




ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-34>

УДК 622.625.6

**Влияние условий эксплуатации шахтных монорельсовых локомотивов на долговечность полимерных ободьев приводных колес**Е. М. Арефьев¹  , К. А. Рябко²  ¹ Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация² Ростовский государственный университет путей сообщения (филиал в г. Воронеже), г. Воронеж, Российская Федерация
 elcross@mail.ru**Аннотация**

Увеличение темпов добычи угля и снижение ее себестоимости может быть обеспечено путем комплексной механизации и автоматизации системы шахтного вспомогательного транспорта за счет широкого внедрения подвесных монорельсовых дорог. Перспективность использования шахтных монорельсовых дорог обусловлена низким коэффициентом тары состава; снижением площади сечения выработок за счет вынесения вспомогательного транспорта в верхнюю часть выработок; высокой безопасностью эксплуатации; возможностью демонтажа дороги на неиспользуемых участках и последующего монтажа в новых выработках. Использование обрешеченных роликов в приводе шахтных монорельсовых локомотивов позволяет повысить коэффициент сцепления колеса с монорельсом, снизить динамические нагрузки и уровень шума в процессе эксплуатации. Целью исследований является оценка долговечности полимерных ободьев приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов с учетом условий их эксплуатации. Получено распределение напряжений по пятну контакта обода колеса с монорельсом, что позволит разработать мероприятия по повышению срока службы приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов. Установлено, что влияние деформации монорельсового пути не оказывает существенного влияния на долговечность ободьев приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов. Получена математическая модель для определения долговечности полимерных ободьев приводных колес с учетом максимальных динамических усилий, возникающих при контакте приводных колес с монорельсом. Проведена оценка долговечности полимерных ободьев колес шахтных монорельсовых локомотивов в соответствии с критерием Бейли с учетом максимальных значений динамических контактных нагрузок, возникающих при движении монорельсового состава. Установлено, что увеличение массы тележки с 20 до 47 кН приводит к снижению долговечности обода приводного колеса монорельсового локомотива на 32 % (с 8700 до 5900 ч).

Ключевые слова


шахтная монорельсовая дорога, монорельсовый локомотив, долговечность, срок службы, привод, полимерный обод, подвесной монорельс, ходовая тележка, динамические нагрузки

Для цитирования

Arefiev E. M., Ryabko K. A. Effect of operating conditions of mine monorail locomotives on the durability of drive wheel polymeric rims. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):59–67. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-34>

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Research paper

Effect of operating conditions of mine monorail locomotives on the durability of drive wheel polymeric rimsЕ. М. Арефьев¹  , К. А. Рябко²  ¹ Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, Russian Federation² Rostov State University of Railway Transport (Voronezh Branch), Voronezh, Russian Federation elcross@mail.ru**Abstract**

An increase in the rate of coal mining and a reduction of its prime cost can be ensured by comprehensive mechanization and automation of the system of mine auxiliary transport through the widespread introduction of overhead monorail tracks. The potential use of mine monorail tracks are conditioned by the following factors: low payload ratio of the train; reduction of the mine workings cross-section area due to transfer of



auxiliary transport to the upper part of the workings; high operational safety; as well as the possibility of dismantling the track in the unused sections and subsequently installing it in new mine workings. The use of rubberized rollers in the drives of mine monorail locomotives enables the coefficient of adhesion of the wheel with the monorail to be increased. It also reduces dynamic loads and the noise level during operation. The purpose of this research is to assess the durability of polymeric rims of drive wheels for mine monorail locomotives, taking into account their operating conditions. Stress distribution over the contact area of the wheel rim with the monorail was determined, enabling the development of measures to increase the service life of drive wheels of mine monorail locomotives to be developed. It was established that the effect of the monorail track deformation has no significant impact on the durability of drive wheel rims of mine monorail locomotives. A mathematical model was obtained to determine the durability of drive wheel polymeric rims, taking into account the maximum dynamic forces arising during the contact of drive wheels with the monorail. The durability of wheel polymeric rims of mine monorail locomotives was assessed in accordance with the Bailey criterion with regard to the maximum values of dynamic contact loads arising during the monorail train movement. It was also established that an increase in the carriage mass from 20 to 47 kN leads to 32 % less durability of a monorail locomotive drive wheel rim (from 8700 to 5900 hours).

Keywords

mine monorail track, monorail locomotive, durability, service life, drive, polymeric rim, overhead monorail, undercarriage, dynamic loads

For citation

Arefiev E.M., Ryabko K.A. Effect of operating conditions of mine monorail locomotives on the durability of drive wheel polymeric rims. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):59–67. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-34>

Введение

Одним из направлений увеличения добычи угля является повышение производительности труда. В связи с этим большое значение приобретает комплексная механизация и автоматизация системы шахтного вспомогательного транспорта за счет широкого внедрения подвесных монорельсовых дорог.

Перспективность использования шахтных монорельсовых дорог обусловлена рядом существенных достоинств этого вида транспорта: низкий коэффициент тары состава; вынесение вспомогательного транспорта в верхнюю часть выработок, что позволяет существенно снизить площадь их сечения, а значит и капитальные затраты на их сооружение; высокая безопасность эксплуатации как на больших, так и на малых скоростях; простота автоматизации; возможность демонтажа дороги на неиспользуемых участках и последующего монтажа в новых выработках.

Использование обрешеченных роликов в приводе шахтных монорельсовых локомотивов позволяет повысить коэффициент сцепления с монорельсом, снизить динамические нагрузки и уровень шума в процессе эксплуатации. Таким образом, вопрос влияния условий эксплуатации шахтных монорельсовых локомотивов на долговечность полимерных ободьев приводных колес является актуальным.

Обзор исследований и публикаций

Проектированию и модернизации приводов шахтных монорельсовых локомотивов посвящен ряд работ научно-исследовательских и проектных организаций. Методики расчета основных параметров и условий работы приводных колес шахтных подвесных монорельсовых локомотивов, рассматриваемые в научных публикациях, не в полной мере отражают влияние взаимодействия приводных колес с монорельсом на их долговечность. Синтез универсальных

методик по влиянию условий эксплуатации шахтных монорельсовых локомотивов на долговечность полимерных ободьев приводных колес представляет собой весьма сложную научную задачу. Выполненный анализ расчетно-теоретических основ, направленных на разработку приводов подвесных монорельсовых локомотивов, свидетельствует о необходимости оценки влияния их условий эксплуатации на долговечность полимерных ободьев приводных колес.

Результаты исследований процесса качения тяговых колес с целью повышения тягового усилия при движении по уклону представлены в работе [1]. Авторы обосновывают возможность повышения касательной силы тяги путем повышения коэффициента сцепления между колесами и монорельсом за счет изготовления тяговых колес из фрикционных материалов. Однако в данной работе не рассматриваются вопросы оценки долговечности полимерных ободьев приводных колес.

Конструкция привода шахтных локомотивов, обеспечивающая повышенные тяговые и тормозные характеристики за счет использования дополнительных обрешеченных катков, кинематически связанных с приводными колесами, предлагается в работе [2]. Использование фрикционных материалов для футеровки катков позволяет увеличить тяговое усилие и коэффициент сцепления до 0,35...0,45 и сократить тормозной путь. Приведенные исследования относятся к тягово-тормозным свойствам монорельсовых локомотивов, но не охватывают весьма актуальную задачу исследования влияния на долговечность повышения коэффициента сцепления дополнительных обрешеченных катков с монорельсом.

Результаты исследований процесса взаимодействия приводной тележки с монорельсом, проведенные с использованием оригинальной имитационной модели, представлены в работах [3, 4]. Произведена



оценка дополнительных деформаций монорельсового пути за счет инерционных составляющих, возникающих в процессе движения монорельсового состава, определены максимальные динамические нагрузки, возникающие в системе «тележка–рельс». Основные положения рассмотренной работы не отражают влияния динамических нагрузок на приводные колеса.

Вопросам моделирования нагрузок и обоснованию конструктивных параметров упругих эластичных элементов, обоснованию геометрических параметров резино-полимерных приводных барабанов ленточного конвейера, прогнозированию сложного разрушения резиновых материалов, а также влиянию повышенных скоростей движения монорельсовых локомотивов на динамические параметры системы локомотив–монорельс, посвящены достаточно значимые работы. А именно, в работе [5] выполнено моделирование нагрузок, возникающих в резинокордной упругой муфте. Получена эпюра эквивалентных напряжений эластичного элемента. Данные результаты справедливы для резинокордных элементов, работающих на сдвиг, что не учитывает характер нагружения приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов. В работе [6] описаны усилия, возникающие в резиновых футеровках приводных барабанов ленточного конвейера. Выполнена симуляция напряженно-деформированного состояния цифровых твердотельных моделей. В работе [7] приведена комплексная методика определения характеристик разрушения резины. Предложенная методика позволяет проводить количественную оценку прочности резин в зависимости от приложенных механических воздействий, но не в полной мере учитывает особенности нагружения ободьев приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов. В работах [8, 9] представлены результаты численного моделирования воздействий локомотива на подвесную монорельсовую дорогу, которые направлены на повышение безопасности движения шахтных монорельсовых локомотивов. Однако полученные модели не учитывают влияния динамических нагрузок на ходовую часть тяговых тележек.

Основные положения рассмотренных работ не определяют в полной мере влияния условий эксплуатации шахтных монорельсовых локомотивов на долговечность полимерных ободьев приводных колес, поэтому требуют дополнений и уточнений.

Работа колесного привода шахтного подвесного монорельсового локомотива характеризуется многими параметрами: образованием силы тяги, созданием необходимого коэффициента сцепления колеса с монорельсом, восприятием знакопеременных динамических воздействий от неровностей пути, влиянием тормозных усилий и состоянием поверхностей взаимодействия монорельса и приводных колес. Все эти параметры достаточно хорошо исследованы для наземных автомобильных и железнодорожных транспортных средств, но не отображают в полной мере обобщающей оценки влияния условий эксплуатации шахтных монорельсовых локомотивов на долговечность полимерных ободьев приводных колес.

Цель исследований

При движении приводных колес шахтного монорельсового локомотива полимерные ободья приводных колес испытывают периодические контактные напряжения, обусловленные контактом элементов обода с монорельсом. Определение долговечности обода в зависимости от условий эксплуатации позволит определить его экономически обоснованные параметры. Таким образом, оценка долговечности полимерных ободьев приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов представляет научный и практический интерес.

Методология исследований

Исследования по определению влияния условий эксплуатации шахтных монорельсовых локомотивов на долговечность полимерных ободьев приводных колес проводились с использованием методов дифференциального и интегрального исчисления, математического анализа и графической интерпретации.

Долговечность полимерных и резиновых ободьев приводных колес монорельсовых дорог при динамических контактных нагрузках может быть определена в соответствии с критерием Бейли [10]:

$$N \int_0^{\Theta} \frac{dt}{L(\sigma, T)} = 1, \quad (1)$$

где N – число импульсов до разрушения; $L = L(\sigma, T)$ – долговечность резинотехнических и полимерных изделий при статическом режиме нагружения; σ – закон изменения напряжения; T – абсолютная температура материала обода (температура рудничной атмосферы); $\Theta = l_k/V$ – длительность импульса (время контакта фрагмента обода с монорельсом); V – средняя скорость движения состава; здесь l_k – длина пятна контакта обода с монорельсом (рис. 1), определяется по формуле Герца [11]:

$$l_k = \sqrt{\frac{4F_d r_{np}}{\pi E_{np}}}, \quad (2)$$

где F_d – сила контактного взаимодействия колеса тележки монорельсового локомотива и монорельса; E_{np} – приведенный модуль упругости:

$$E_{np} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2},$$

где E_1, E_2 – модули упругости обода колеса и монорельса соответственно; r_{np} – приведенный радиус кривизны,

$$\frac{1}{r_{np}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2},$$

где r_1, r_2 – радиусы кривизны обода колеса и монорельса.

При движении тележки с постоянной скоростью V монорельсовый путь прогибается в вертикальной плоскости на величину z под действием массы тележки m . Этот прогиб обусловлен действиями как статической нагрузки, так и вертикальными силами инерции (рис. 2).

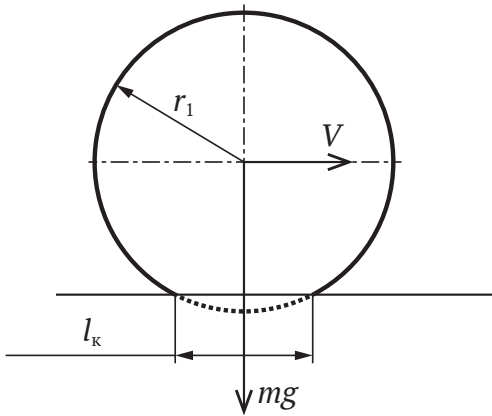


Рис. 1. К вопросу определения длины пятна контакта обода колеса с монорельсом

Масса тележки с грузом значительно больше массы секции монорельсового пути, поэтому массой монорельса можно пренебречь. Силу, с которой тележка действует на монорельс, можно представить зависимостью:

$$F_d = mg - m \frac{d^2z}{dt^2}.$$

С учетом того что координата $x = Vt$:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{dz}{dx} \frac{dx}{dt} = V \frac{dz}{dx}.$$

Отсюда

$$\frac{d^2z}{dt^2} = V^2 \frac{d^2z}{dx^2}. \quad (3)$$

С учетом уравнения (3) сила, с которой тележка действует на монорельс:

$$F_d = m \left(g - V^2 \frac{d^2z}{dx^2} \right). \quad (4)$$

Монорельс можно рассматривать как балку (см. рис. 2), работающую на изгиб, тогда прогиб балки можно описать уравнением:

$$z(x) = \frac{F_d}{E_2 J} \frac{x(L-x)^2}{3L},$$

где L – расстояние между подвесами монорельсового пути (длина секции); J – момент инерции поперечного сечения монорельса.

С учетом уравнения (4) получим:

$$z(x) = m \left(g - V^2 \frac{d^2z}{dx^2} \right) \frac{x^2(L-x)}{3LE_2J}. \quad (5)$$

Максимальная динамическая нагрузка при контакте колес с монорельсом будет возникать в середине пролета между подвесами монорельсового пути $L = x/2$, тогда с учетом формулы (5) получим:

$$F_{d_{\max}} = mg \left(1 - V^2 \frac{mL}{3EJ} \right). \quad (6)$$

Монорельс для современных шахтных монорельсовых дорог изготавливается из двутавра стального горячекатаного с высотой профиля 160 мм и следующими характеристиками: $E_2 = 20,6 \cdot 10^7$ кН/м² и $J = 8,72 \cdot 10^{-6}$ м⁴.

Согласно исследованиям [3, 12] максимальные динамические усилия, возникающие при контакте монорельса с приводным колесом, в зависимости от массы тележки изменяются от 20 до 47 кН, а максимальный продольный изгиб – от 7 до 15 мм (табл. 1).

Долговечность материала обода при статическом режиме нагружения [13–15]:

$$L(\sigma) = \tau_0 \ln \left(\frac{\Delta p_\infty}{\Delta p_\infty - \Delta p_{кр}} \right) \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \sigma}{k' T} \right), \quad (7)$$

где τ_0 – период колебаний атомов в молекулах; Δp_∞ – приращение накопления перенапряжений связей, обусловленных тепловыми флуктуациями; $\Delta p_{кр}$ – критическая концентрация накоплений перенапряжений связей; U_0 – энергия активации разрыва химических связей материала обода; k' – постоянная Больцмана; γ – структурно-чувствительный параметр [16, 17].

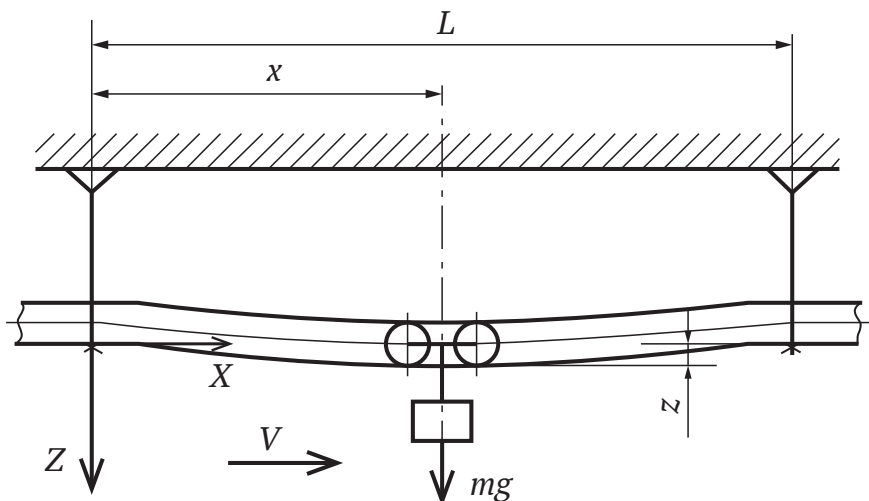


Рис. 2. Схема деформации подвешенного монорельсового пути под движущейся тележкой



Таблица 1

Максимальные динамические усилия, возникающие при контакте монорельса с приводным колесом, и значения максимального продольного изгиба монорельса в зависимости от массы тележки

Масса тележки m , т	Максимальные динамические усилия $F_{д\max}$, кН	Максимальный продольный изгиб монорельса z_{\max} , мм
2	20	6,3
2,5	25	7,5
4	42	13
4,5	47	15

Как правило, шахтная монорельсовая локомотивная откатка используется для транспортировки вспомогательных грузов в рамках одного выемочного горизонта, где температура рудничной атмосферы практически постоянна. С учетом этого влиянием изменения температуры на долговечность обода можно пренебречь.

Напряжение в контакте двух цилиндрических поверхностей можно определить по формуле Герца. С учетом максимальных динамических усилий, возникающих при контакте монорельса с приводным колесом, в резиновом или полимерном ободке возникает напряжение, среднее значение которого по пятну контакта:

$$\sigma_{cp} = \sqrt{\frac{E_{np} E_{д\max}}{\pi(1-\mu^2)r_{np}B}}, \quad (8)$$

где μ – коэффициент Пуассона материала обода; B – ширина колеса.

Изменение импульсов напряжения во времени хорошо описывается параболой вида:

$$\sigma(t) = A_1 t^2, \quad (9)$$

где A_1 – коэффициент, определяемый формой импульса напряжения.

Коэффициент A_1 можно определить с учетом среднего значения напряжения (8) и длительности цикла Θ контакта фрагмента обода колеса с монорельсом:

$$A_1 = \frac{3\sigma_{cp}}{\Theta^3}.$$

Предположим, что монорельс прогибается по дуге окружности. Тогда радиус дуги при нахождении тележки в середине пролета можно определить следующей зависимостью:

$$r_2 = \frac{L^2}{8z_{\max}} + \frac{z_{\max}}{2}.$$

При этом в местах подвески монорельса к секциям крепи (см. рис. 2) участки монорельса можно считать горизонтальными, $r_2 \rightarrow \infty$.

Результаты расчетов показывают, что количество циклов до разрушения при нахождении тележки в местах подвески монорельса ($r_2 \rightarrow \infty$) и в середине пролета

$$(r_2 = \frac{L^2}{8z_{\max}} + \frac{z_{\max}}{2})$$

отличается не более чем на 1 %. Данное заключение получено на основании расчетов, выполненных по уравнению (1), с учетом долговечности резинотехнических и полимерных изделий при статическом режиме нагружения L .

Это позволяет сделать вывод о том, что при расчетах на долговечность ободьев приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов влияние прогиба монорельса можно не учитывать.

С учетом уравнений (1), (7) и (9) можем определить долговечность обода T_o , ч:

$$T_o = \frac{1,74 \cdot 10^{-3}}{V \int_0^{\Theta} \frac{dt}{\tau_0 \ln\left(\frac{\Delta p_{\infty}}{\Delta p_{\infty} - \Delta p_{kp}}\right) \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \sigma(t)}{k'T}\right)}}. \quad (10)$$

По результатам моделирования рабочего процесса взаимодействия тележки с подвесным монорельсом [3, 18, 19] получен диапазон значений максимальных динамических усилий, возникающих при контакте монорельса с приводным колесом, который составил 20...47кН на тележку. При этом на одно колесо тележки, соответственно, приходится нагрузка $F_{д\max} = 10 \cdot 10^3 \dots 2,35 \cdot 10^5$ Н. Для этого диапазона контактных усилий обод может воспринять от $1,1 \cdot 10^7$ до $6,7 \cdot 10^6$ взаимодействий.

С использованием уравнения (10) получена графическая зависимость долговечности обода колеса от нагрузки (рис. 3), которая представляет собой гиперболическую зависимость для следующих условий: $F_{д\max} = 10 \dots 23$ кН; $T = 305,15$ К; $V = 3$ м/с; $r_1 = 0,08$ м; $B = 0,04$ м.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при увеличении массы тележки с 20 до 47 кН долговечность полимерных ободьев шахтных монорельсовых локомотивов снижается на 32 % (с 8700 до 5900 ч).

Формирование импульсов напряжения определяется сложным характером взаимодействия обода колеса с монорельсом, а также скоростью состава и текущим расстоянием от места подвески монорельса к секциям крепи до тележки [3, 20, 21], что усложняет получение аналитической зависимости, описывающей величину импульсов напряжения. В то же время форма импульсов достаточно хорошо описывается параболоидом вида:

$$\sigma(x', y') = A_2(x')^2 + B_2(y')^2,$$

где A_1, B_1 – коэффициенты, определяемые формой импульса напряжения. Коэффициент $B_1 = l_k$, учитывая соотношение длины и ширины пятна контакта обода с монорельсом, $A_2 = 1/2 B_2$; x', y' – относительные размеры пятна контакта обода колеса с монорельсом.

На основании расчетных зависимостей получено распределение напряжений по пятну контакта обода колеса с монорельсом, которое имеет вид эллиптического параболоида (рис. 4). Полученная графическая

интерпретация напряжений свидетельствует, что максимальные напряжения сконцентрированы в вершине параболоида.

Поскольку долговечность материала обратно пропорциональна напряжениям, то наибольшему износу будет подвержена поверхность обода вдоль линии, проходящей через середины его образующих.

Практическое применение

На основании представленных выше зависимостей получен алгоритм определения параметров приводных колес монорельсовых локомотивов (радиуса колеса и материала обода) для обеспечения требуемой долговечности $T_{тр}$ их ободьев (рис. 5).

В алгоритме учитываются параметры монорельсового пути и локомотива, что позволяет определить максимальные контактные динамические усилия в полимерном ободке приводных колес. С помощью приведенной методики можно определить параметры формы изменения импульса напряжения во времени, а также рассчитать долговечность обода с учетом параметров рудничной атмосферы и его материала.

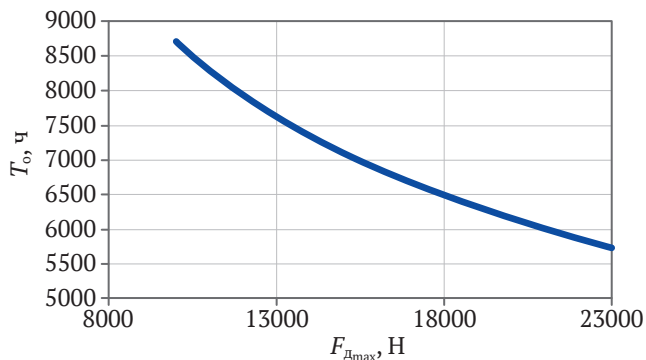


Рис. 3. Зависимость долговечности ободьев приводных колес монорельсового локомотива от силы, приходящейся на одно колесо

Полученные результаты могут быть использованы как в процессе разработки технических заданий и проектирования приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов, так и в исследованиях, направленных на совершенствование конструкции приводов подвижного состава подвесной монорельсовой дороги. Также приведенные алгоритм и методика расчета могут быть полезны инженерно-техническим работникам горных предприятий, занимающихся вопросами долговечности и повышения эксплуатационных характеристик ходовых частей шахтных монорельсовых локомотивов.

Выводы и направление дальнейших исследований

Получена математическая модель для определения долговечности полимерных ободьев приводных колес с учетом максимальных динамических усилий, возникающих при контакте приводных колес с монорельсом. Установлено, что влияние деформации монорельсового пути не оказывает существенного влияния на долговечность ободьев приводных колес шахтных монорельсовых локомотивов.

Разработан алгоритм определения параметров приводных колес монорельсовых локомотивов для обеспечения требуемой долговечности $T_{тр}$ их ободьев.

Произведен расчет долговечности полимерных ободьев колес шахтных монорельсовых локомотивов с учетом динамических нагрузок, возникающих при движении монорельсового состава. Получено распределение напряжений по пятну контакта обода колеса с монорельсом, что позволит разработать мероприятия по повышению срока службы колес шахтных монорельсовых локомотивов. Увеличение массы тележки с 20 до 47 кН приводит к снижению долговечности обода приводного колеса монорельсового локомотива на 32 % (с 8700 до 5900 ч). Дальнейшие исследования будут направлены на разработку комплексной модели для оценки долговечности привода шахтных монорельсовых локомотивов.

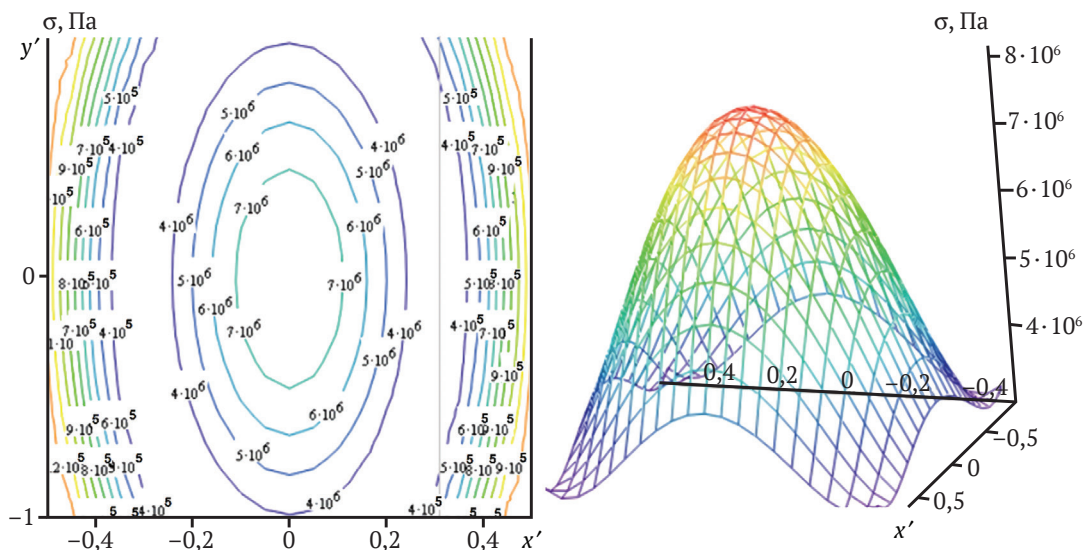


Рис. 4. Распределение напряжений по пятну контакта обода колеса с монорельсом: y' , x' – относительные размеры пятна контакта

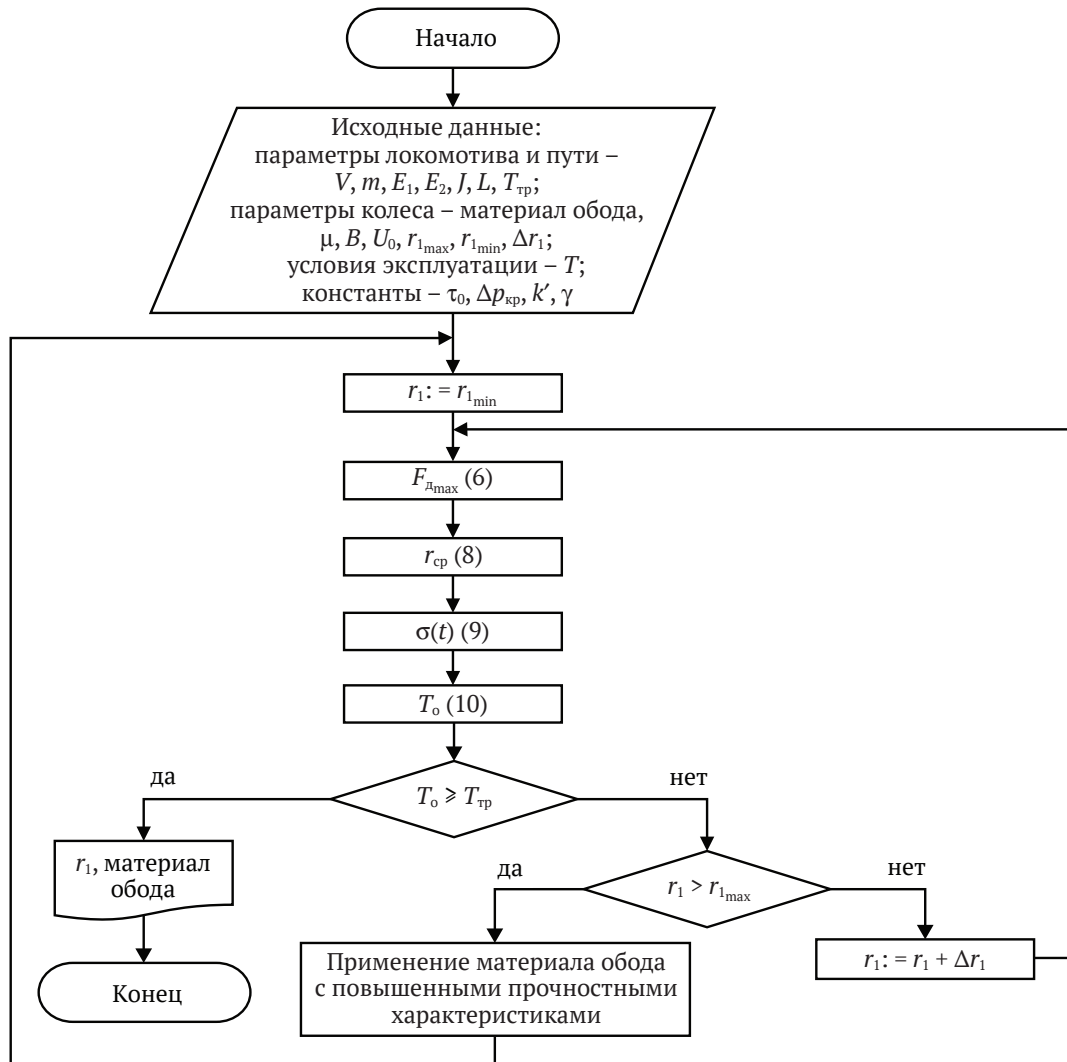


Рис. 5. Алгоритм определения параметров приводных колес монорельсовых локомотивов для обеспечения требуемой долговечности $T_{тр}$ их ободьев

Список литературы

1. Кольга А.Д., Аглиуллин А.С. Железнодорожный транспорт горных предприятий: пути повышения эффективности. *Горное оборудование и электромеханика*. 2016;(5):23–28.
2. Александров С.Н., Бережинский В.И., Будишевский В.А., Мельников С.А. Создание шахтных локомотивов для доставки грузов по путям с невыдержанным и завышенным профилем. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009;(16):215–229.
3. Гутаревич В.О. Динамическая нагруженность монорельсовых тележек и подвесного пути. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2015;(4):85–88. <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2015-4-85-88>
4. Гутаревич В.О., Кондрахин В.П. Снижение динамических нагрузок от действия подвесных монорельсовых дорог на крепь горных выработок. *Вестник Донецкого национального технического университета*. 2016;(6):7–11.
5. Мележик Р.С., Власенко Д.А. Моделирование нагрузки и обоснование конструктивных параметров упругой пальцевой муфты с эластичным элементом дискового типа. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):128–135. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-128-135>
6. Зиборова Е.Ю., Мнацаканян В.У. Обоснование геометрических параметров футеровочных пластин приводного барабана ленточного конвейера. *Горные науки и технологии*. 2022;7(2):170–179. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-170-179>
7. Stoček R., Stěnička M., Zádřapa P. Future trends in predicting the complex fracture behaviour of rubber materials. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2021;33(2):291–305. <https://doi.org/10.1007/s00161-020-00887-z>



8. Szewerda K., Tokarczyk J., Wiczorek A. Impact of increased travel speed of a transportation set on the dynamic parameters of a mine suspended monorail. *Energies*. 2021;14(6):1528. <https://doi.org/10.3390/en14061528>
9. Herbus K., Szewerda K., Swider J. Virtual prototyping of the suspended monorail in the aspect of increasing the permissible travel speed in hard coal mines. *Eksploatacja i Niezawodność*. 2020;4:610–619. <https://doi.org/10.17531/ein.2020.4.4>
10. Кондрахин В.П., Арефьев Е.М., Хиценко Н.В. Оценка влияния виброочистки на срок службы конвейерной ленты. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2012;(57):292–295.
11. Александров В.М., Чебаков М.И. *Введение в механику контактных взаимодействий*. Ростов-на-Дону: ООО «ЦВВР»; 2007. 114 с.
12. Рябко К.А., Гутаревич В.О. Обоснование технико-экономических показателей шахтных монорельсовых локомотивов. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):136–143. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-136-143>
13. Водолаская Н.В., Шевченко Д.А. Проблема повышения долговечности деталей машин, эксплуатируемых в агрессивных средах. В кн.: *Машиностроение Украины глазами ученых: прогрессивные идеи – наука – производство*. Сумы: СумГУ; 2010. С. 25–27.
14. Литвинова И.А., Веселов И.В., Гамлицкий Ю.А. Совершенствование рецептуры резины для массивных шин путем добавок нетрадиционных наполнителей. *Вестник ВГУИТ*. 2019;81(4):196–204. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-4-196-204>
15. Каблов В.Ф., Гамлицкий Ю.А., Тышкевич В.Н. *Механика армированных пластиков и резинокордных композитов*. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет; 2014. 348 с.
16. Kartsovnik V.I. Prediction of the creep of elastomers taking into account the forces of entropic elasticity of macromolecules (prediction of creep of elastomers). *Journal of Macromolecular Science, Part B*. 2018;57(6):447–464. <https://doi.org/10.1080/00222348.2018.1470836>
17. Luo R.K. Effective stress criterion for rubber multiaxial fatigue under both proportional and non-proportional loadings. *Engineering Failure Analysis*. 2021;121:105–172. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105172>
18. Swider J., Szewerda K., Herbus K., Jura J. Testing the impact of braking algorithm parameters on acceleration and braking distance for a suspended monorail with regard to acceptable travel speed in hard coal mines. *Energies*. 2021;14:7275. <https://doi.org/10.3390/en14217275>
19. Szewerda K., Krenicky T. Use of the MBS method in mining industry R&D projects. *Mining Machines*. 2022;40(2):110–120. <https://doi.org/10.32056/KOMAG2022.2.6>
20. Гутаревич В.О., Рябко К.А., Рябко Е.В. Гашение боковых колебаний подвижного состава шахтной подвесной монорельсовой дороги. В: *Сборник тезисов докладов VI международной научно-технической конференции «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства»*. Алчевск: ДГТУ; 2021. С. 172–174.
21. Szewerda K. Supporting development of suspended underground monorails using virtual prototyping techniques. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Innovative Mining Technologies (IMTech 2019 Scientific and Technical Conference)*. 25–27 March 2019, Szczyrk, Poland. 2019;545:012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/545/1/012018>

References

1. Kol'ga A.D., Agliullin A.S. Railway transport of mining enterprises: ways of efficiency improvement. *Gornoe Oborudovanie i Elektromehaniika*. 2016;(5):23–28. (In Russ.)
2. Aleksandrov S.N., Beregin'skiy V.I., Budishevskiy V.A., Melnikov S.A. Creation of mine locomotives for delivery of cargoes by the ways with the inconsistent and overrated profile. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009;(16):215–229. (In Russ.)
3. Gutarevych V.O. Dynamic loading of monorail bogies and suspended railway. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*. 2015;(4):85–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2015-4-85-88>
4. Gutarevych V.O., Kondrakhin V.P. Reduction of dynamic loads from suspended monorail tracks on mine working support. *Vestnik Donetsk National Technical University*. 2016;(6):7–11. (In Russ.)
5. Melezhik R.S., Vlasenko D.A. Load simulation and substantiation of design values of a pin flexible coupling with a flexible disk-type element. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):128–135. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-128-135>
6. Ziborova E.Yu., Mnatsakanyan V.U. Justification of geometrical parameters of lining plates for a belt conveyor drive drum. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(2):170–179. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-170-179>
7. Stoček R., Stěnička M., Zádrapa P. Future trends in predicting the complex fracture behaviour of rubber materials. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2021;33(2):291–305. <https://doi.org/10.1007/s00161-020-00887-z>



8. Szezerda K., Tokarczyk J., Wieczorek A. Impact of increased travel speed of a transportation set on the dynamic parameters of a mine suspended monorail. *Energies*. 2021;14(6):1528. <https://doi.org/10.3390/en14061528>
9. Herbus K., Szezerda K., Swider J. Virtual prototyping of the suspended monorail in the aspect of increasing the permissible travel speed in hard coal mines. *Eksploatacja i Niezawodność*. 2020;4:610–619. <https://doi.org/10.17531/ein.2020.4.4>
10. Kondrakhin V., Arefyev E., Khitsenko N. Assessment of impact made by vibration cleaning on the conveyor-belt service life. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2012;(57):292–295. (In Russ.)
11. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. *Introduction to the mechanics of contact interactions*. Rostov-on-Don: TsVVR LLC; 2007. 114 p. (In Russ.)
12. Ryabko K.A., Gutarevich V.O. Substantiation of performance indicators of mine monorail locomotives. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):136–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-136-143>
13. Vodolazskaya N.V., Shevchenko D.A. *The problem of increasing the durability of machine parts operating in aggressive environments. Mechanical engineering of Ukraine through the eyes of scientists: progressive ideas – science – production*. Sumy: SumGU; 2010. Pp. 25–27. (In Russ.)
14. Litvinova I.A., Veselov I.V., Gamlitskiy Y.A. Improvement of rubber recipe for massive tires by addition of non-traditional fillers. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2019;81(4):196–204. (In Russ.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-4-196-204>
15. Kablov V.F., Gamlitskiy Yu.A., Tyshkevich V.N. *Mechanics of reinforced plastics and rubber-cord composites*. Volgograd: Volgograd State Technical University; 2014. 348 p. (In Russ.)
16. Kartsovnik V.I. Prediction of the creep of elastomers taking into account the forces of entropic elasticity of macromolecules (prediction of creep of elastomers). *Journal of Macromolecular Science, Part B*. 2018;57(6):447–464. <https://doi.org/10.1080/00222348.2018.1470836>
17. Luo R.K. Effective stress criterion for rubber multiaxial fatigue under both proportional and non-proportional loadings. *Engineering Failure Analysis*. 2021;121:105–172. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105172>
18. Swider J., Szezerda K., Herbus K., Jura J. Testing the impact of braking algorithm parameters on acceleration and braking distance for a suspended monorail with regard to acceptable travel speed in hard coal mines. *Energies*. 2021;14:7275. <https://doi.org/10.3390/en14217275>
19. Szezerda K., Krenicky T. Use of the MBS method in mining industry R&D projects. *Mining Machines*. 2022;40(2):110–120. <https://doi.org/10.32056/KOMAG2022.2.6>
20. Gutarevich V.O., Ryabko K.A., Ryabko E.V. Damping of lateral oscillations of the rolling stock of a mine suspended monorail road. In: *Collection of abstracts of reports of the VI international scientific and technical conference “Ways to improve technological processes and equipment of industrial production”*. Alchevsk: DSTU; 2021. Pp. 172–174. (In Russ.)
21. Szezerda K. Supporting development of suspended underground monorails using virtual prototyping techniques. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Innovative Mining Technologies (IMTech 2019 Scientific and Technical Conference)*. 25–27 March, 2019. Szczyrk, Poland. 2019;545:012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/545/1/012018>

Информация об авторах

Евгений Михайлович Арефьев – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-5055-2370, Researcher ID B-2261-2016; e-mail elcross@mail.ru

Константин Александрович Рябко – кандидат технических наук, доцент, Ростовский государственный университет путей сообщения (филиал в г. Воронеж), г. Воронеж, Российская Федерация; ORCID 0000-0003-4391-506X, Scopus ID 57203884218; e-mail railroader@yandex.ru

Information about the authors

Evgeny M. Arefiev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID 0000-0001-5055-2370, Researcher ID B-2261-2016; e-mail elcross@mail.ru

Konstantin A.I. Ryabko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Rostov State University of Railway Transport (Voronezh Branch), Voronezh, Russian Federation; ORCID 0000-0003-4391-506X, Scopus ID 57203884218; e-mail railroader@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.11.2022
Поступила после рецензирования 10.02.2023
Принята к публикации 11.02.2023

Received 20.11.2022
Revised 10.02.2023
Accepted 11.02.2023