



УДК 622.61/.67

## ВНЕДРЕНИЕ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАПРАВОК НА ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

## INTRODUCTION OF AUTONOMOUS ELECTRIC GAS STATIONS ON FUEL ELEMENTS

**Волкова Юлия Владимировна**, к.т.н., доцент каф. «Теплоэнергетика и Теплотехника», «Безопасность жизнедеятельности» Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; главный специалист ООО «УПК»; 620019 Россия, Свердловская область, Крауля 2; [jv.volkova@urfu.ru](mailto:jv.volkova@urfu.ru) Тел: +7 (902) 877-96-06

**Чойнзонов Дмитрий Банзаракцаевич**, студент каф. «Теплоэнергетика и теплотехника». Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: [dmi6378@yandex.ru](mailto:dmi6378@yandex.ru), Тел.: +7(922)197-10-28

**Муниц Владимир Александрович**, д.т.н., профессор каф. «Теплоэнергетика и Теплотехника» Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: [v.a.munts@urfu.ru](mailto:v.a.munts@urfu.ru), Тел.: +7(904)170-50-82

**Volkova Julia V.**, Candidate of Technical Science, Departments «Heat power engineering and Heat engineering», «Life safety» Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. Chief specialist UIC, LLC. E-mail: [jv.volkova@urfu.ru](mailto:jv.volkova@urfu.ru). Ph.: +7(902)877-96-06

**Choynzonov Dmitry B.**, student, Department «Heat power engineering and Heat engineering», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira Street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: [dmi6378@yandex.ru](mailto:dmi6378@yandex.ru) Ph.: +7(922)197-10-28

**Munts Vladimir A.**, Doctor Sc., Prof., Department «Heat power engineering and Heat engineering», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: [v.a.munts@urfu.ru](mailto:v.a.munts@urfu.ru): Ph.: +7(904)170-50-82

**Аннотация:** В работе выполнено исследование снижения затрат при замене дизельных шахтно-рудных погрузчиков SCOOPTRAM и Artisanvehicle на электрические аналоги и внедрение в качестве источника тока для заправки их аккумуляторов автономной энергетической установки на основе твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ). Анализ показал, что если при проведении работ в шахте использовать технику на электрическом приводе, то это приведет снижению затрат за вентиляцию на 162 тыс. руб. в год. На данном этапе в расчете не учитывалась экономия от снижения расхода дизельного топлива. Заряжая транспортные средства от энергетической установки на ТОТЭ экономия порядка 215 тыс. руб. в год в зависимости от стоимости природного газа. Приведено описание работы энергетической установки на ТОТЭ.

**Abstract:** In work, the research of possible decrease expenses when replacing the SCOOPTRAM and Artisanvehicle diesel loaders used when carrying out mine and ore works on electric analogs. In addition, using as a source of current for their accumulators the independent power station based on solid oxide fuel cells (SOFC) is conducted. The analysis has shown that if at work in the mine to use the equipment on the electric drive, then it will bring to cutting of costs for ventilation by 162 thousand rubles a year. At this calculation stage, the savings from consumption decrease of diesel fuel were not considered. Loading vehicles from the power station on SOFC will make economy more 215 thousand rubles a year.

**Ключевые слова:** Энергосбережение при добыче руды, твердооксидные топливные элементы, снижение энергозатрат, энергоэффективность.

**Key words:** Energy saving at extraction of ore, solid oxide fuel elements, decrease in energy consumption, energy efficiency.

Ежегодно потребность в энергетических ресурсах растет, поэтому масштабы добычи топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) будут также увеличиваться. Но объемы разведанных и подтвержденных запасов имеют ограничения, и при современном уровне их потребления, например, нефти и газа хватит приблизительно на 35-40 лет, а угля на 400 лет [1]. В настоящее время исчерпано

порядка 40-60 % запасов многих ранее открытых месторождений энергоресурсов. Возобновление ресурсной базы, поиск и разработка новых месторождений последние 20 лет находятся в неудовлетворительном состоянии [2]. Очевидно, что скорость использования невозобновляемых ресурсов, не должна превышать возможности

поиска новых источников, приемлемых заменителей [3].

На горнодобывающих и обогащательных предприятиях до 40% в себестоимости продукции составляют энергоресурсы. Поэтому повышение энергоэффективности добывающих технологий - это один из первоочередных вопросов, на решение которого необходимо обратить внимание. Особое внимание уделяется и снижению загрязняющих выбросов от оборудования, используемого при выполнении работ [4].

Вторым по значению, после открытого способа является подземный способ разработки месторождений, на долю которого приходится около 20% добычи железа, до 45 % добычи меди, до 70% цинка, до 75 % олова и свинца, 100 % вольфрама [5]. Затраты на добычу руды при подземной разработке месторождений выше от 22 до 85 кВт·ч на 1 т руды, чем при открытой, но она ведется на месторождениях, которые экономически нецелесообразно или технически невозможно разрабатывать открытым способом. Одной из наиболее затратных статей в структуре производства руды является комплекс работ по доставке и подъёму горной руды на поверхность в среднем на доставку и откатку руды требуется 3-4,5 кВт·ч, на подъем, в зависимости от глубины, 1,5-4 кВт·ч [6]. Даже небольшое снижение энергозатрат на данном участке добычи позволит существенно повысить эффективность на горнорудном предприятии.

В России, доля месторождений на которых не решен вопрос обеспечения электроэнергией превышает 70%, что препятствует промышленной эксплуатации данных месторождений. В основном современный процесс добычи руды базируется на самоходной дизельной технике [7]. При проведении подземных работ в условиях шахт при использовании погрузочно-доставочных машин на дизельном топливе, температура вокруг нее возрастает приблизительно на 19 °С, что вызывает повышение температуры в шахте до 40 °С [8], это существенно увеличивает затраты на обеспечение охлаждения и вентиляции шахт. Кроме того, выхлопные газы дизельных двигателей содержат большое количество токсичных компонентов (таблица 1), что является опасным для здоровья работающего в шахте персонала. Сегодня многие компании, такие как GE Fairchild, Atlas CopCo, Artisanvehicles направили серьезные усилия на разработку техники для подземных работ на электрическом приводе [8-11], что укладывается в дальнейшую концепцию развития технологий беспилотного курсирования электрического горношахтного оборудования при выполнении подземных работ. В качестве тяговых установок используют различного типа и ёмкости аккумуляторные батареи.

Таблица 1.

Сравнение выбросов дизельного двигателя и твердооксидных топливных элементов

Компонент, %об.	ДВС на дизельном топливе	ТОТЭ & СРОХ риформинг	Воздействие на человека
Азот, N	76,0 - 78,0	77,2-77,4	нетоксичен
Кислород, O <sub>2</sub>	2,0 - 18,0	16,1-16,5	нетоксичен
Пары воды, H <sub>2</sub> O	0,5 - 4,0	4,1-4,4	нетоксичны
Диоксид углерода, CO <sub>2</sub>	1,0 - 10,0	2,0-2,3	нетоксичен
Оксид углерода, CO	0,01 - 5,0	0 – 1x10 <sup>-7</sup>	токсичен
Оксиды азота, NO <sub>x</sub>	0,0002—0,5	0	токсичны
Углеводороды неканцероген-ные, CH	0,009 - 0,5	0	токсичны
Альдегиды	0,001 - 0,009	0	токсичны
Оксид серы, SO <sub>x</sub>	0 - 0,03	0	токсичен
Сажа, г/м <sup>3</sup>	0,01 - 1,1	0	токсична
Бензопирен, мг/м <sup>3</sup>	до 0,01	0	канцероген

Электрические транспортные средства для шахтных работ имеют следующие преимущества:

- Повышение энергоэффективности: потребление электроэнергии электрическим оборудованием может быть на 75-80% ниже, чем у его дизельного двигателя;
- Более легкое и быстрое управление;
- Лучшая маневренность и управляемость;
- Отсутствие холостого хода;
- Уменьшение передач, отсутствие сцепления;
- Привод с использованием проводов;
- Отсутствует необходимость в поставке дизельного топлива;
- Снижение технического обслуживания, как по стоимости, так и по интенсивности;
- Снижение уровня шума;
- Отсутствие опасных выбросов;
- Возможность реализации работы в режиме «беспилотного курсирования»;
- Снижение затрат на вентиляцию на 30-50%.

В среднем на вентиляционные и калориферные установки затрачивается порядка 6-10 кВт·ч, снижение затрат на 30% (рис. 1) позволит уменьшить энергопотребление до 4,2-7 кВт·ч, что составит порядка 60-100 тыс. руб в год, при тарифе на электроэнергию 3,7 руб/кВт·ч<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> В соответствии с Постановлением (электроэнергетика) Региональной энергетической комиссии Свердловской области от 28.12.2017 № 218-ПК "Об установлении единых (котловых) тарифов на услуги по передаче электрической энергии по сетям Свердловской области"

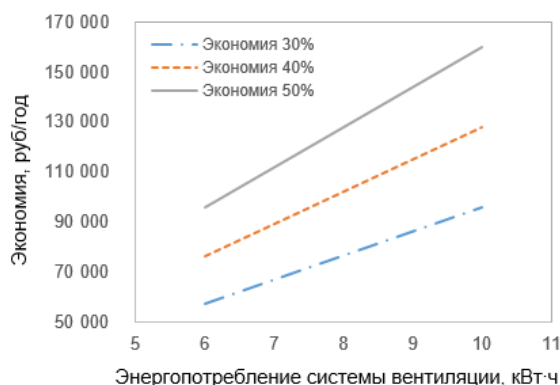


Рис. 1. Зависимость экономии в зависимости от энергопотребления системы вентиляции

В 2017 году компания Atlas Copco выпустила электропогрузчик для подземных работ SCOOPTRAM ST7 BATTERY, он является полным аналогом популярного дизельного погрузчика того же производителя. Пока данный тип погрузчиков доступен для заказа только в Канаде и США (рис. 2).



Рис. 2. Погрузчик SCOOPTRAM ST7 BATTERY

Данное оборудование оснащено тяговым двигателем Artisan 1200 Series мощностью 108 кВт, пик 149 кВт с одномоторным инвертором. В качестве аккумулятора используется литий-железо-фосфатный Artisan мощностью 165 кВт·ч с напряжением постоянного тока 630 В.

Еще один похожий погрузчик был разработан компанией Artisanvehicles [9].



Рис. 3. Погрузчик A4 производства компании Artisanvehicles и сравнительные характеристики с дизельной версией

Шахтный погрузчик A4 имеет мощность 214 кВт, что в 3 раза больше, чем у аналога того же производителя на дизельном топливе, скорость загрузки на 17% выше, а выбросы тепла в окружающую среду снижены в 3,5 раза (рис. 3).

Для обеспечения широкого внедрения техники на электроприводе и ее эффективной работы

необходимо уделить внимание вопросу процесса зарядки электрических аккумуляторов. Для энергообеспечения рудников используются различные типы энергоисточников, в основном на основе невозобновляемых источников энергии (газ, уголь, уран), наряду с тем присутствует небольшая доля возобновляемой энергии (гидро-, ветро- и солнечная энергия) [6], которые в основном производят переменный ток. Для пополнения заряда аккумуляторных батарей также применяются дизельные генераторы или энергия от традиционных сетей.

Тяговая батарея в электрическом транспортном средстве эффективнее заряжается при использовании постоянного тока, поэтому при использовании обычной электрической сети требуется преобразование AC/DC, которое происходит с потерей 5-15% энергии. Согласно стандарту IEC 61851-1, режим 4 обеспечивает самую быструю зарядку постоянным током с использованием внешнего источника питания, тогда как при преобразовании переменного тока потери все еще присутствуют. Исходя из выше сказанного для зарядки аккумуляторов необходим источник постоянного тока, который будет производить электроэнергию, с высокой эффективностью из доступных углеводородных топлив и быть экологически безопасными. Также немаловажным является возможность наращивания мощности, например, на 200 кВт, без существенных капитальных затрат (проведения изысканий, возведения фундамента).

Производство электроэнергии путем сжигания углеродсодержащего топлива и использование полученной теплоты для совершения механической работы в двигателе, вращающем электрогенератор, не является простейшим путем преобразования химической энергии топлива в электрическую. Прямое превращение энергии химических реакций реализуют в топливных элементах (ТЭ), которые состоят из двух электродов и электролита между ними [12], такой способ позволяет получить постоянный ток с достаточно высоким КПД на уровне 50-60% [13]. Наиболее подходящими для энергоснабжения шахтового электротранспорта являются ТОТЭ, так как в качестве топлива в них можно использовать синтез-газ, который достаточно легко получить из любого углеводородного топлива, а в качестве окислителя воздух. Уровень шума таких установок составляет порядка 40-50 дБА, что не требует создания шумоизолирующих ограждений и применения средств индивидуальной защиты. Себестоимость производства электроэнергии в энергетических установках на базе ТОТЭ ниже, кроме того, при производстве энергии отсутствуют вредные выбросы, такие как NOx, SOx и сажа, которые содержатся в выбросах турбин и газо-поршневых агрегатов. Продукты сгорания установок на базе ТОТЭ состоят в основном из углекислого газа, азота

и водяного пара (Таблица 1). На рис. 4 приведена упрощенная схема взаимодействия энергетической установки на ТОТЭ с потребителем энергии SCOOPTRAM ST7 BATTERY.

В качестве топлива может быть использован магистральный, углепластовый или сжиженный природный газ, а также уголь. Установки мощностью 50-100 кВт скомплектованы в 10' контейнере, не требуют возведения фундамента (могут быть установлены на плиты). Для преобразования топлива энергетическая установка на ТОТЭ снабжена системой «подготовки топлива», которая включает в себя модули очистки, распыления, риформинга или пиролиза (в зависимости от типа топлива), после которой, полученный синтез-газ, попадает в модуль твердооксидных топливных элементов планарной конструкции. Далее в батареях ТОТЭ происходит окисление топлива и получение электрического тока, а уходящие продукты реакции из ТОТЭ (имеющие температуру на уровне 750-800°C) используются в системе обработки уходящих газов с целью возврата теплоты и паров воды. Энергетическая установка снабжена системой автоматизированного управления и позволяет установке работать в автоматическом режиме без постоянного присутствия персонала. Для наращивания энергоснабжения может быть установлено необходимое количество энергетических установок, которые при помощи системы автоматизированного управления соединяются в единую энергетическую сеть [14].

Модуль клиента включает в себя расчетное количество заправочных разъемов и кабелей различной длины для обеспечения зарядки оборудования, снабженные механизмом блокировки и световыми индикаторами. Кроме того, процесс заряда аккумуляторов отображается у диспетчера, который имеет возможность при помощи сотовой связи информировать ответственного сотрудника. Установка на базе ТОТЭ может быть включена в общую сеть энергоснабжения с возобновляемыми источниками энергии и обеспечивать поставку электроэнергии, тепла и горячего водоснабжения при добыче на удаленных объектах [14].

Расчет экономии при установке энергетической установки на ТОТЭ для выполнения электрозаправки шахтного оборудования выполнялся для следующих условий, на примере SCOOPTRAM ST7 BATTERY.

Средняя мощность двигателя 108 кВт;

Использование оборудования: 16 ч/сутки (2 смены, 5 дней в неделю, 253 дня в год);  
Емкость батареи: 165 кВт·ч;  
Количество единиц техники 3 шт;  
Стоимость электроэнергии:  
- от сетей: 3,7 руб/кВт·ч  
- установки на ТОТЭ от 2 до 3 руб/кВт·ч (рис. 5)  
ЭУ на ТОТЭ с СРОХ риформингом, 100 кВт, 2 шт.

На рисунке 5 приведена зависимость годовой и суточной экономии от стоимости природного газа при заправке 3 погрузчиков SCOOPTRAM ST7 BATTERY от энергетической установки на ТОТЭ.

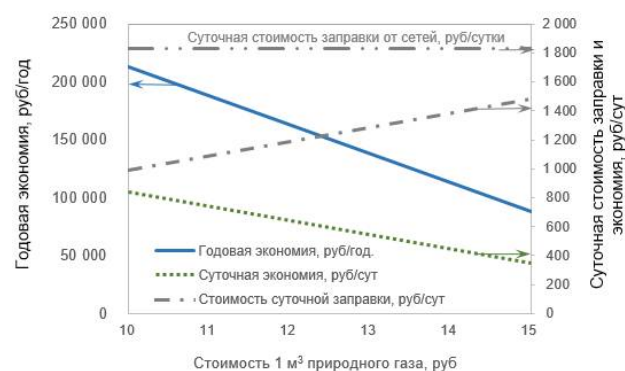


Рис. 5. Зависимость годовой и суточной экономии при заправке 3 погрузчиков от стоимости 1 м³ природного газа

Из рис. 5 видно, что с ростом стоимости 1 м³ природного газа в 1,5 раза годовая экономия снижается почти в 2,5 раза. При использовании углепластового газа, себестоимость которого будет ниже, существенно позволит увеличить экономиию.

Так как зарядка аккумуляторов выполняется постоянным током, то скорость заряда возможно сократить с 6 до 2 часов, что является существенным преимуществом, перед заправкой от источника энергии с переменным током. Данный источник энергии также может обеспечить нужды персонала в тепле и ГВС, и выполнять энергообеспечение системы вентиляции шахты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование снижения затрат при замене дизельных погрузчиков, используемых при проведении шахтно-рудных работ на электрические аналоги и внедрение в качестве источника тока для заправки их аккумуляторов автономной энергетической установки на основе твердооксидных топливных элементов.



Рис. 4. Схема взаимодействия энергетической установки на ТОТЭ и потребителя электроэнергии SCOOPTRAM ST7 BATTERY на горно-добывающем предприятии. (Изображение с сайта <http://uicpro.ru/napravleniya-raboty/proekty-dlya-neftegazovogo-sektora/>)

Анализ показал, что если при проведении работ в шахте использовать технику на электрическом приводе, то это приведет снижению затрат за вентиляцию на 162 тыс. руб. в год. На данном этапе в расчете не учитывалась экономия от снижения расхода дизельного топлива. Заряжая транспортные средства от энергетической установки на твердооксидных топливных элементах, экономия составит 215 тыс. руб. в год. Приведено описание работы энергетической установки на ТОТЭ, схема взаимодействия энергетической установки на ТОТЭ и электрических погрузчиков SCOOPTRAM ST7 BATTERY на горнодобывающем предприятии. Для формирования полной картины снижения затрат при внедрении данных решений необходимо проведение дальнейших расчетно-аналитических работ на примере конкретного предприятия.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов Е.П., Новикова О.В., Дяченко А.С. Экономика и управление энергосбережением: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 591 с.
2. Карпенко М.С. Формирование организационного механизма управления энергосбережением на горнопромышленных предприятиях дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСиС, 2016.
3. J.Jeswiet, J.Archibald, U. Thorley, E. De Souza. Energy Use in Premanufacture (Mining) / Procedia CIRP 29 (2015) 816 – 821
4. Hui-qiShi. Mine Green Mining / Energy Procedia // Volume 16, Part A, 2012, Pages 409-416.
5. Способы разработки рудных месторождений / Кузьмин Е.В., Хайрутдинов М.М., Зенько Д.К. "Основы горного дела" [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.miningexpo.ru/useful/4901>.
6. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Экс В. В. Основные направления и перспективы развития энергоэффективных и экологически безопасных геотехнологий при разработке месторождений на больших глубинах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 6. – С. 5–9.
7. Д.Р. Каплунов, В.А. Юков. Энергосбережение в процессах подземной добычи медных руд. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 4. С. 5–17.
8. Техническое описание SCOOPTRAM ST7 BATTERY производителя Atlas CopCo [Электронный ресурс] - формат pdf
9. Сайт компании Artisanvehicles [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.artisanvehicles.com/news-and-media/>.
10. Презентация Electrical mining and other non-road mobile machinery International Conference Electric Mobility and Public Transport Santiago de Chile, 10-11 May 2017 Mikko Pihlatie, VTT [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://electromovilidad.org/wp-content/uploads/2017/05/Electric-mining-machinery.pdf>.
11. Kenneth D. Lawrence, Stephan Kudyba, Ronald K. Klimberg. Data Mining Methods and Applications. / Auerbach Publications // December, 2007 pp.336 ISBN 9780849385223.
12. Баскаков А. П., Волкова Ю. В. Физико-химические основы тепловых процессов : учебное пособие для студентов, обучающихся в магистратуре по направлению 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника». М.: Теплотехник, 2013. С. 172.
13. Sharaf O. Z., Orhan M. F. Renewable and Sustainable Energy Reviews. V. 32. 2014. Pp. 810–853.
14. S. Obara, J. Morel. Microgrid composed of three or more SOFC combined cycles without accumulation of electricity / International Journal of Hydrogen Energy // Volume 39, Issue 5, 4 February 2014, Pages 2297-2312.