

Научная статья
УДК 622.6
DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-1-21-30

Оценка эксплуатационной надёжности горных транспортно-технологических машин на этапе анализа статистических данных об отказах

Сергей Петрович Озорнин

Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия
s.ozornin2013.s@ya.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию
26.02.2022

Одобрена после
рецензирования
02.02.2023

Принята к публикации
06.03.2023

Ключевые слова:

*средства механизации,
горные работы, единый
технологический процесс,
условия эксплуатации,
коэффициент суммарного
сопротивления движению,
карта надёжности,
синергетическая
парадигма эксплуатации,
технологический процесс,
технического сервиса*

Актуальность исследований объясняется необходимостью повышения эффективности и конкурентоспособности горных транспортно-технологических машин (ГТТМ) на основе оптимизации процессов их применения, как при геологических поисках и разведке твёрдых полезных ископаемых, так и при производстве горных работ. *Цель исследования* – повышение эффективности производственной и технической эксплуатации ГТТМ и конкурентоспособности выполняемых ими механизированных работ путём оптимизации процессов. *Объект исследования* – процессы эксплуатации ГТТМ, обеспечивающие поддержание технического состояния и восстановления работоспособности в случае её потери. *Предмет исследования* – закономерности изменения технического состояния ГТТМ при вариации нагрузочного воздействия на их элементы, узлы и агрегаты. Оценивается ситуация, связанная с анализом статистических данных об отказах ГТТМ и их влиянием на процессы и расходы, сопряжённые с применением современных ГТТМ по их назначению и с их техническим сервисом. Определено повышение эффективности технической эксплуатации ГТТМ и конкурентоспособности выполняемых ими механизированных работ путём оптимизации. Определено влияние величины уровня нагрузочного воздействия на изменение технического состояния ГТТМ в течение времени эксплуатации. При реализации технологического процесса технического сервиса ГТТМ необходимо учитывать сложность, напряжённость и жёсткость условий их эксплуатации, которая связана с влиянием внешних факторов. Учёт этих факторов может быть выражен накопленным уровнем нагрузочного воздействия. Представлен алгоритм оценки условий эксплуатации ГТТМ и расчётов показателей их надёжности.

Original article

Assessment of Operational Reliability of Mining Transport and Technological Machines at the Stage of Analysis of Statistical Data in Failures

Sergei P. Ozornin

Transbaikal State University, Chita, Russia
s.ozornin2013.s@ya.ru

Information about the article

Received February 26, 2022

Approved after reviewing
March 2, 2023

Accepted for publication
March 6, 2023

Keywords:

*means of mechanization,
mining operations, unified
technological process,
operating conditions,
coefficient of total resistance
to movement, reliability
map, synergetic paradigm
of operation, technological
process, technical service*

The relevance of the research is explained by the need to increase the efficiency and competitiveness of mining transport and technological machines (MTTM) on the basis of optimization of the processes of their application both in geological prospecting and exploration of solid minerals, and in the production of mining operations. The purpose of the study is to increase the efficiency of production and technical operation of MTTM and the competitiveness of the mechanized work performed by them by optimizing processes. The object of the study is the processes of operation of the MTTM, which ensure the maintenance of the technical condition and the restoration of operability in the event of its loss. The subject of the study is the regularities of changes in the technical condition of MTTM with variations in the load effect on their elements, components and assemblies. The situation related to the analysis of statistical data on MTTM failures and their impact on the processes and costs associated with the use of modern MTTMs for their intended purpose and with their technical services is evaluated. Taking into account these factors can be expressed by the accumulated level of load exposure. An algorithm for assessing the operating conditions of MTTM and calculating the indicators of their reliability is presented.

Введение. Получение высоких технико-экономических результатов работы горно-рудных предприятий зависит от эффективности экономических приёмов и методов эксплуатации горных транспортно-технологических машин (ГТТМ). Эффективность системы эксплуатации ГТТМ определяется на основе анализа процессов в сложной организационно-технологической системе, реализующей жизненный цикл машин. Для описания структуры сложной организационно-технологической системы эксплуатации ГТТМ и взаимовлияния входящих в неё подсистем используется синергетический подход [8; 12].

Актуальность. Анализ статистических данных о причинах отказов ГТТМ выявил большую степень их влияния на эффективность технологических процессов горных работ и завышенные эксплуатационные расходы, включая технический сервис. В связи с этим актуальной научной задачей является повышение эффективности и конкурентоспособности ГТТМ на основе оптимизации их применения как при геологических поисках и разведке твёрдых полезных ископаемых, так и при производстве горных работ.

Цель исследования – повышение эффективности производственной и технической эксплуатации ГТТМ и конкурентоспособности выполняемых ими механизированных работ путём оптимизации процессов.

Объект исследования – процессы эксплуатации ГТТМ, обеспечивающие поддержание их технического состояния и восстановления работоспособности в случае её потери.

Предмет исследования – закономерности изменения технического состояния ГТТМ при вариации нагрузочного воздействия на их элементы, узлы и агрегаты.

Методы исследования. Математическое описание объекта (взаимосвязи параметров объекта, характеризующие его особенности функционирования); математическое моделирование (совокупность принятых приёмов и техник построения и изучения математических моделей) [3]; построение технологических карт надёжности, в том числе трёхмерных технологических карт надёжности ГТТМ.

Разработанность темы. При реализации технологического процесса технического сервиса горных транспортно-технологических машин необходимо учитывать сложность, напряжённость и жёсткость условий их эксплуатации, которая связана с влиянием

внешних воздействий, оцениваемых параметрами: температура окружающей среды t ($^{\circ}\text{C}$); плотность разрабатываемой горной массы h ; коэффициент использования грузоподъёмности ГТТМ γ_c . Необходимо также учитывать коэффициент суммарного сопротивления движению Ψ и среднюю скорость движения в заданных условиях эксплуатации¹ V_{cp} [2].

Сложность, напряжённость и жёсткость условий эксплуатации ГТТМ определяется величиной нагрузочного воздействия $W_i(t)$, значение которого в большей степени зависит от коэффициента суммарного сопротивления движению ГТТМ Ψ .

В работе [2] представлены разработанные уровни жёсткости условий эксплуатации для строительно-дорожных и подъёмно-транспортных машин, которые учитывают, преимущественно, нагрузочное воздействие на гидравлические системы, навесное оборудование и гусеничные системы. Автором для определения $W_i(t)$ используются вспомогательные коэффициенты $J_{техн}$ – индексы жёсткости.

Специфика эксплуатации ГТТМ несколько иная и в большей степени нагрузка узлов, агрегатов и рамы возникает за счёт действия массы горной породы в кузове и его колебаний в процессе движения по неровностям дороги.

Результаты исследования. Целесообразно учитывать коэффициент использования грузоподъёмности, который позволяет оценить нагрузку на элементы ГТТМ в процессе эксплуатации. Современные датчики контроля массы груза позволяют отслеживать изменения этого коэффициента, а вместе с мониторингом значений показателей расхода топлива Q и средней скорости V_{cp} появляется возможность отслеживать значения накопленной величины уровня нагрузочного воздействия² [1; 4; 5].

В связи с этим величина уровня нагрузочного воздействия $W_i(t)$ может быть определена по формуле

$$W_i(t) = \Psi_{\Sigma} \cdot L_{факт} \cdot \gamma_c, (H \cdot км), \quad (1)$$

¹ Озорнин С. П. Единый технологический процесс использования транспортно-технологических машин – новая синергетическая парадигма их эксплуатации // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 5. – С. 251–263. – DOI: 10.21285/1814-3520-2018-5-251-263; Озорнин С. П. Современная парадигма эксплуатации транспортно-технологических машин: монография. – Чита: ЗабГУ, 2017. – 195 с.

² Озорнин С. П. Современная парадигма эксплуатации транспортно-технологических машин: монография. – Чита: ЗабГУ, 2017. – 195 с.

где $L_{\text{факт}}$ – фактически пройденный ГТТМ путь, км; Ψ_{Σ} – суммарный коэффициент сопротивления движению

$$\Psi_{\Sigma} = k \frac{Q}{V_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где Q – средний расход топлива двигателем ГТТМ; $V_{\text{ср}}$ – средняя скорость движения ГТТМ; k – характерный для каждой ГТТМ коэффициент пропорциональности (в Н/л·ч), определяемый через контрольный расход топлива $Q_{\text{кр}}$, скорость V_Q при контрольном расходе топлива и коэффициент сопротивления движению по дороге с ровным твердым покрытием Ψ_A , равный 0,025 для колёсных и 0,04 для гусеничных машин.

Влияние величины уровня нагрузочного воздействия на изменение технического состояния ГТТМ, в течение времени t , предлагается оценивать с помощью накопленной величины уровня нагрузочного воздействия $\Sigma W_i(t)$

$$\Sigma W_i(t) = W_1(t) + W_2(t) + \dots + W_n(t), \quad (H \cdot км), \quad (3)$$

где $\Sigma W_i(t)$ представляет собой сумму всех нагрузочных воздействий за контролируемое время эксплуатации ГТТМ t .

В связи с вышеизложенным при сравнении показателя $\Sigma W_i(t)$ с характеристиками надёжности ГТТМ при дискретном диагностировании и на этапе сбора статистических данных об отказах появляется возможность аналитического решения задачи повышения эффективности и безопасности эксплуатации ГТТМ.

При традиционном построении технологических карт надёжности оценивается зависимость вероятности безотказной работы $P(L)$ от пробега ГТТМ L [4; 5; 7; 9; 11]. Главным недостатком базовой методики [11] является отсутствие какой-либо информации об условиях эксплуатации и специфики выполнения транспортных работ. При формировании значений $P(L)$ принимается во внимание начальное число находящихся под наблюдением элементов и число отказавших элементов n_i за фактический интервал пробега ΔL . То есть, на этапе сбора статистики формируются базы данных о значениях конкретного числа отказов за период наработки без учёта информации о том, при каких обстоятельствах эти отказы возникли. Отсутствие и дефицит учёта статистики о состоянии дорожного покрытия, температурных нагрузках, массе перевозимого груза в момент наступления отказа ГТТМ, а также

качестве выполнения работ технического обслуживания (ТО) не позволяет специалистам технического сервиса достоверно оценить причины и характер возникновения конкретных отказов.

В связи с этим предлагается на этапе сбора ретроспективных данных о фактических неисправностях ГТТМ уделять повышенное внимание не только количеству отказавших элементов, но и, прежде всего, обстоятельствам, при которых возникли отказы, т. е. собирать статистические данные по двум показателям – $n_i(t)$ и $W_n(t)$.

На рисунке 1 приведён разработанный алгоритм оценки условий эксплуатации ГТТМ и расчётов показателей их надёжности.

Зафиксированные численные значение уровня нагрузочного воздействия $W_n(t)$ в момент наступления отказов с учётом времени t , позволяют оценить накопленную величину уровня нагрузочного воздействия $\sum_{i=1}^n W_i(t)$ индивидуально для каждой единицы парка ГТТМ. Таким образом, показатель вероятности безотказной работы ГТТМ $P(L, W(t))$ оценивается более достоверно и учитывает специфику выполнения транспортных работ с применением ГТТМ.

Это позволяет индивидуально для каждой ГТТМ выявлять элементы, лимитирующие эксплуатационную надёжность в различных ситуациях. В таком случае вероятность безотказной работы ГТТМ будет определена следующим образом:

$$P[L, W(t)] = \frac{N_0 - \sum_{i=1}^k n_i[L, W(t)]}{N_0}. \quad (4)$$

Технологические карты надёжности предлагается строить по трем параметрам: вероятность безотказной работы $P[L, W(t)]$, L – пробег ГТТМ и уровень нагрузочного воздействия $W_n(t)$ в момент наступления отказов с учетом времени t . Пример трёхмерной карты надёжности представлен на рис. 2.

Повышение величины $\Sigma W_i(t)$ влечёт за собой уменьшение значения вероятности безотказной работы ГТТМ $P[L, W_i(t)]$, с течением контрольного времени t и с учётом пробега ГТТМ L . Это означает, что вероятность безотказной работы зависит в большей степени не от пробега, а от того при каких условиях ГТТМ эксплуатировалась в течение контрольного времени t . С увеличением пробега лимитировать надёжность будут те элементы, отказы которых связаны с износом и срок их службы напрямую зависит от характера изменения интенсивности отказов.

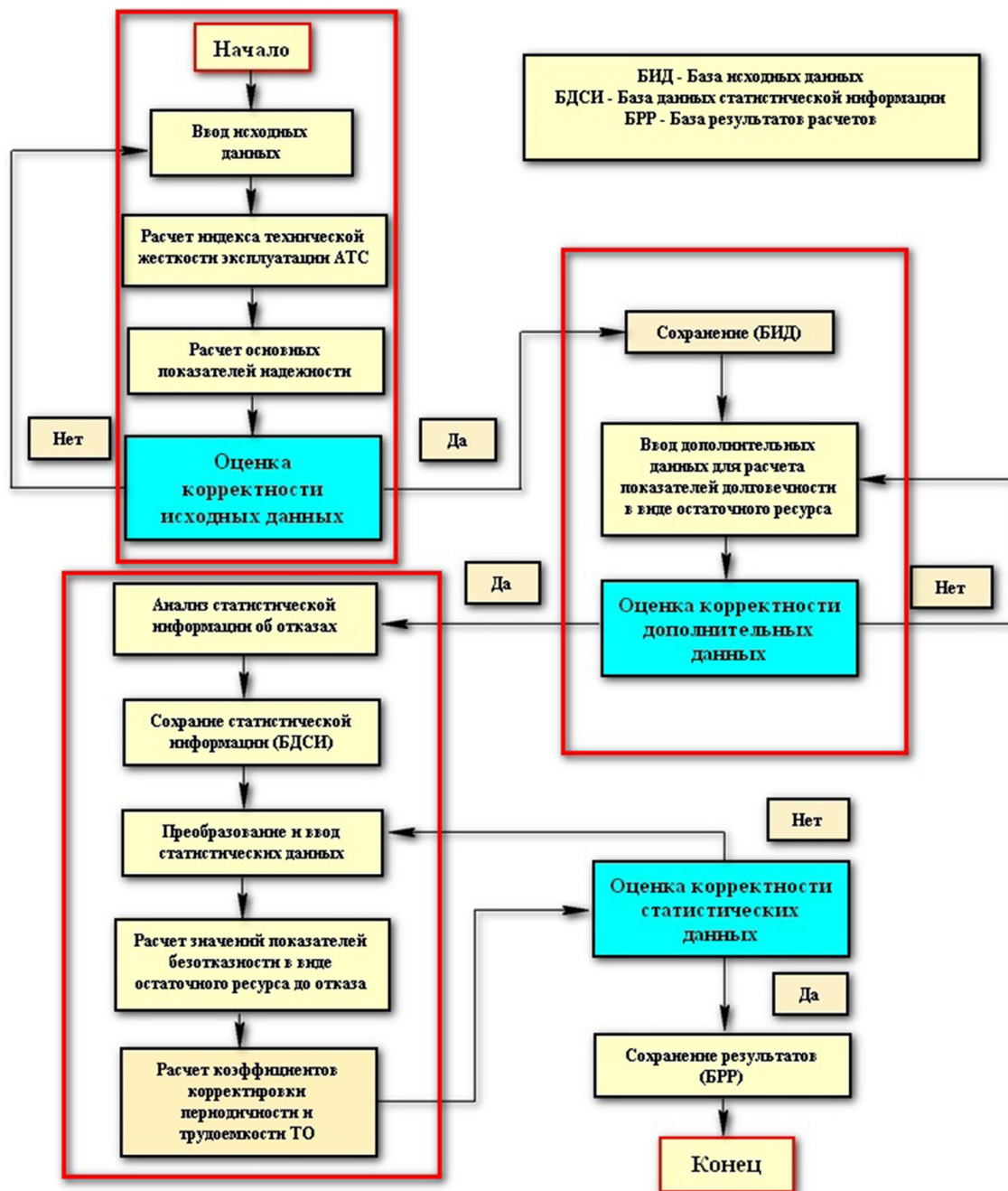


Рис. 1. Алгоритм оценки условий эксплуатации ГТТМ и расчётов показателей их надёжности / **Fig. 1.** Algorithm for assessing the operating conditions of MTTM and calculating the indicators of their reliability

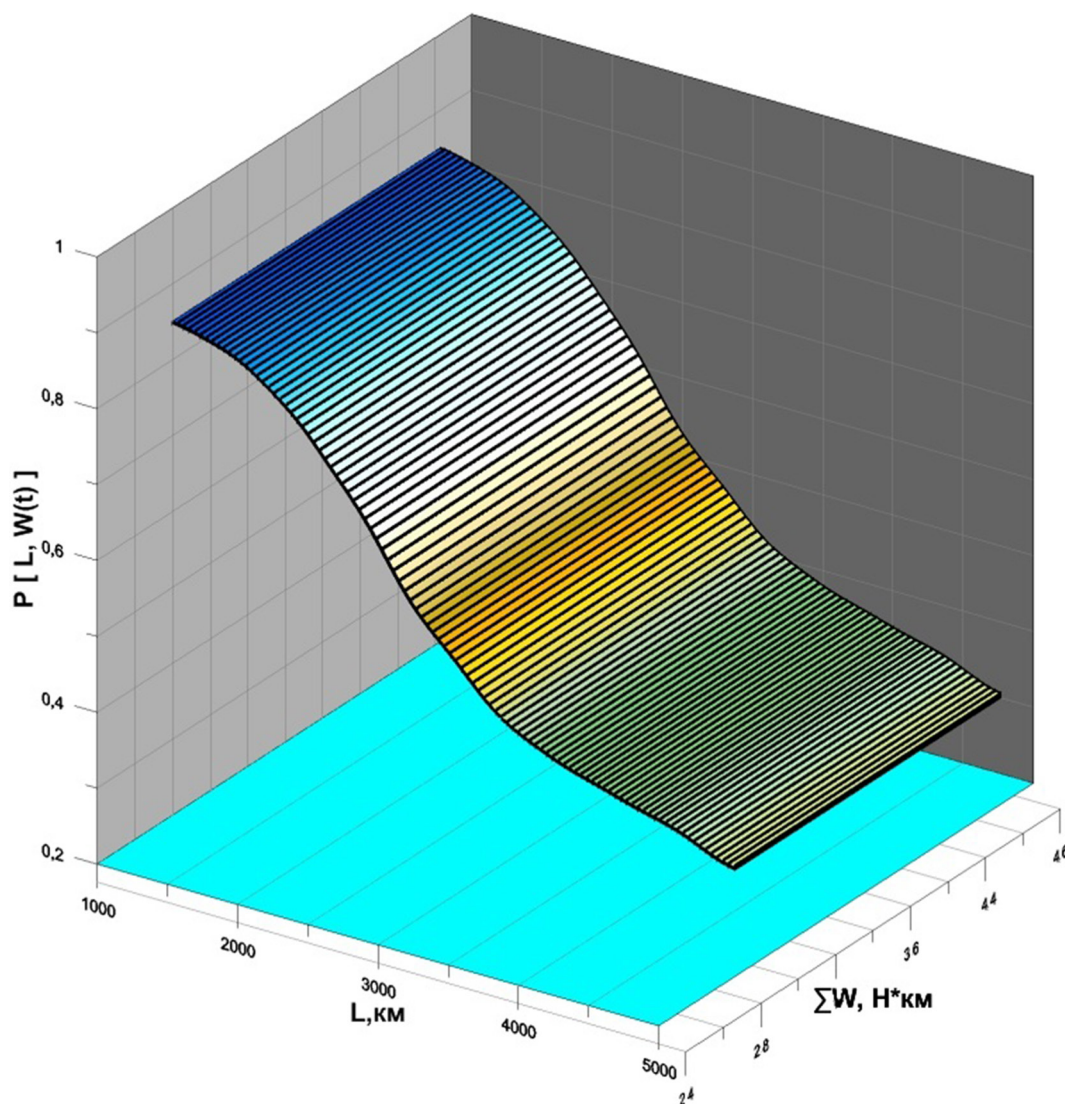


Рис. 2. Трёхмерная технологическая карта надёжности ГТТМ /
Fig. 2. Three-dimensional technological map of MTTM reliability

Геометрическая форма плоскости на трёхмерной диаграмме будет зависеть от характера отказов. Представленная на трёхмерной карте надёжности плоскость характеризует отказы, которые соответствуют нормальному закону распределения. Это отказы, связанные с износом: тормозные колодки, детали цилиндропоршневой группы и подшипники коленчатого вала ДВС, зубья шестерён, протектор шин колёс и т. д. Кроме того, отказы могут распределяться по экспоненциальному закону – это отказы, связанные с разрушением, например, листы рессор, и закону Вейбулла-Гнеденко – отказы, связанные с усталостью деталей и с последующим их разрушением.

Аналитическая оценка статистических данных об отказах позволяет прогнозировать и внезапные отказы, если известно критическое значение показателя $\Sigma W_i(t)$ для конкретного элемента ГТТМ.

По аналогии так же, как и для вероятности безотказной работы, строится зависимость для интенсивности отказов $\lambda[L, W_i(t)]$:

$$\lambda[L, W(t)] = \frac{\Delta n}{(N_0 - \sum_{i=1}^k n_i[L, W(t)])\Delta L}. \quad (5)$$

Графический пример такой зависимости представлен на рис. 3.

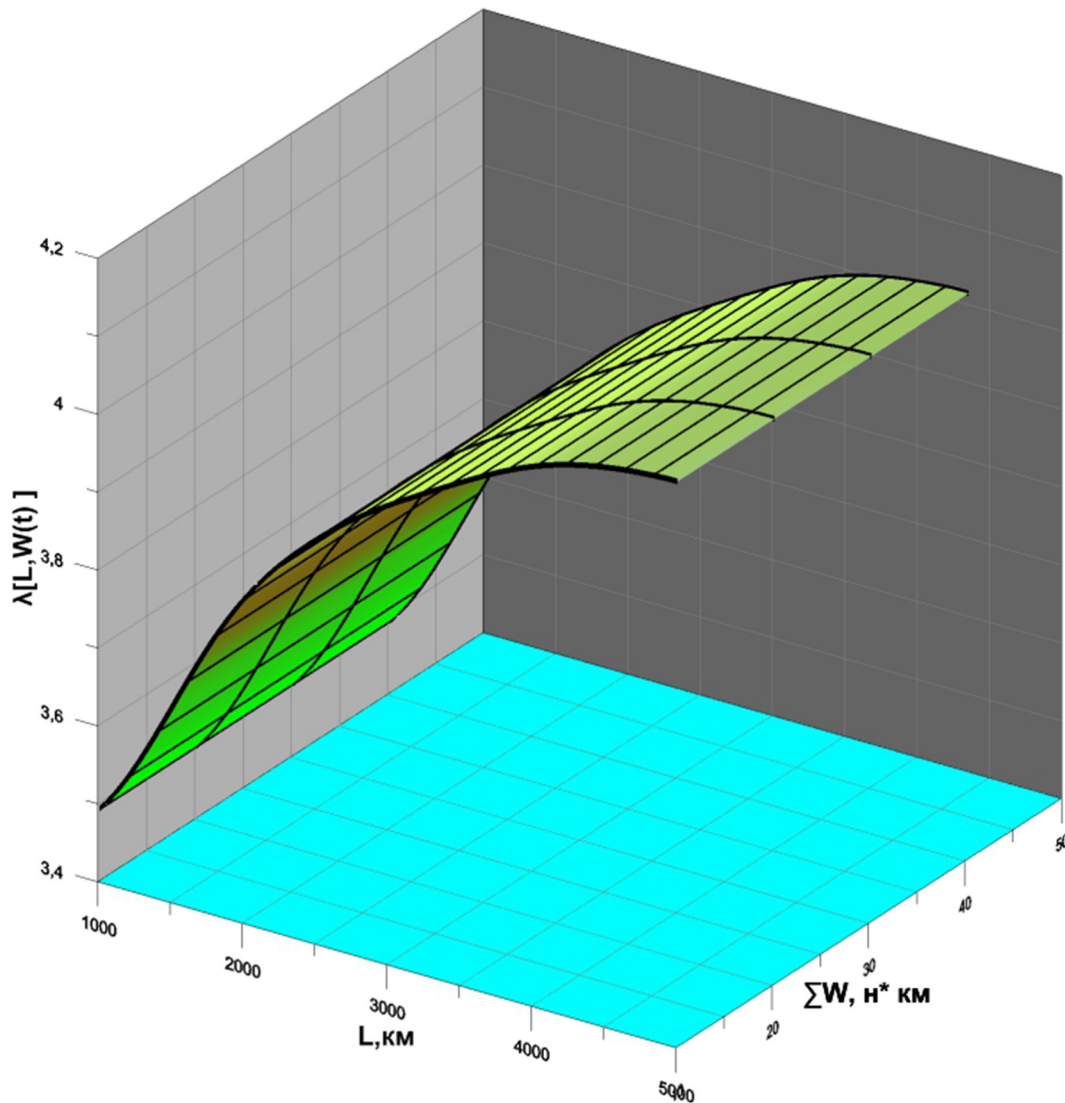


Рис. 3. Зависимость интенсивности отказов от накопленной величины уровня нагрузочного воздействия / **Fig. 3.** Dependence of the failure rate on the accumulated value of the level of load exposure

Именно при такой интерпретации интенсивности отказов ГТТМ λ можно объективно оценивать частоту возникновения отказов.

Обсуждение результатов исследований. Выполненными исследованиями определено, что на всех уровнях цель эксплуатации ГТТМ заключается в следующем: 1) усовершенствовать сервис по использованию как отдельных машин, так и их комплектов для выполнения соответствующих работ на горнорудных предприятиях с учётом их конкретных особенностей с целью извлечения приемлемого уровня дохода; 2) ужесточить контроль над режимами работы ГТТМ в процессе их функционирования с целью извлечения приемлемого уровня дохода; 3) с помощью технического сервиса технологически

поддерживать и восстанавливать работоспособность ГТТМ; 4) обеспечивать ГТТМ качественными эксплуатационными материалами; 5) систематизировать транспортирование (перемещение) машин к местам выполнения работ; 6) сберегать, хранить ГТТМ в периоды, когда они не используются по назначению.

Процессы эксплуатации ГТТМ и их технического сервиса предложено схематически представлять в виде замкнутого цикла¹ (рис. 4) [2].

¹ Озорнин С. П. Единый технологический процесс использования транспортно-технологических машин – новая синергетическая парадигма их эксплуатации // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 5. – С. 251–263. – DOI: 10.21285/1814-3520-2018-5-251-263.

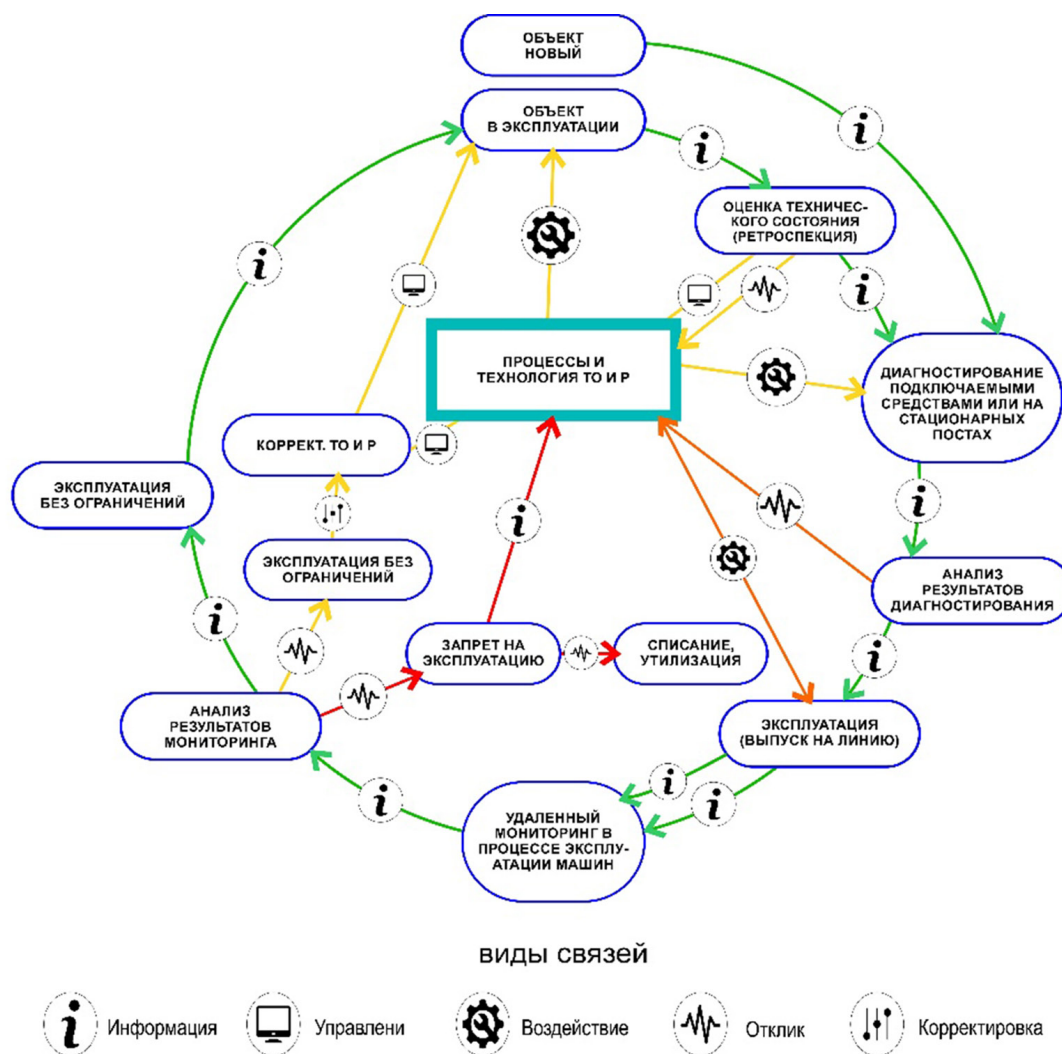


Рис. 4. Схема процессов эксплуатации ГТТМ с использованием диагностико-информационной подсистемы удаленного мониторинга / **Fig. 4.** Scheme of MTTM operation processes using the diagnostic and information subsystem of remote monitoring

Взаимодействие элементов представленной системы отражено соответствующими связями, в виде *информации, управления, воздействий, откликов и корректировок.*

Данная схема действительна как для новых машин, так и для машин, введённых в эксплуатацию ранее и позволяет оптимизировать планирование мероприятий технического обслуживания и ремонта ГТТМ с оптимизацией затрат, что приводит к повышению уровня эксплуатационной надёжности ГТТМ.

Зависимость накопленной величины уровня нагрузочного воздействия от обобщённого коэффициента суммарного сопротивления движению ГТТМ (условий эксплуатации) (рис. 5) получена после оценки среднеквадратического отклонения наработки до отказа ГТТМ по ГОСТ 8.207-76.

Значение показателя безотказности в виде остаточного ресурса определяется путём сравнения назначенной наработки до отказа и коэффициента суммарного сопротивления движению с фактическими значениями наработок и обобщёнными значениями коэффициента суммарного сопротивления движению. Для этого выполнена обработка статистической информации с оценкой доверительных границ и получена графическая интерпретация (рис. 6). Коэффициент корректировки периодичности ТО определяется путём сравнения нормативных и фактических значений выполненной наработки. Коэффициент корректировки трудозатрат на устранение отказа является обратной величиной коэффициента корректировки периодичности ТО.

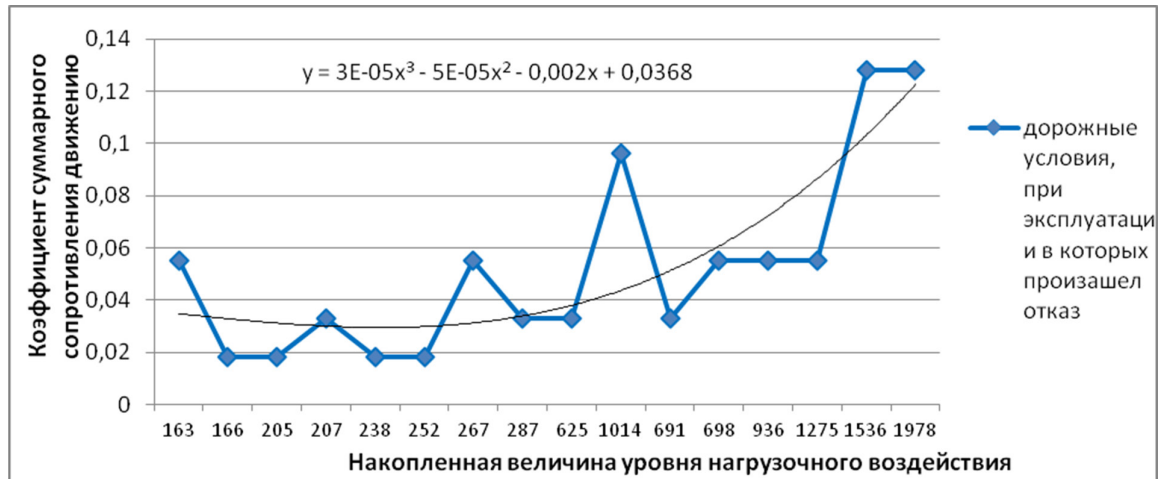


Рис. 5. Зависимость накопленной величины уровня нагрузочного воздействия от обобщенного коэффициента суммарного сопротивления движению машины (условий эксплуатации) /
Fig. 5. Dependence of the accumulated value of the load level impact on the generalized coefficient of total resistance to the movement of the machine (operating conditions)

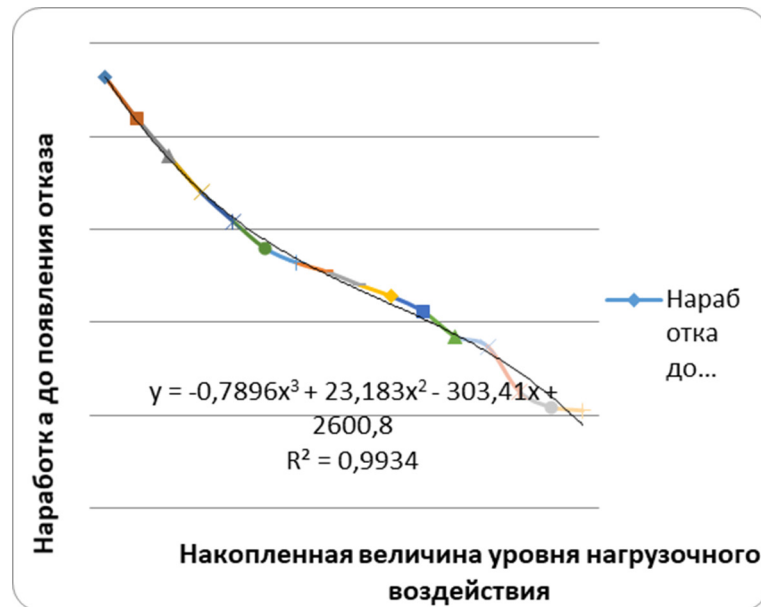


Рис. 6. Влияние накопленной величины уровня нагрузочного воздействия на значение наработки до появления отказа /
Fig. 6. Influence of the accumulated value of the load influence level on the value of the operating time before the failure

Выводы. Эксплуатация ГТТМ представляет собой единый технологический процесс эксплуатации (ЕТП ЭГТТМ), который включает технологические процессы использования машин по их назначению, технологические процессы управления, а также технологические процессы технической эксплуатации (процессы ТО и ремонта) машин. Все эти процессы в условиях рыночного механизма хозяйствования являются предпринимательскими, поэтому целью выполнения большинства из них является извлечение прибыли.

В связи с этим следует признать, что фактически формируется третья синергетическая парадигма [8; 12] эксплуатации горных транспортно-технологических машин.

При реализации технологического процесса технического сервиса горных транспортно-технологических машин необходимо учитывать сложность, напряжённость и жёсткость условий их эксплуатации, которая связана с влиянием внешних факторов. Учёт этих факторов может быть выражен накопленным уровнем нагрузочного воздействия.

Список литературы

1. Баженов Ю. В., Баженов М. Ю. Прогнозирование остаточного ресурса конструктивных элементов в условиях эксплуатации // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 4. С. 16–21.
2. Бердников И. Е. Разработка диагностико-информационной подсистемы технического сервиса для обеспечения эксплуатационной надежности транспортно-технологических машин: автореф. ... канд. техн. наук: 05.02.13. Братск, 2017. 26 с.
3. Веденяпин Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1973. 199 с.
4. Волков В. П., Матейчик В. П., Никонов О. Я., Комов П. Б., Грицук И. В., Волков Ю. В., Комов Е. А. Интеграция технической эксплуатации автомобилей в структуры и процессы интеллектуальных транспортных систем: монография. Донецк: Ноулидж, 2013. 400 с.
5. Говорущенко Н. Я. Системотехника автомобильного транспорта (расчетные методы исследований): монография. Харьков: ХНАДУ, 2011. 292 с.
6. ГОСТ 25866-83 Эксплуатация техники. Термины и определения = Exploitation of technique. Terms and definitions: дата введения 01.01.1985 / разработан Государственным комитетом СССР по стандартам. URL: https://docs.cntd.ru/document/120_0009513 (дата обращения: 21.02.2023). Текст: электронный.
7. Ждановский Н. С., Аллилуев В. А., Михлин В. М. Диагностика автотракторных двигателей с использованием электронных приборов. Л.: ЛСХИ, 1973. 127 с.
8. Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. Синергетика и прогнозы будущего. 2-е изд. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 288 с.
9. Комов А. Б., Комов П. Б., Грицук И. В. Повышение надёжности трансмиссии транспортного средства: монография. Донецк: ДонИЖТ, 2010. 144 с.
10. Кузнецов Е. С. Управление техническими системами: учеб. пособие. М.: МАДИ (ГТУ), 2003. 247 с.
11. Лукинский В. С., Зайцев Е. И. Прогнозирование показателей надежности агрегатов трансмиссии. Киев: Наукова думка, 1984. 325 с.
12. Хакен Г. Тайны природы. Синергетика: учение о взаимодействии / пер. с нем. А. Р. Логунова. М.; Ижевск: Ин-т комп. исследований, 2003. 320 с.
13. Якунин Н. И. Методологические основы контроля и управления техническим состоянием автомобилей в эксплуатации: монография. М.: Машиностроение, 2003. 178 с.

References

1. Bazhenov Yu. V., Bazhenov M. Yu. Forecasting the residual life of structural elements in operating conditions. *Fundamental research*, no. 4, pp. 16–21, 2015. (In Rus.)
2. Berdnikov I. E. Development of diagnostic and information subsystem of technical service to ensure operational reliability of transport and technological machines: abstract ... candidate of technical sciences: 05.02.13. Bratsk, 2017. (In Rus.)
3. Vedenyapin G. V. General methodology of experimental research and processing of experimental data. 3rd ed., reprint. and additional Moscow: Kolos, 1973. (In Rus.)
4. Volkov V. P., Mateychik V. P., Nikonov O. Ya., Komov P. B., Gritsuk I. V., Volkov Yu. V., Komov E. A. Integration of technical operation of cars into the structures and processes of intelligent transport systems: monograph. Donetsk: Knowledge, 2013. (In Rus.)
5. Govorushchenko N. Ya. System engineering of motor transport (computational research methods): monograph. Kharkiv: KHNADU, 2011. (In Rus.)
6. GOST 25866-83 Operation of equipment. Terms and definitions = Exploitation of technique. Terms and definitions: date of introduction 01.01.1985 / developed by the USSR State Committee on Standards. Web. 21.02.2023. https://docs.cntd.ru/document/120_0009513. (In Rus.)
7. Zhdanovsky N. S., Alliluyev V. A., Mikhlin V. M. Diagnostics of automotive engines using electronic devices. Leningrad: LSHI, 1973. (In Rus.)
8. Kapitsa S. P., Kurdyumov S. P., Malinetsky G. G. Synergetics and forecasts of the future. 2nd ed. Moscow: Editorial URSS, 2001. (In Rus.)
9. Komov A. B., Komov P. B., Gritsuk I. V. Improving the reliability of the vehicle transmission: monograph. Donetsk: Donizht, 2010. (In Rus.)
10. Kuznetsov, E. S. Management of technical systems: textbook. Manual. M.: MADI (GTU), 2003. (In Rus.)
11. Lukinsky V. S. Zaitsev E. I. Forecasting of reliability indicators of transmission units. Kiev: Naukova dumka, 1984. (In Rus.)
12. Khaken G. Secrets of nature. Synergetics: the doctrine of interaction / translated from German by A. R. Logunov. Moscow; Izhevsk: In-t comp. research, 2003. (In Rus.)

13. Yakunin N. I. Methodological foundations of control and management of the technical condition of cars in operation: monograph. M.: Mechanical Engineering, 2003. (In Rus.).

Информация об авторе

Ozornin Sergey Petrovich, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры транспортных и технологических систем, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; s.ozornin2013.s@ya.ru. Область научных интересов: процессы эксплуатации транспортно-технологических машин, обеспечения их эффективного и безопасного использования.

Information about the author

Ozornin Sergei P., doctor of technical sciences, professor, professor of the Transport and Technological Systems department, Transbaikal State University, Chita, Russia; s.ozornin2013.s@ya.ru. Research interests: processes of transport and technological machines' operation, ensuring their efficient and safe use.

Для цитирования

Озорнин С. П. Оценка эксплуатационной надёжности горных транспортно-технологических машин на этапе анализа статистических данных об отказах // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 1. С. 21–30. DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-21-30.

For citation

Ozornin S. P. Assessment of operational reliability of mining transport and technological machines at the stage of analysis of statistical data on failures // Transbaikal State University Journal. 2023. Vol. 29, no. 1. Pp. 21–30. DOI; 10.21209/2227-9245-2023-29-1-21-30.