УДК 622.6-83

Определение наработки и остаточного срока службы шахтных самоходных вагонов калийных рудников на основании данных комплексного контроля

Д.И.ШИШЛЯННИКОВ¹ , В.А.РОМАНОВ¹, И.Е.ЗВОНАРЕВ²

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Проанализированы статистические данные о надежности шахтных самоходных вагонов (ШСВ), эксплуатирующихся на калийных рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Определены основные узлы, лимитирующие ресурс ШСВ. Доказано, что наиболее распространенными отказами самоходных вагонов являются выход из строя ступиц колес, шестерен конического редуктора и ходовых электродвигателей. Выполнен анализ системы технического обслуживания и ремонта шахтных самоходных вагонов. Указано, что планово-предупредительная система ремонтов ШСВ характеризуется низкой эффективностью и высокими материальными затратами: зачастую обслуживание вагонов осуществляется по факту возникновения отказа, что приводит к длительным простоям не только конкретной доставочной машины, но и всего добычного комплекса. Предложен метод оценки технического состояния электромеханической части шахтного самоходного вагона по характеру потребляемой мощности. Указанный метод позволяет осуществлять контроль нагруженности приводов шахтного самоходного вагона, а также оценивать техническое состояние приводов доставочных машин в режиме реального времени.

По истечении нормативного срока службы шахтного самоходного вагона, указанного в эксплуатационной документации, дальнейшая его эксплуатация запрещается и вагон подлежит экспертизе промышленной безопасности. В рамках проведения экспертизы необходимо определять наработку и выполнять расчет срока службы шахтного самоходного вагона за пределами нормативного периода. Разработана методика определения остаточного срока службы шахтных самоходных вагонов на основании данных приборного контроля в условиях калийных рудников.

Ключевые слова: шахтный самоходный вагон; техническое состояние; нагруженность; привод; наработка; срок службы; аварийный отказ

Как цитировать эту статью: Шишлянников Д.И. Определение наработки и остаточного срока службы шахтных самоходных вагонов калийных рудников на основании данных комплексного контроля / Д.И.Шишлянников, В.А.Романов, И.Е.Звонарев // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 336-343. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.336

Введение. Для предприятий калийной промышленности актуальными являются задачи повышения надежности рудничного транспортирующего оборудования, увеличения производительности и снижения затрат на эксплуатацию, обслуживание и ремонт машин [8, 11]. Отсутствие научно обоснованных методик оценки величины наработки и остаточного ресурса узлов механических трансмиссий доставочных машин, низкая информативность и сложность реализации используемых методов контроля технического состояния приводят к росту количества аварийных отказов, устранение которых сопровождается длительными простоями не только конкретной транспортирующей машины, но и оборудования, работающего в комплексе с ней. От устойчивой работы шахтного самоходного вагона (ШСВ) как технологической единицы зависит производительность всего добычного комплекса, поэтому необходимо обеспечить эффективную и бесперебойную работу ШСВ.

Повышение эксплуатационной надежности самоходных вагонов калийных рудников возможно посредством разработки и внедрения бортовых систем непрерывного контроля параметров работы и технического состояния ШСВ как элемента системы мероприятий по поддержанию их готовности [10]. В основу работы указанных бортовых систем должны входить анализ регистрируемых данных, средства оповещения о недопустимом развитии событий и устройства аварийных защит [6, 12, 15, 16].

Основные сведения о надежности шахтных самоходных вагонов калийных рудников. На предприятиях Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей применяются самоходные вагоны типа 10ВС-15 и ВС-30 (рис.1) производства ООО «Управляющая компания «Рудгормаш». При действующей камерной системе разработки месторождения ШСВ являются основным видом транспорта горной массы от проходческо-очистного комбайна к участковым или магистральным транспортным средствам. Шахтные самоходные вагоны характеризуются высо-

Рис.1. Шахтные самоходные вагоны: а – 10BC-15; б – BC-30

кой производительностью и мобильностью, могут быть использованы для доставки пустой породы при ведении закладочных работ.

Однако базовые модели указанных вагонов проектировались 30-40 лет назад. Увеличивающаяся производительность современных выемочных машин обуславливает интенсификацию эксплуатации самоходных вагонов, что приводит к росту потока отказов. Анализ причин аварийных отказов позволяет сделать вывод о том, что чаще всего у шахтных самоходных вагонов выходят из строя узлы и элементы ходовой части, тяговые электродвигатели, электрооборудование (табл.1).

Таблица 1

Причины аварийных отказов шахтных самоходных вагонов

Узел, отказавший аварийно	Доля от общего числа аварийных отказов, %		
	5BC-15M	10BC-15	BC-30
Ступица ведущего колеса	15,6	18,2	31,9
Тяговый электродвигатель	11,5	16,9	15,1
Электродвигатель конвейера и маслостанции	2,6	11,4	7,9
Угловой (конический) редуктор	2,8	4,9	10,5
Редуктор конвейера и маслостанции	6,5	2,8	8,5
Магнитная станция управления	17,0	13,2	6,8
Питающий кабель	8,1	11,3	4,2
Цепь конвейера	13,0	0,9	1,4
Балки мостов	4,3	5,8	3,4
Тормозная система	4,5	3,8	1,2
Система подбора кабеля	6,2	5,7	2,6
Рулевое управление	2,2	1,9	2,4
Планетарный редуктор колеса	—	—	3,4

Наибольшую долю от общего количества аварийных отказов составляет разрушение ступиц колес, что обусловлено действием на колеса и ходовую часть ШСВ значительных нагрузок, особенно при выполнении маневровых операций, разгонов и торможений. У самоходных вагонов BC-30 (грузоподъемность 30 т) отказы ступиц составляют до трети от общего числа аварийных отказов шахтных самоходных вагонов.

Низкой надежностью характеризуются тяговые электродвигатели ШСВ. По данным эксплуатирующих организаций, наработка тяговых электродвигателей вагонов типа BC-30 составляет от шести месяцев до года. Основными причинами выхода из строя тяговых электродвигателей являются распайка бандажей и пробой обмоток, что вызвано повышенным нагревом [13]. Причиной аварийных отказов конических (угловых) редукторов, используемых в приводах хода ШСВ, является разрушение зубьев ведущей и ведомой шестерен. По информации, полученной от персонала сервисных служб, конические редукторы требуют сложных и постоянных регулировочных работ при монтаже и в процессе эксплуатации [8, 14].

Острой проблемой, возникающей при эксплуатации самоходных вагонов типа BC-30, является выход из строя шин и колес. У полностью загруженного калийной рудой вагона BC-30 нагрузка на колесо в полтора раза больше, чем у вагона типа 10BC-15. Три оси самоходного вагона BC-30 и независимый привод на каждое ведущее колесо обуславливают неравномерное распределение крутящих моментов между бортами, что определяет нарушение кинематики поворота, буксование шин, увеличение динамических нагрузок на шины и элементы приводов хода.

Колеса и шины ШСВ выходят из строя по следующим причинам: появление «грыжи» на боковых поверхностях шин; излом каркаса шины; трещины на боковине и в зоне «сухаря»; повреждения, полученные в процессе эксплуатации, – порезы, порывы, проколы; трещины и деформации ободьев бездисковых колес, замочных и бортовых колец [9]. Замена шин по причине износа протектора практически не производится. Характер повреждений говорит о том, что колеса работают под нагрузками, близкими к предельным. При челночной схеме работы, шины вагонов увеличенной грузоподъемности ВС-30 формируют колею на трассе движения, что обусловлено параметрами протектора шин, не рассчитанных на эксплуатацию на калийном руднике [9].

Нормативными документами завода-изготовителя и эксплуатирующих предприятий установлено проведение технического сервиса ШСВ с использованием планово-предупредительной системы организации ремонтных работ, что предполагает ежесменное, ежесуточное и ежемесячное обслуживание. Объем текущего ремонта самоходного вагона определяется на основе анализа выявленных отклонений от нормативных параметров, приведенных в руководстве по эксплуатации. Ремонт самоходного вагона выполняется в период и сроки проведения ремонта проходческо-очистного комбайна. Фактически же обслуживание и ремонт шахтных самоходных вагонов осуществляются на основе анализа информации, полученной в ходе диагностирования органолептическими методами, и по факту возникновения отказа.

Отсутствие бортовых систем мониторинга осложняет выполнение оценки эксплуатационной нагруженности узлов самоходного вагона, что затрудняет определение размера наработки и расчет остаточного ресурса горнотранспортной машины, не позволяет осуществлять своевременные ремонтные воздействия, направленные на предупреждение аварийных отказов.

Оценка нагруженности и технического состояния ШСВ по данным приборного контроля. Наиболее перспективным способом контроля технического состояния и параметров работы транспортирующих машин является анализ размера и характера нагрузок, действующих на приводы самоходных вагонов. Значения мгновенных нагрузок приводов определяются посредством замеров напряжений, токов и мощностей, потребляемых электродвигателями ШСВ. Значения и характер изменения энергетических параметров приводных двигателей являются наиболее достоверной и доступной первичной информацией для дальнейшего диагностирования [1, 3, 4].

Сотрудниками Пермского национального исследовательского политехнического университета разработан программно-регистрирующий комплекс «Ватур» (рис.2) [2].

Рис.2. Программно-регистрирующий комплекс «Ватур»: а – структурная схема; б – общий вид

Комплекс «Ватур» размещается внутри магнитной станции ШСВ. В состав комплекса входят процессорный блок, блок питания и коммутации, датчики тока и напряжения. Датчики тока представляют собой токовые клещи-адаптеры, посредством которых обеспечивается преобразование входного тока в выходное напряжение в соотношении 1 А:1 мВ. Датчик напряжения преобразует входное напряжение до 1000 В в выходное напряжение в соотношении 1 В:3 мВ. В процессе измерений данные сохраняются в энергонезависимой памяти комплекса.

«Ватур» регистрирует электрические параметры работы приводных двигателей вагона по двум вводам напряжения. Замеры выполняются с частотой 10 кГц. Первичная обработка мгновенных значений осуществляется программным обеспечением прибора в ходе эксперимента. Дальнейшая визуализация, обработка и анализ данных проводятся с помощью специализированного программного обеспечения «Ватур-офф» на персональном компьютере.

Исследования размера и характера изменения нагруженности приводов самоходных вагонов 10ВС-15 с использованием программно-регистрирующего комплекса «Ватур» проводились на одном из рудников ПАО «Уралкалий». Профиль трассы очистной камеры на начальном участке (по направлению от комбайна до места разгрузки) протяженностью 87 м имел угол наклона $\pm 2^\circ$. На остальном участке камеры угол наклона составлял $+4^\circ$. Длина трассы 102 м, самоходный вагон загружен полностью (15 т). Перед проведением исследований было измерено напряжение при отключенных приводах ШСВ (700 В).

В момент трогания с места вагона 10ВС-15 (рис.3) происходит падение напряжения до 611 В, пусковая мощность, потребляемая двумя электродвигателями хода, составляет 276 кВт. Кратковременное увеличение мощности до 179 кВт и падение напряжения до 646 В наблюдаются при переключении электродвигателей на вторую скорость. Таким образом, участок разгона ШСВ характеризуется наличием сверхнормативных нагрузок тяговых электродвигателей. При переключении привода на вторую скорость пиковая нагрузка по амплитуде меньше, чем при трогании вагона, но более продолжительная. Участок движения самоходного вагона (CD) на второй скорости характеризуется номинальным режимом работы приводов и отсутствием сверхнормативных нагрузок. На конечном участке трассы (DE) оператор самоходного вагона переключает ходовые двигатели на первую скорость для комфортного и безопасного подъезда к рудоспускной скважине.

В начале разгрузки вагона 10ВС-15 (рис.4) наблюдается кратковременное возрастание мощности электродвигателя конвейера до 127 кВт (четырёхкратная перегрузка). По мере разгрузки кузова самоходного вагона значение активной мощности снижается. Полная разгрузка ШСВ происходит за 55 с. Таким образом, в начале разгрузки руды электродвигатель конвейера и маслостанции ШСВ перегружены на 8-10 кВт (около 30 %).

Спектральный анализ сигналов активных мощностей, полученных посредством измерительного программно-регистрирующего комплекса «Ватур», позволяет выявить частотные составляющие от 0 до 25 Гц, которые характеризуют колебания кинематической цепи «колесо – редуктор – ходовой электродвигатель» (рис.5).

Дефекты в механических передачах ШСВ обуславливают возникновение переменных нагрузок, что вызывает появление новых спектральных составляющих. Периодическое измерение в спектре мощности значений, характеризующих конкретные дефекты в механической трансмиссии и приводном электродвигателе, позволяет выполнять оценку технического состояния привода доставочной машины и, при необходимости, осуществлять ремонтные воздействия, направленные на предупреждение аварийных отказов. В трансмиссиях ходовых приводов ШСВ по характеру изменения сигнала мощности могут быть диагностированы неисправности зубчатых зацеплений, перекосы ведомых валов и их опор вращения, посадки шестерен на вал, несоосность выстраиваемых в одну линию ведомых валов [5]. В асинхронных электродвигателях диагностируются дефекты электрической части ротора, включая обрывы обмотки ротора и замыкания пластин сердечника; электрической части статора, включая обрывы и электрическую несимметрию силовой обмотки, замыкания пластин сердечника; статический и вращающийся эксцентриситеты; дефекты подшипников, приводящие к изменениям воздушного зазора.

Оценка наработки ШСВ по данным приборного контроля. Шахтный самоходный вагон как техническое устройство применяемое на опасном производственном объекте, подлежит экспертизе промышленной безопасности по истечении нормативного срока службы. В рамках про-

Рис.3. Графики изменения энергетических параметров приводных электродвигателей груженого вагона 10BC-15

1 – график напряжения; 2 – график суммы активных мощностей тяговых электродвигателей вагона; AB – пуск электродвигателей хода; BC – движение ШСВ на первой скорости; CD – равномерное движение ШСВ на второй скорости; DE – подъезд вагона к рудоспуску на первой скорости

Рис.4. График изменения энергетических параметров электродвигателя конвейера и маслостанции при разгрузке вагона 10BC-15

1 – график напряжения; 2 – график активной трехфазной мощности

Рис.5. Спектр сигнала активной мощности ходового электродвигателя шахтного самоходного вагона 10BC-15:

1 – частота вращения колеса ($f = 0,4$ Гц); 2 – частота вращения сателлитов планетарного редуктора ($f = 0,95$ Гц); 3 – частота вращения ведомой шестерни конического редуктора ($f = 5,4$ Гц); 4 – частота вращения вала приводного двигателя ($f = 16,1$ Гц)

ведения экспертизы промышленной безопасности необходимо определить наработку самоходного вагона и остаточный срок службы – календарный период, на который может быть продлена эксплуатация горнотранспортной машины (ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике: Основные понятия. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 28 с.; Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» (утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 декабря 2013 г. № 599; зарегистрировано в Минюсте России 2 июня 2014 г., рег. № 32935), 2013. 108 с.).

Известно, что постепенные и внезапные отказы оборудования, вызванные износом, деформацией и поломками деталей, можно описать с единой энергетической точки зрения [1, 5, 6]. Исследования усталостного разрушения металлов показывают, что материал детали разрушается

при достижении критического значения внутренней энергии. Следовательно, каждый элемент ШСВ характеризуется заданной энергетической наработкой, которую можно определить количественно, зная нормативный срока службы и параметры режима работы самоходного вагона.

Расчетная наработка ШСВ определяется по формуле

$$A_p = \frac{JU\eta T_n k_{cm} \cdot 24 \cdot 365}{1000 k_n},$$

где A_p – расчетная наработка ШСВ, кВт·ч; J – номинальный ток, А; U – питающее напряжение, В; η – КПД электродвигателя хода ШСВ; T_n – нормативный срок службы самоходного вагона, назначенный заводом-изготовителем, лет; k_{cm} – коэффициент внутрисменного использования машины, учитывающий выполнение операций, не связанных с основной работой по погрузке и транспортированию, принимается $k_{cm} = 0,7$ [7]; k_n – коэффициент неравномерности грузопотока, для расчета самоходного вагона принимается соответствующим наибольшей неравномерности и равным двум [7].

Фактическая наработка привода хода ШСВ определяется по счетчику электроэнергии или по непрерывной записи активной мощности двигателя контролируемого привода хода за период расчета от начала эксплуатации до фактического времени проведения контроля T_ϕ :

$$A_\phi = \int_0^{T_\phi} P(t) dt,$$

где A_ϕ – фактическая работа, выполненная приводом хода ШСВ, кВт·ч; $P(t)$ – активная мощность, потребляемая электродвигателями вагона с учетом потерь в двигателе, кВт.

Остаточная наработка самоходного вагона рассчитывается по формуле

$$\Delta A = A_p - A_\phi.$$

При расчете назначенного срока службы ШСВ необходимо учитывать, что агрессивная шахтная атмосфера, штыб, пыль оказывают негативное влияние на узлы и механизмы горно-транспортной машины, подвергая их засорению, коррозии и, как следствие, выходу из строя.

Незаменимым, базовым, элементом ШСВ является кузов как несущая металлоконструкция, испытывающая большие нагрузки, но ее ремонт не предусмотрен нормативной технической документацией завода-изготовителя и эксплуатирующего предприятия. Кузов ШСВ не разрушается аварийно, а изнашивается постепенно.

На кузов вагона (на днище скребкового конвейера) действует коррозионный, усталостный и абразивный износ, обусловленный действием веса и истирающим воздействием горной массы. Указанный износ приводит к потере толщины металла, который может контролироваться в условиях шахты с помощью специализированного оборудования. По остаточной толщине металлоконструкции кузова оцениваем степень его износа:

$$k_{изн} = \frac{l_{тек} - l_{пр}}{l_{нач} - l_{пр}},$$

где $k_{изн}$ – коэффициент износа, показывающий во сколько раз снижен срок службы ШСВ при соответствующем износе основного элемента (кузова) вагона; $l_{пр}$ – предельно допустимая толщина днища кузова, мм; $l_{тек}$ – остаточная толщина днища кузова, мм; $l_{нач}$ – начальная толщина днища кузова, мм.

Определение остаточной толщины $l_{тек}$ днища кузова самоходного вагона осуществляется по данным приборного контроля – ультразвуковой толщинометрии. Абразивный износ кузова ШСВ происходит неравномерно: наибольшие потери металла фиксируются в месте загрузки руды в ШСВ, минимальный износ – в области разгрузки (табл.2). Схема кузова самоходного вагона с точками замеров представлена на рис.6.

Таблица 2

Результаты толщинометрии днища самоходного вагона ВС-30

Номер сечения днища кузова	Номер точки замера	Измеренные значения $l_{тек}$, мм
1	1.1	6,4
	1.2	7,0
	1.3	6,7
2	2.1	7,6
	2.2	7,0
	2.3	7,0
3	3.1	8,4
	3.2	8,1
	3.3	7,6
4	3.1	9,5
	3.2	9,6
	3.3	9,6

Примечание. Начальная толщина $l_{нач} = 10$ мм.

Рис.6. Схема кузова самоходного вагона ВС-30 с точками замеров толщины днища

Для расчета назначенного срока службы выбирается минимальная остаточная толщина днища кузова вагона $l_{\text{тек}}$. Предельно допустимая толщина днища кузова $l_{\text{пр}}$ определяется по результатам прочностных расчетов.

Остаточный срок службы самоходного вагона $T_{\text{о.сл}}$ рассчитывается с учетом фактического технического состояния базового элемента (кузова) и срока службы ШСВ на момент выполнения расчета:

$$T_{\text{о.сл}} = \frac{\Delta A}{A_{\text{ф}}/T_{\text{ф}}} k_{\text{изн}},$$

где $T_{\text{ф}}$ – фактический срок службы самоходного вагона на момент выполнения расчета, лет.

Величина $A_{\text{ф}}/T_{\text{ф}}$ характеризует среднегодовую фактическую наработку ШСВ в киловатт-часах. Отношение остаточной наработки самоходного вагона к среднегодовой позволяет определить остаточный срок службы горнотранспортной машины с поправкой на износ базового элемента.

Заключение. Непрерывная регистрация мощностей, потребляемых электродвигателями самоходного вагона, позволяет осуществлять контроль эксплуатационной нагруженности узлов и элементов привода доставочной машины, а также выполнять оценку ее технического состояния.

Предложенный подход определения назначенного срока службы ШСВ позволяет:

- объективно оценить наработку самоходного вагона в реальных условиях эксплуатации;
- на основе приборного контроля определить степень износа незаменимых в процессе эксплуатации элементов вагона;
- выполнить требование Ростехнадзора при проведении экспертизы промышленной безопасности технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов С.Л. Повышение ресурса трансмиссий горных машин на основе оценки энергонагруженности их элементов / Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 1999. 92 с.
2. Исследование нагруженности и возможности прогнозирования энергоресурса приводов исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» / Г.Д.Трифанов, А.А.Князев, Н.В.Чекмасов, Д.И.Шишлянников // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 2. С. 41-44.
3. Коломийцев М.Д. Эксплуатация горных машин и автоматизированных комплексов / Ленинградский горный институт. Л., 1988. 96 с.
4. Красников Ю.Д. Повышение надежности горных выемочных машин / Ю.Д.Красников, С.В.Солод, Х.И.Хазанов. М.: Недра, 1989. 215 с.
5. Обоснование рационального способа контроля параметров работы и технического состояния проходческо-очистных комбайнов калийных рудников / Д.И.Шишлянников, Н.В.Чекмасов, М.Г.Трифанов, С.Л.Иванов, И.Е.Звонарев // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 3. С. 110-115.
6. Повышение эффективности эксплуатации проходческо-очистных комбайнов калийных рудников на основе анализа записей регистраторов параметров / Д.И.Шишлянников, Н.В.Чекмасов, М.Г.Трифанов, В.В.Габов, С.Л.Иванов, С.А.Асонов // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 4 (113). С. 3-10.
7. Пухов Ю.С. Рудничный транспорт. 2-е издание, переработанное и дополненное М.: Недра, 1991. 255 с.
8. Романов В.А. Опыт эксплуатации шахтных самоходных вагонов на рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / В.А.Романов, Д.И.Шишлянников, А.К.Муравский // Горное оборудование и электромеханика. 2016. № 9. С. 29-33.
9. Шишлянников Д.И. Опыт эксплуатации шин и колес шахтных самоходных вагонов калийных рудников / Д.И.Шишлянников, А.Б.Максимов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов XIV международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р.Кубачека». Екатеринбург: УГТУ, 2016. С. 89-92.
10. Brodny J. Application of elements of TPM strategy for operation analysis of mining machine / J.Brodny, M.Tutak // IOP conference series: earth and environmental science. 2017. Vol. 95, Iss. 4. Article number 042019. DOI: 10.1088/1755-1315/95/4/042019
11. Cakdi S. Heavy haul coal car wheel load environment-rolling contact fatigue investigation / S.Cakdi, S.Cummings, J.Punwani // 2015 Joint Rail Conference. San Jose, California, USA, Marh 23-26. Article number 112635. DOI: 10.1115/JRC2015-5640

12. Development of parameters for dynamic modeling of underground haulage vehicles / C.C.Jobes, P.Bissert, N.Mahmoudian, B.Li // ASME 2016 international mechanical engineering congress and exposition, IMECE 2016. Article number 128056. DOI: 10.1115/IMECE201665381
13. Fault detection of broken rotor bar in LS-PMSM using random forests / J.C.Quiroz, N.Mariun, M.R.Mehrjou, M.Izadi, N.Misron, M.A.Mohd Radzi // Measurement: Journal of the international measurement confederation. 2017. Vol. 116. P. 273-280. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.11.004
14. Gerike B. Development of the preventive maintenance system for belt conveyors reducers / B.Gerike, I.Panachev, E. Kuzin // E3S Web of Conferences 2017. Vol. 15. Article number 03008. DOI: 10.1051/e3sconf/20171503008
15. Holtzhausen W.H. A comparative study between shuttle cars and battery haulers // The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2014. Vol.114. № 4. P. 299-304.
16. Segopolo P.R. Optimization of shuttle car utilization at an underground coal mine // The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2015. Vol. 115. № 4. P. 285-296.

Авторы: **Д.И.Шишлянников**, канд. техн. наук, доцент, 4varjag@mail.ru (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия), **В.А.Романов**, аспирант, romanovs06@mail.ru (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия), **И.Е.Звонарев**, канд. техн. наук, доцент, Zvonarev IE@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 29.11.2018.

Статья принята к публикации 14.05.2019.