



Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов в условиях холодных районов с использованием цифрового двойника автотранспортного предприятия

А. Н. Борисенко ✉

Хакасский технический институт – филиал Сибирского федерального университета, Абакан, ул. Щетинкина, 27, 655017, Российская Федерация

✉ aiah@mail.ru



Аннотация. Рассмотрена проблема увеличения числа отказов, простоев, затрат на техническое обслуживание и ремонт карьерных автосамосвалов БелАЗ серий 7513 и 7530, которые эксплуатируются на угольных разрезах в экстремальных климатических условиях Республики Хакасия. Проведена оценка удельных фактических простоев автомобилей БелАЗ серий 7513 и 7530 во время ремонта и техобслуживания. Значения варьируются от 3 до 60 часов на 100 мото-часов работы автосамосвала при нормативе для холодного климата Хакасии в 14–15 часов. Предложен метод температурной корректировки периодичности технического обслуживания в зимний период с целью сокращения периодичности плановых техосмотров и уменьшения объема внеплановых ремонтных работ. Предложен порядок совершенствования системы техобслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов БелАЗ в условиях холодного климата с учетом возраста автомобилей, низких температур и анализа надежности конструкции. В целях совершенствования системы технического обслуживания и ремонта автосамосвалов предложено внедрить в работу цифровой двойник автотранспортного предприятия. Он позволит применить индивидуальный подход к планированию технического обслуживания карьерных автосамосвалов с корректировкой периодичности всех видов технических обслуживаний при отрицательных температурах воздуха, внедрить перечень дополнительных операций, приуроченных к плановым, что приведет к уменьшению числа внеплановых ремонтов и линейных отказов.

Ключевые слова: система технического обслуживания и ремонта, карьерные автосамосвалы, технология цифрового двойника, удельное время простоя, дополнительные операции технического обслуживания, температурная корректировка периодичности технического обслуживания

Для цитирования: Борисенко А. Н. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов в условиях холодных районов с использованием цифрового двойника автотранспортного предприятия. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024;(4):88–97. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-4-88-97>

Enhancement of the maintenance and repair system for haul trucks in cold regions using a digital twin of the transportation enterprise

Alexander N. Borisenko ✉

Khakas Technical Institute – Branch of the Siberian Federal University, Abakan, 27 Shchetinkina St., 655017, Russian Federation

✉ aiah@mail.ru



Abstract. This study addresses the increasing number of failures, downtime, and maintenance and repair costs associated with BelAZ 7513 and 7530 series haul trucks operating in the extreme climatic conditions of Khakassia's coal mines. An assessment of the actual specific downtime for these trucks during repair and maintenance reveals values ranging from 3 to 60 hours per 100 operating hours, significantly exceeding the 14-15-hour standard for Khakassia's cold climate. A method of temperature correction for maintenance frequency during winter was proposed to reduce scheduled maintenance frequency and the volume of unscheduled repairs. This study further proposes improvements to the maintenance and repair system for BelAZ haul trucks in cold climates, considering truck age, low temperatures, and a reliability analysis of the truck design. To optimize this system, the implementation of a digital twin for the transportation enterprise was suggested. This digital twin will enable individualized maintenance scheduling for each haul truck, adjusting the frequency of all maintenance procedures based on negative air temperatures. The digital twin will also facilitate the integration of additional maintenance list into the scheduled maintenance plan, thereby minimizing unscheduled repairs and equipment failures.

Keywords: maintenance and repair system, haul trucks, digital twin technology, downtime, additional maintenance procedures, temperature correction for maintenance frequency

For citation: Borisenko A. N. Enhancement of the maintenance and repair system for haul trucks in cold regions using a digital twin of the transportation enterprise. *Architecture, Construction, Transport*. 2024;(4):88–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-4-88-97>



1. Введение

Количество отказов, простоев и затрат при эксплуатации автомобилей увеличивается в холодное время года. Особенно это заметно при эксплуатации большегрузных карьерных автосамосвалов.

В зимний период в Южно-Якутском регионе почти в 6 раз увеличивается поток отказов автосамосвалов, что приводит к значительному увеличению простоев, которые составляют до 50 % календарного времени [1], при эксплуатационных затратах, значительно превышающих аналогичные расходы в районах России с умеренным климатом. Предлагается в условиях Севера независимо от времени года уменьшить периодичность технического обслуживания (ТО) примерно на 10 %, увеличить трудоемкость ТО и регламентированных ремонтов до 15 %. Норматив трудоемкости текущего ремонта (ТР) предлагается увеличить до 66.1 человеко-часов на 100 мото-часов, это означает, что объем внепланового ремонта и линейных отказов предполагается значительным. По нашему мнению, при планировании ТО, планово-предупредительных ремонтов (ППР) в северных и других холодных регионах необходимо учитывать время года и корректировать нормативы при отрицательных температурах воздуха.

В работе [2] приведены результаты исследований надежности автосамосвалов БелАЗ в Кузбассе – холодном климатическом районе. Делается вывод о необходимости организации ТО по фактическому состоянию, то есть когда накоплена база данных параметров технического состояния машин. Для обработки большого количества данных рекомендовано использовать искусственный интеллект.

В ряде зарубежных статей приводятся различные методы и результаты анализа надежности автосамосвалов и другой карьерной техники [3–5]. Авторы отмечают, что система ТО и ремонта должна разрабатываться индивидуально для каждого автомобиля, зависеть от возраста автосамосвалов и формироваться на основании потока отказов и параметров технического состояния автосамосвалов.

Известен зарубежный опыт применения в транспортной сфере систем поддержки принятия решений (СППР) по корректированию периодичности технического обслуживания самолетов на основе поступающей в реальном времени информации от бортовых датчиков [6].

Транспортная стратегия РФ до 2030 г. указывает на необходимость внедрения информационных технологий на автомобильном транспорте. Одним из средств реализации стратегии являются

автоматизированные СППР, помогающие в принятии решений в условиях неопределенности и большого количества исходных данных. В работе [7] рассмотрены уже существующие и хорошо зарекомендовавшие себя СППР на автомобильном транспорте. Например, цифровой двойник автотранспортного предприятия.

В общем понимании цифровой двойник – это виртуальное представление производственной системы. Он может работать на различных моделях и синхронизируется с реальной системой благодаря подключенным интеллектуальным устройствам, математическим моделям и обработке данных в реальном времени.

Зарубежные авторы [8] предлагают классифицировать цифровые двойники на категории в зависимости от уровня интеграции данных. Одной из категорий является «Техническое обслуживание машин». В задачи таких цифровых двойников входит:

- определять влияние изменений состояний машин на общие процессы системы в целом;
- определять и оценивать меры упреждающего обслуживания машин;
- использовать описательные методы и алгоритмы машинного обучения для оценивания состояния машин;
- интегрировать, анализировать и обрабатывать данные, полученные на разных этапах жизненного цикла машины, для достижения большей прозрачности «состояния здоровья» машины и т. п.

На крупных добывающих предприятиях, как правило, уже применяются информационные системы, обновляемые базы данных, которые можно использовать для создания цифрового двойника предприятия. В статье приведен один из возможных алгоритмов совершенствования обработки имеющихся данных и развития информационных систем для постепенного перехода к полноценному цифровому двойнику предприятия.

Ранее нами был проведен анализ эффективности технической эксплуатации автосамосвалов БелАЗ ООО «СУЭК-Хакасия» [9]. Установлено, что холодные зимы с низкими температурами воздуха (до -40 °С) приводят к увеличению количества ремонтов и, соответственно, продолжительности и трудоемкости внеплановых ремонтов техники в зимние месяцы [10].

Предложено фиксировать данные мониторинга не только по отказам и неисправностям агрегатов и систем автомобилей, но и удельные простои в ТО и ремонте (в часах на 100 мото-часов работы), а также температуру окружающего воздуха.

2. Материалы и методы

В статье рассматривается возможность улучшения системы ТО и ремонта карьерных автосамосвалов с помощью СППР. В качестве методов исследования использовались различные технологии обработки данных с целью получения нового информационного продукта для СППР.

Обработка данных в данном случае предполагает три этапа:

1. *Сравнительный анализ фактических и нормативных показателей периодичности ТО*, простоев в ТО и ремонте, коэффициента технической готовности и других по каждому самосвалу за определенный период (например, год). В информационной базе предприятия должны храниться все нормативные показатели и фактические данные по наработкам, отказам и неисправностям, простоям в ТО и ремонте, перечню выполненных операций ТО, температуре окружающего воздуха и т. д.
2. *Анализ надежности (безотказности)*. Он подразумевает обработку информации по отказам и неисправностям каждого автосамосвала и в целом по группе. Определяется фактическая и средняя наработка на отказ, составляются вариационные ряды наработок по основным системам, агрегатам, элементам. Для упрощения каждому элементу может быть присвоен код в соответствии с классификатором элементов. Далее оцениваются точечные и интервальные

показатели эксплуатационной надежности по элементам, выявляются законы распределения наработок на отказ. На данном этапе разрабатываются перечни дополнительных к основным ступеням ТО (1, 2, 3) операций как индивидуально для каждого автомобиля, имеющего высокие удельные простои, так и в целом по группе.

3. *Применение температурной корректировки периодичности ТО в зимний период в холодных климатических районах (предложено автором).*

3. Результаты и обсуждение

На простои автотранспорта влияет множество факторов: погрузка/разгрузка транспортных средств, различные организационные моменты на предприятии, погодные условия, неукомплектованность штата сотрудников и даже обед водителей. Подробный анализ простоя каждого самосвала с указанием количества часов был проведен нами в работе [9] на основании данных, предоставленных предприятием ООО «СУЭК-Хакасия». Годовой фонд времени каждого автомобиля составляет 8 760 ч в условиях круглогодичной круглосуточной посменной (по 12 часов) работы водителей, фактическая наработка зависит от продолжительности простоев.

Время простоев автосамосвалов различается в зависимости от времени года. Так, в летние месяцы простои случаются из-за неравномерности добычи угля, перебоев с отгрузкой на железнодорожный транспорт и др. В зимние месяцы значительно больше простоев из-за отказа/поломки оборудования (рис. 1), что подтверждают инженеры ООО «СУЭК-Хакасия».

В данном исследовании предложены корректирующие действия с учетом температуры воздуха и пробега автомобиля именно в зимнее время по причине увеличения числа отказов.

Первый этап: сравнительный анализ фактических и нормативных показателей

В качестве способа оценки работоспособности автосамосвалов был принят сравнительный анализ фактических и нормативных удельных простоев в ТО, ППР и ремонте (ч/100 мото-часов) для каждой машины.

Согласно положению о техническом обслуживании и ремонте¹, нормативное удельное время простоя в ППР, ТО и ремонте для автосамосвалов БелАЗ серий 7513 и 7530, эксплуатируемых в

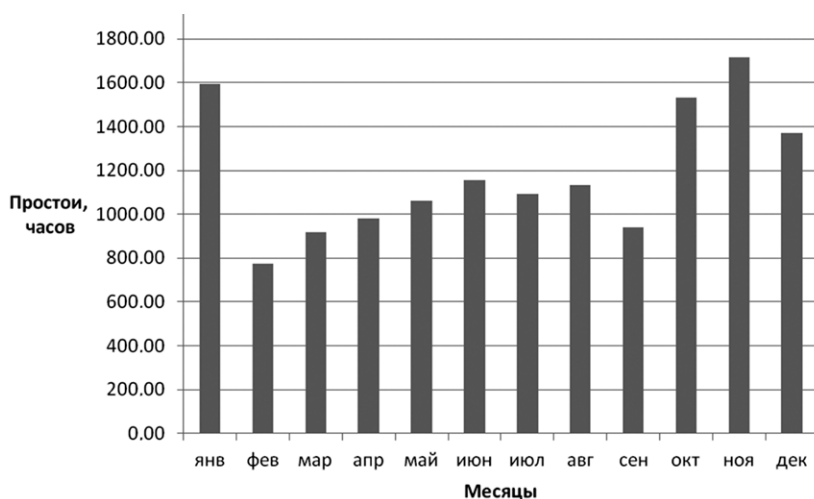


Рис. 1. Простои самосвалов БелАЗ-75306 за 2018 г. по причине отказа/поломки оборудования (график составлен автором)
Fig. 1. Downtime of BelAZ-75306 haul trucks in 2018 due to equipment failure/breakdown (graph compiled by the author)

¹ Положение о техническом обслуживании, диагностировании и ремонте карьерных автосамосвалов «БелАЗ». Жодино; 2013. 22 с.

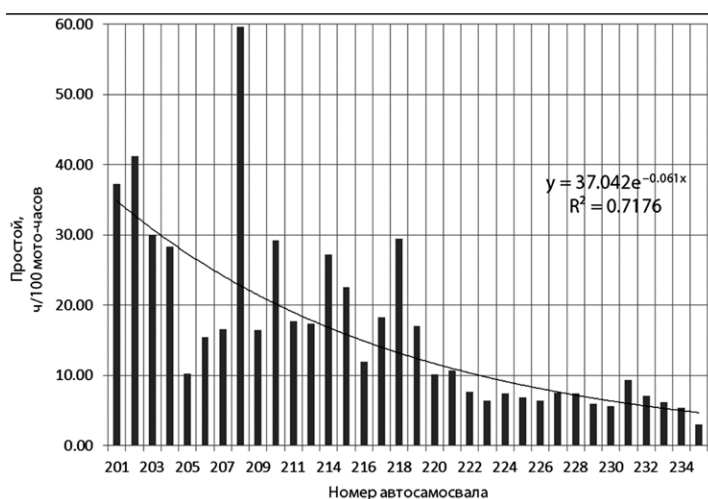


Рис. 2. Удельный простой в ТО и ремонте автосамосвалов БелАЗ серии 7530 (факт) (график составлен автором)

Fig. 2. Specific downtime during maintenance and repair of BelAZ 7530 series haul trucks (actual data) (graph compiled by the author)

холодном климатическом районе Республики Хакасия, составляет не более 14–15 ч/100 мото-часов. Однако, поскольку в конструкцию автомобиля постоянно вносятся изменения для увеличения срока службы без сбоев, нормативное удельное время простоя в соответствии с условиями конкретного предприятия должно определяться самим предприятием и, очевидно, будет уменьшаться для автомобилей, вновь вводимых в эксплуатацию.

В качестве примера на рис. 2 приведен график изменения фактических удельных простоев самосвалов БелАЗ: порядок расположения машин определяется вводом их в эксплуатацию (чем больше номер автомобиля, тем меньше срок его службы).

На графике видно, что показатель удельных простоев, как правило, снижается при уменьшении срока службы машины. На практике это означает, что удельные простои новых автомобилей значительно ниже аналогичных показателей транспорта, находящегося давно в эксплуатации. Увеличение удельных простоев связано с большим объемом внеплановых ремонтов и линейных отказов. Простои в капитальном ремонте здесь не учитывались.

Необходимо отметить, что автомобили 205 (5-й год эксплуатации) и 216 (4-й год эксплуатации) также имеют хорошие показатели. Это объясняется тем, что на данных автосамосвалах работали опытные экипажи водителей. В данном случае отчасти виден эффект влияния опыта и квалификации водителей на эксплуатационные показатели работы транспорта, а также внедрения беспилотных автосамосвалов, настроенных на оптимальные режимы вождения.

Проведение такого анализа позволяет выявить сверхнормативные простои некоторых самосвалов и разработать соответствующие корректирующие мероприятия в виде дополнительных операций, приуроченных к плановым видам ТО. Более низкие показатели простоя в ТО и ремонте наблюдаются у самосвалов, срок службы которых составляет менее двух лет (на рис. 2 это самосвалы с номерами с 222 по 234), у автомобилей с возрастом от 3 лет этот показатель увеличивается и превышает норматив.

Второй этап: анализ надежности (безотказности)

Проводится по методике, приведенной в [11]. Для самосвалов, у которых удельные простои превышают норматив, рекомендуется корректировка номенклатуры и периодичности проводимых работ с учетом фактического изменения технического состояния.

Для группы самосвалов БелАЗ-75306 наработки наиболее часто встречающихся отказов и неисправностей оказались в интервале 250–4500 мото-часов (по данным за 2018 г.). В работе [9] предложено внедрить дополнительный перечень операций, приуроченных к плановым работам ТО (1, 2, 3), с целью уменьшения внеплановых ремонтов и линейных отказов. В таблице 1 приведены их количество и периодичность.

Таблица 1. Количество дополнительных операций и их периодичность для группы автомобилей БелАЗ-75306
 Table 1. Number of additional operations and their frequency for a group of BelAZ-75306 haul trucks

| Периодичность операций, мото-часы | Количество операций, ед. | Периодичность операций, мото-часы | Количество операций, ед. |
|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| 250 | 8 | 1 500 | 1 |
| 500 | 3 | 2 250 | 2 |
| 750 | 3 | 3 750 | 3 |
| 1 000 | 4 | 4 500 | 2 |
| 1 250 | 1 | | |

При внедрении цифрового двойника автотранспортного предприятия дополнительные перечни операций должны разрабатываться оперативно в режиме реального времени индивидуально для каждого автосамосвала с повышенными показателями удельных простоев в ТО и ремонте.

Третий этап: применение температурной корректировки периодичности ТО в зимний период

Дальнейшее совершенствование системы ТО и ремонта автомобилей, в том числе карьерных самосвалов, на наш взгляд, должно заключаться в более тщательном учете климатических и других условий. Например, в холодных климатических районах корректировку нормативов нужно проводить именно в зимнее время, когда температура окружающего воздуха отрицательная. Однако такой подход возможен только на основе применения информационных технологий и систем на автомобильном транспорте [12].

Чтобы устранить недостатки существующего традиционного метода планирования, мы предлагаем встроить в существующие СППР алгоритм индивидуального подхода к процессу планирования ТО. Для этого необходимо корректировать не норматив периодичности ТО, а ежедневный фактический пробег (км) или наработку (мото-часы) автомобиля L_E с помощью коэффициента сложности маршрута K_M и коэффициента низких температур K_T :

$$L'_E = L_E \cdot K_M \cdot K_T$$

Полученные скорректированные данные ежедневных фактических пробегов и ежедневных скорректированных пробегов следует учитывать в электронных лицевых карточках автомобилей для целей планирования ТО.

Понятие коэффициента сложности маршрута здесь аналогично тому, что используется при внедрении дифференцированных маршрутных норм расхода топлива [13]. На наш взгляд, коэффициент K_M при корректировании ежедневных пробегов должен находиться в интервале от 1.00 до 1.40, чтобы не противоречить положению о ТО и ремонте подвижного состава АТ², хотя значения интервала могут быть уточнены в результате специально проведенных исследований. Например, значения коэффициента K_M можно установить дифференцировано, учитывая дорожное покрытие, рельеф местности, количество остановок на 1 км пробега, среднюю скорость движения на маршруте и т. д. Для карьерных автосамосвалов этот коэффициент рекомендуется увеличивать при плохом дорожном покрытии, превышении уклонов сверх норматива, коэффициенте использования грузоподъемности более 1 и пр.

При выборе значений коэффициента низких температур K_T можно опираться на исследования тюменских ученых, например, на [14].

¹ Положение о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=131510> (дата обращения: 10.08.2024).

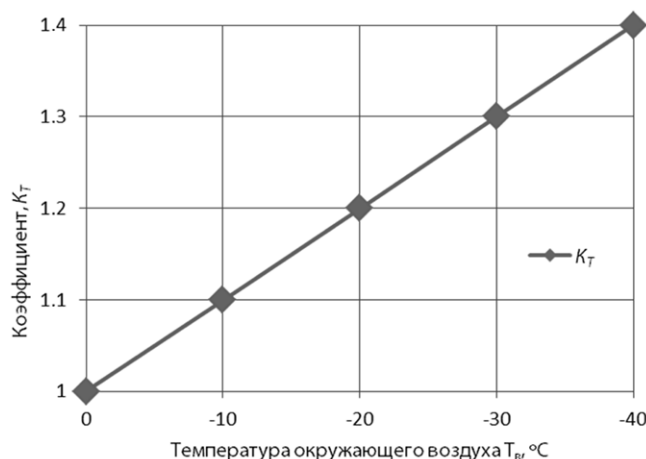


Рис. 3. Зависимость коэффициента K_T от температуры окружающего воздуха T_B (график составлен автором)

Fig. 3. Dependence of the coefficient K_T on ambient air temperature T_B (graph compiled by the author)

Установлено [15, 16], что при эксплуатации автомобилей в зимнее время в холодном климатическом регионе теряется приблизительно 30 % ресурса двигателя. В первом приближении значения коэффициента K_T можно определять, используя зависимость K_T от температуры окружающего воздуха T_B . Принята аналогичная линейная зависимость, используемая в системе корректирования зимних норм расхода топлива (рис. 3).

Можно констатировать, что в современных условиях эксплуатации карьерных автосамосвалов в холодных климатических районах дальнейшее совершенствование системы ТО и ремонта возможно только на основе обработки большого количества оперативных данных [14, 17]. Это предполагает наличие на предприятии развитой информационной системы, желательно с внедрением СППР, например, в виде цифрового двойника автотранспортного предприятия.

Следует также отметить, что ранее Положение о ТО и ремонте подвижного состава АТ состояло из двух обязательных частей. Во второй части приводились нормативы ТО и ремонта для определенной марки автомобилей, а в первой части – система корректирования нормативов в зависимости от условий эксплуатации. В настоящее время первая часть Положения утратила практическое значение. Нормативы ТО и ремонта заводы-изготовители (например, БелАЗ) предлагают в виде собственных положений либо в виде сервисных книжек. В этих документах, как правило, отсутствуют рекомендации по корректированию нормативов в разных условиях эксплуатации, не прописаны права дилеров и эксплуатирующих организаций на возможности внедрения более совершенных систем ТО и ремонта. То есть отсутствует правовая основа внедрения всех новшеств, о которых упоминалось выше. На наш взгляд, для нашей страны с ее многообразием климатических и других условий рекомендации по корректировке режимов ТО и ремонта должны быть. Также должны быть прописаны права эксплуатирующих организаций на внедрение современных высокоэффективных СППР.

4. Заключение

В условиях холодного климата вопросы эксплуатации и ремонта карьерной техники приобретают особую актуальность, особенно в зимнее время. Предложено усовершенствовать алгоритм обработки данных по оценке работоспособности каждого самосвала, используя метод температурной корректировки (в данном исследовании учитывались только простои транспорта в ТО, ППР и ремонте). Определено:

1. Простои карьерных автомобилей БелАЗ во время проведения ремонта и техобслуживания составляют от 3 до 60 часов на 100 мото-часов работы при нормативе в 14–15 часов. Доля удельных фактических простоев в ТО и ремонте для карьерных самосвалов возрастом до 3 лет невысока, следовательно, рекомендуем применять систему ТО и ремонта в соответствии

- с рекомендациями завода-изготовителя. Для автомобилей старше 3-х лет требуется ввести дополнительные корректирующие мероприятия, приуроченные к плановым видам ТО.
2. Постоянный мониторинг потока отказов и неисправностей, удельных простоев в ТО и ремонте индивидуально по каждому автомобилю серии БелАЗ 75306 показал, что необходимо введение дополнительных операций, приуроченных к ТО, на основе анализа надежности с целью уменьшения объема внеплановых ремонтов. В статье рассмотрена периодичность операций от 250 до 4 500 мото-часов, количество дополнительных операций варьируется от 1 до 8.
 3. В холодных климатических районах, к которым относится Хакассия, в связи с увеличением сверхнормативных простоев в зимнее время необходимо проводить температурную корректировку периодичности ТО. Она предполагает корректировку не норматива периодичности ТО, а ежедневного фактического пробега машины L_E с учетом коэффициента сложности маршрута K_M и коэффициента низких температур K_T (наблюдается линейная зависимость значения коэффициента от температуры: так, если при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $K_T = 1$, то при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $K_T = 1.4$). Температурная корректировка позволит уменьшить периодичность первого, второго и третьего технических обслуживаний в зимнее время и сократит объем внеплановых работ.

Важно отметить, что успешно реализовать предложенный метод с использованием той информационной системы, которая в настоящее время есть на предприятии, невозможно. Спрогнозировать необходимый график ТО с учетом технического состояния, фактических простоев и других важных показателей каждого карьерного самосвала, применить метод температурной корректировки можно только на основании анализа большого количества оперативных данных. Решить данную проблему можно посредством внедрения цифрового двойника автотранспортного предприятия (программа уже успешно реализуется на ряде крупных предприятиях страны). Это позволит планировать ТО каждого карьерного автосамосвала индивидуально с учетом оперативных данных (технического состояния, удельных простоев и т. д.), корректировать периодичность ТО при отрицательных температурах воздуха, осуществлять наряду с плановыми дополнительные операции с целью предупреждения внеплановых ремонтов и линейных отказов.



Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The author declares no relevant conflict of interest.

Список литературы

1. Квагинидзе В. С., Корецкая Н. А. Эффективность системы технических обслуживаний и ремонтов большегрузных карьерных автосамосвалов, эксплуатирующихся в условиях Севера. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011;(55):198–217. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17231246>.
2. Кузин Е. Г., Пудов Е. Ю., Дубинкин Д. М. Анализ отказов узлов карьерных самосвалов в условиях эксплуатации. *Горное оборудование и электромеханика*. 2021;(2):55–61. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2021-2-55-61>
3. Alla H. R., Hall R., Apel D. B. Performance evaluation of near real-time condition monitoring in haul trucks. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;30(6):909–915. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.05.024>
4. Kalra V. M., Thakur T., Pabla B. S. Condition based maintenance management system for improvement in key performance indicators of mining haul trucks – a case study. In: *IEEE International Conference on Innovative Research and Development*. Bangkok: IEEE; 2018. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICIRD.2018.8376300>
5. Suresh A., Diwakar G., Naidu B. A. Reliability design and maintenance formulation for dumpers used in mining industries. *CVR Journal of Science and Technology*. 2020;19(1):144–150. <https://doi.org/10.32377/cvrjst.1924>
6. Elodie R., Christophe B., Keomany B., Hoceane T., Romain L. Joint dynamic scheduling of missions and maintenance for a commercial heavy vehicle: value of on-line information. *IFAC PapersOnLine*. 2018;51(24):837–842. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.672>
7. Козин Е. С., Захаров Н. С., Панфилов А. А., Вохмин Д. М. *Системы поддержки принятия решений на транспорте*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2023. 170 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/bzsjil>.

8. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn, W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*. 2018;51(11):1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
9. Борисенко А. Н., Олейников А. В., Семенов М. Н. К вопросу о совершенствовании регламентов технического обслуживания и планово-предупредительных ремонтов карьерных автосамосвалов в ООО «СУЭК-Хакасия». *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021;(6):104–119. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_6_0_104
10. Килин А. Б., Азев В. А., Шаповаленко Г. Н., Сухарьков И. Н., Вакулин Е. А., Султанова Н. В., Хажиев В. А. Развитие ремонтного обслуживания и эксплуатации автосамосвалов БелАЗ на разрезе «Черногорский». *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2016;(534):129–137. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35281161>.
11. Олейников А. В., Васильев В. А., Суетова А. А. *Основы теории надежности*. Абакан: Сибирский федеральный университет, Хакасский технический университет – филиал Сибирского федерального университета; 2014. 144 с.
12. Борисенко А. Н. Применение информационных технологий при планировании технического обслуживания автомобилей. *Автотранспортное предприятие*. 2005;(5):27–28.
13. Максимов В. А., Нгуен В. Т., Чан Д. К. З. Анализ факторов, влияющих на расход топлива, с учетом современных условий эксплуатации городских автобусов. В сб.: *Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта, Москва, 31 января – 02 февраля 2023 года*. Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет; 2023. С. 21–30. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50250081>.
14. Захаров Н. С., Абакумов Г. В., Вознесенский А. В. *Влияние сезонных условий на расходование ресурсов при эксплуатации автомобилей*. Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет; 2011. 115 с.
15. Гусельников А. С., Захаров Н. С. Влияние сезонных условий на параметр потока отказов элементов системы питания двигателей автомобилей КАМАЗ-43118. *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2023;(2):111–120. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-2-111>
16. Яковенко В. В., Захаров Н. С. Природно-климатические факторы, влияющие на надежность автомобилей. В сб.: *Транспортные и транспортно-технологические системы, Тюмень, 15 апреля 2021 года*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2021. С. 325–328.
17. Тюлин А. Е., Асанова Е. А., Ревяков Г. А. Научно-методические подходы к решению задачи формирования модели цифрового двойника предприятия. *Экономические стратегии*. 2024;26(2):54–63. <https://doi.org/10.33917/es-2.194.2024.54-63>

References

1. Kvaginidze V. S., Koretskaya N. A. Efficiency of the system of technical services and repairs of heavy-duty quarry dump trucks operated in the conditions of the North. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2011;(55):198–217. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17231246>.
2. Kuzin E. G., Pudov E. Yu., Dubinkin D. M. Analysis of failures of mining dump truck assemblies under operating conditions. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2021;(2):55–61. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2021-2-55-61>
3. Alla H. R., Hall R., Apel D. B., Performance evaluation of near real-time condition monitoring in haul trucks. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;30(6):909–915. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.05.024>
4. Kalra V. M., Thakur T., Pabla B. S. Condition based maintenance management system for improvement in key performance indicators of mining haul trucks—a case study. In: *IEEE International Conference on Innovative Research and Development*. Bangkok: IEEE; 2018. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICIRD.2018.8376300>
5. Suresh A., Diwakar G., Naidu B. A. Reliability design and maintenance formulation for dumpers used in mining industries. *CVR Journal of Science and Technology*. 2020;19(1):144–150. <https://doi.org/10.32377/cvrjst.1924>
6. Elodie R., Christophe B., Keomany B., Hoceane T., Romain L. Joint dynamic scheduling of missions and maintenance for a commercial heavy vehicle: value of on-line information. *IFAC PapersOnLine*. 2018;51(24):837–842. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.672>
7. Kozin Ye. S., Zakharov N. S., Panfilov A. A., Vokhmin D. M. *Decision support systems for transportation*. Тюмень: Industrial University of Tyumen; 2023. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/bzsjil>.
8. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn, W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*. 2018;51(11):1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
9. Borisenko A. N., Oleinikov A. V., Semenov M. N. Improving maintenance and preventive overhaul programs for open pit dump trucks at SUEK-Khakassia. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2021;(6):104–119. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_6_0_104

10. Kilin A. B., Azev V. A., Shapovalenko G. N., Sukharkov I. N., Vakulin E. A., Sultanova N. V., Khazhiev V. A. Development of repair maintenance and operation service for BelAZ dump trucks at Chernogorsk open pit mine. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2016;(534):129–137. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35281161>.
11. Oleynikov A. V., Vasil'yev V. A., Suyetova A. A. *Fundamentals of reliability theory*. Abakan: Siberian Federal University, Khakas Technical Institute – Branch of the Siberian Federal University; 2014. (In Russ.)
12. Borisenko A. N. Application of information technologies in vehicle maintenance planning. *Avtotransportnoye predpriyatiye*. 2005;(5):27–28. (In Russ.)
13. Maksimov V. A., Nguyen V. T., Chan D. K. Z. Analysis of factors affecting fuel consumption, taking into account the current operating conditions of urban buses. In: *Aktual'nyye voprosy tekhnicheskoy ekspluatatsii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobil'nogo transporta = Actual issues of technical operation and maintenance of rolling stock of road transport, Moscow, January 31 – February 02, 2023*. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University; 2023. P. 21–30. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50250081>.
14. Zakharov N. S., Abakumov G. V., Voznesenskiy A. V. *Influence of seasonal conditions on resource consumption in vehicle operation*. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University; 2011. (In Russ.)
15. Guselnikov A. S., Zakharov N. S. Influence of seasonal conditions on the failure rate parameter of elements of the KAMAZ-43118 engine power supply system. *Intellect. Innovations. Investments*. 2023;2:111–120. (In Russ.) <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-2-111>
16. Yakovenko V. V., Zakharov N. S. Natural and climate factors affecting the reliability of cars. In: *Transportnyye i transportno-tekhnologicheskkiye sistemy = Transport and transport-technological systems, Tyumen, April 15, 2021*. Tyumen: Industrial University of Tyumen; 2021. P. 325–328. (In Russ.)
17. Asanova E., Tulin A., Revyakov G. Scientific and methodological approaches to the problem of creating a model of an enterprise's digital twin. *Ekonomicheskkiye strategii = Economic strategies*. 2024;26(2):54–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.33917/es-2.194.2024.54-63>



Информация об авторе

Борисенко Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики, машиностроения и автомобильного транспорта, Хакасский технический институт – филиал Сибирского федерального университета, Абакан, Российская Федерация, aiah@mail.ru

Information about the author

Alexander N. Borisenko, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Electric Power Engineering, Mechanical Engineering and Automobile Transportation, Khakas Technical Institute – Branch of the Siberian Federal University, Abakan, Russian Federation, aiah@mail.ru

Получена 22 октября 2024 г., одобрена 16 ноября 2024 г., принята к публикации 03 декабря 2024 г.

Received 22 October 2024, Approved 16 November 2024, Accepted for publication 03 December 2024