраты на сжатие и системы хранения. Следует также учитывать, что горнодобывающие компании знакомы с безопасным хранением и обращением с химическими веществами, реагентами и сжатыми газами. Имеющиеся площади достаточны для безопасного хранения сжатых газов вдали от рабочих, инфраструктуры и населенных пунктов.

Учитывая последние научные достижения, например, производство пасты Powerpaste, можно использовать обычные АЗС с минимальной модернизацией, что обойдется в 40–50 раз дешевле строительства ВАЗС. При этом транспортировка пасты может осуществляться аналогично перевозке дизельного топлива.

Хотя еще предстоит преодолеть значительные препятствия, прежде чем во-

дородная экономика возьмется за основу, эти препятствия для горнодобывающей промышленности меньше, чем для большинства других отраслей. У горнодобывающих компаний есть возможность показать общественному мнению свою приверженность делу охраны окружающей среды и положить начало развитию водородной промышленности.

Водородная энергетика будет развиваться в России, поскольку данная про-

рывная технология позволит повысить уровень научно-технического развития страны. Это подтверждается перечнем инициатив социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 г., утвержденных распоряжением Правительства Российской Федерации [27] от 6 октября 2021 г. № 2816-р, где отмечается необходимость развития электроавтомобилей и водородных автомобилей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Humphreys D.* Mining productivity and the fourth industrial revolution // *Mineral Economics*. 2020, vol. 33, pp. 115 – 125. DOI: 10.1007/s13563-019-00172-9.
2. *Global Energy Transformation. A roadmap to 2050.* IRENA, 2018.
3. *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 NREL/TP-6A50-76156. 2020.
4. *Шешко О. Е.* Эколого-экономическое обоснование возможности снижения нагрузки на природную среду от карьерного транспорта // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2017. – № 2. – С. 241–252.
5. *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.
6. *Fleming K. L., Brown A. L., Fulton L., Miller M.* Electrification of medium- and heavy-duty ground transportation: Status report. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*. 2021, pp. 1 – 9. DOI: 10.1007/s40518-021-00187-3.
7. *Старостин И. И., Бондаренко А. В.* Проветривание карьеров струйными вентиляторами в комплексе с устройством для аэрации // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. – 2015. – № 1. – С. 32 – 41.
8. *Guerra C. F., Reyes-Bozob L., Vyhmeister E., Caparros M. J., Salazar Navarrete J. L., Godoy-Faundez A., Clemente-Jul C., Verastegui Rayo D.* 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.
9. *Хазин М. Л.* Горные машины и экологические стандарты стран мира // *Известия Уральского государственного горного университета*. – 2020. – № 1(57). – С. 156–163. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-1-156-163.
10. *Марков В. А., Бебенин Е. В., Гладышев С. П.* Сравнительный анализ альтернативных моторных топлив для дизелей // *Известия вузов. Машиностроение*. – 2014. – № 5. – С. 43–48.
11. *Бойченко С. В., Школьник И. А.* Экологические аспекты использования моторных топлив (Обзор) // *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. – 2014. – № 5 – 6. – С. 35 – 44.
12. 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.
13. *Peng T., Zhou S., Yuan Z., Ou X.* Life cycle greenhouse gas analysis of multiple vehicle fuel pathways in China // *Sustainability*. 2017, vol. 9, p. 2183.
14. *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.

15. Staffell I., Scamman D. P., Abad A. V., Balcombe P., Dodds P. E., Ekins P., Shah N., Ward K. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system // *Energy & Environmental Science*. 2018, vol. 12 (Part 2), pp. 463–491. DOI: 10.1039/C8EE01157E.

16. 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, article 153548. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.153548.

17. Joshi S., Dahodwala M., Ahuja N., Dhanraj F., Koehler E., Franke M., Tomazic D. Evaluation of hybrid, electric and fuel cell powertrain solutions for class 6–7 medium heavy-duty vehicles // *SAE Technical Paper*. 2021, no. 1. DOI: 10.4271/2021-01-0723.

18. Луняшин П. Карьерные тяжеловесы: новые пути к совершенству (Ч. 1) // *Основные средства*. — 2019. — № 2. URL: <https://os1.ru/article/19361-tendentsii-v-razviti-i-sovremennyh-karernyh-samosvalov-na-jestkoy-rame-karernye-tyajelovesy-novyie-puti-k-sovershenstvu-ch-1> (дата обращения 07.09.2021).

19. Мастепанов А. М. Водородная энергетика России: состояние и перспективы // *Энергетическая политика*. — 2020. — № 12(154). — С. 54–64. DOI: 10.46920/2409-5516_2020_12154_54.

20. Kalantari H., Ghoreishi-Madiseh S. A., Sasmito A. P. Hybrid renewable hydrogen energy solution for application in remote mines // *Energies*. 2020, vol. 13, no. 23, pp. 6365. DOI: 10.3390/en13236365.

21. Pocard N. How proven fuel cell technology is decarbonizing mining and construction. 2021. URL: <https://blog.ballard.com/decarbonizing-mining-and-construction> (дата обращения 07.09.2021).

22. Breakthrough in hydrogen fuel – high performance paste created powerpaste, available at: <https://zen.yandex.ru/media/energofiksik/proryv-v-vodorodnom-toplive-sozdana-vysokoeffektivnaia-pasta-powerpaste-60281d4d331cb763520172f3> (accessed: 07.09.2021).

23. Первый в мире тяжелый грузовик на топливных элементах Hyundai XCIENT Fuel Cell направляется в Европу для коммерческого использования. URL: <https://www.hyundai-avtomir.ru/news/pervyj-v-mire-tyazhelyj-gruzovik-na-toplivnyh-ehlementah-hyundai-xcient-fuel-cell-napravlyaetsya-v-evropu-dlya-kommercheskogo-ispolzovaniya/> (дата обращения 07.09.2021).

24. Anglo American построит крупнейший автомобиль на водородном топливе. URL: <https://regnum.ru/news/it/2866425.html> (дата обращения 07.09.2021).

25. «КамАЗ» начнет разработку водородных грузовиков. URL: <https://trans.ru/news/kamaz-nachnet-razrabotku-vodorodnih-gruzovikov-a-nuzhno-li-neftegazovoi-rossii-vodorodnoe-toplivo> (дата обращения 07.09.2021).

26. План мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года» [Электронный ресурс] Распоряжение Правительства РФ от 12.10.2020 № 2634-р. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

27. Перечень инициатив социального-экономического развития Российской Федерации до 2030 года [Электронный ресурс] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 06.10.2021 № 2816-р. Доступ на официальном интернет-портале правовой информации. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Humphreys D. Mining productivity and the fourth industrial revolution. *Mineral Economics*. 2020, vol. 33, pp. 115–125. DOI: 10.1007/s13563-019-00172-9.

2. *Global Energy Transformation. A roadmap to 2050*. IRENA, 2018.

3. 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 NREL/TP-6A50-76156*. 2020.

4. Sheshko O. E. Ecological and economic substantiation of the possibility to reduce the load on the nature environment from open pit transport. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 2, pp. 241–252. [In Russ].

5. 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.

6. Fleming K. L., Brown A. L., Fulton L., Miller M. Electrification of medium- and heavy-duty ground transportation: Status report. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports.* 2021, pp. 1–9. DOI: 10.1007/s40518-021-00187-3.

7. Starostin I. I., Bondarenko A. V. Ventilation of quarries with jet fans in combination with a device for aeration. *Nauka i obrazovaniye: nauchnoye izdaniye MGTU im. N.E. Baumana.* 2015, no. 1, pp. 32–41. [In Russ].

8. Guerra C. F., Reyes-Bozob L., Vyhmeister E., Caparros M. J., Salazar Navarrete J. L., Godoy-Faundez A., Clemente-Jul C., Verastegui Rayo D. 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.

9. Khazin M. L. Mining machinery and environmental regulations of countries worldwide. *News of the Ural State Mining University.* 2020, no. 1(57), pp. 156–163. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-1-156-163.

10. Markov V. A., Bebenin E. V., Gladyshev S. P. Comparative analysis of alternative motor fuels for diesel engines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye.* 2014, no. 5, pp. 43–48. [In Russ].

11. Boychenko S. V. Shkilnyuk I. A. Ecological aspects of the use of motor fuels (Review). *Energeticheskaya i resursosberezheniye.* 2014, no. 5–6, pp. 35–44. [In Russ].

12. The future of hydrogen. Seizing the opportunities of today. Report prepared by the IEA for the G20 Summit in Osaka, Japan. *Transport na al'ternativnom toplive.* 2019, no. 5(71), pp. 12–31. [In Russ].

13. Peng T., Zhou S., Yuan Z., Ou X. Life cycle greenhouse gas analysis of multiple vehicle fuel pathways in China. *Sustainability.* 2017, vol. 9, p. 2183.

14. 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.

15. Staffell I., Scamman D. P., Abad A. V., Balcombe P., Dodds P. E., Ekins P., Shah N., Ward K. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science.* 2018, vol. 12 (Part 2), pp. 463–491. DOI: 10.1039/C8EE01157E.

16. 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, article 153548. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.153548.

17. Joshi S., Dahodwala M., Ahuja N., Dhanraj F., Koehler E., Franke M., Tomazic D. Evaluation of hybrid, electric and fuel cell powertrain solutions for class 6–7 medium heavy-duty vehicles. *SAE Technical Paper.* 2021, no. 1. DOI: 10.4271/2021-01-0723.

18. Lunyashin P. Career heavyweights: new ways to perfection (Part. 1). *Osnovnye sredstva.* 2019, no. 2, available at: <https://os1.ru/article/19361-tendentsii-v-razvitiy-sovremennyh-karernyh-samosvalov-na-jestkoy-rame-karernye-tyajelovesy-novye-puti-k-sovershenstvu-ch-1> (accessed 07.09.2021).

19. Mastepanov A. M. Hydrogen energy of Russia: state and prospects. *Energeticheskaya politika.* 2020, no. 12(154), pp. 54–64. [In Russ]. DOI: 10.46920/2409-5516_2020_12154_54.

20. Kalantari H., Ghoreishi-Madiseh S. A., Sasmitho A. P. Hybrid renewable hydrogen energy solution for application in remote mines. *Energies.* 2020, vol. 13, no. 23, pp. 6365. DOI: 10.3390/en13236365.

21. Pocard N. *How proven fuel cell technology is decarbonizing mining and construction.* 2021, available at: <https://blog.ballard.com/decarbonizing-mining-and-construction> (accessed 07.09.2021).

22. *Breakthrough in hydrogen fuel – high performance paste created powerpaste*, available at: <https://zen.yandex.ru/media/energofiksik/proryv-v-vodorodnom-toplive-sozdana-vysokoeffektivnaia-pasta-powerpaste-60281d4d331cb763520172f3> (accessed 07.09.2021).

23. *Pervyy v mire tyazhelyy gruzovik na toplivnykh elementakh Hyundai XCIENT Fuel Cell napravlyaetsya v Evropu dlya kommercheskogo ispol'zovaniya*, available at: <https://www.hyundai-avtomir.ru/news/pervyj-v-mire-tyazhelyj-gruzovik-na-toplivnyh-ehlementah-hyundai-xcient-fuel-cell-napravlyaetsya-v-evropu-dlya-kommercheskogo-ispolzovaniya/> (accessed 07.09.2021).

24. *Anglo American postroit krupneyshiy avtomobil' na vodorodnom toplive*, available at: <https://regnum.ru/news/it/2866425.html> (accessed 07.09.2021).

25. «KamAZ» nachnet razrabotku vodorodnykh gruzovikov, available at: <https://trans.ru/news/kamaz-nachnet-razrabotku-vodorodnih-gruzovikov-a-nuzhno-li-neftegazovoi-rossii-vodorodnoe-toplivo> (accessed 07.09.2021).

26. *Plan meropriyatiy «Razvitie vodorodnoy energetiki v Rossiyskoy Federatsii do 2024 goda»*. *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 12.10.2020 № 2634-r*. [Action plan «Development of hydrogen energy in the Russian Federation until 2024». Order of the Government of the Russian Federation No. 2634-r dated 12.10.2020], access from help.- legal system «ConsultantPlus».

27. *Perechen' initsiativ sotsial'nogo-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda*. *Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 06.10.2021 № 2816-r*. [List of initiatives of social and economic development of the Russian Federation until 2030. Order of the Government of the Russian Federation No. 2816-r dated 06.10.2021], access on the official Internet portal of legal information.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хазин Марк Леонтьевич¹ — д-р техн. наук, профессор,
e-mail: Khasin@ursmu.ru,

Апакашев Рафаил Абдрахманович¹ — д-р хим. наук,
профессор, e-mail: parknedra@yandex.com,

¹ Уральский государственный горный университет.

Для контактов: Хазин М.Л., e-mail: Khasin@ursmu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.L. Khazin¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: Khasin@ursmu.ru,

R.A. Apakashev¹, Dr. Sci. (Chem.), Professor,
e-mail: parknedra@yandex.com,

¹ Ural State Mining University,
620144, Ekaterinburg, Russia.

Corresponding author: M.L. Khazin, e-mail: Khasin@ursmu.ru.

Получена редакцией 09.11.2021; получена после рецензии 21.11.2021; принята к печати 10.12.2021.

Received by the editors 09.11.2021; received after the review 21.11.2021; accepted for printing 10.12.2021.

