

Повышение эффективности работы конвейерного поезда: исследование влияния параметров приводной станции на силу сцепления

Д.Н. Невзоров✉, И.С. Труфанова

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ s225072@stud.spmi.ru

Резюме: Цель. Проанализировать влияние параметров приводной станции на силу сцепления между приводной шиной и продольной балкой тележки конвейерного поезда. Методы. Исследования проводились на специальном испытательном стенде, позволяющем определить силу трения в зависимости от разных нормальной нагрузки и давления в шине приводного колеса. Приведена матрица планирования перед проведением эксперимента, определены наиболее значимые параметры. Результаты. Выявлено, что значительными параметрами являются нормальная нагрузка, давление в шине и материал продольной балки тележки. Также выявлено, что при различном материале покрытия сила сцепления может расти или падать при увеличении давления в шине и увеличении нормальной нагрузки на приводное колесо. Заключение. В ходе экспериментальных исследований были получены эмпирические значения силы сцепления между приводным колесом и боковой поверхностью продольной балки тележки из различных материалов. Определены максимальные значения силы сцепления для определенных материалов при всем диапазоне давлений и нормальных нагрузок.

Ключевые слова: сила сцепления, конвейерный поезд, приводная станция, экспериментальный стенд

Для цитирования: Невзоров Д.Н., Труфанова И.С. Повышение эффективности работы конвейерного поезда: исследование влияния параметров приводной станции на силу сцепления. *Горная промышленность*. 2025;(1):184–191. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-184-191>

Improving the efficiency of the conveyor train: investigation of the impact of the drive station parameters on the traction force

D.N. Nevzorov✉, I.S. Trufanova

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ s225072@stud.spmi.ru

Abstract: Purpose. The purpose of this article is to analyze the impact of the drive station parameters on the traction force between the drive wheel tire and the longitudinal beam of the conveyor train trolley. Methods. The research was carried out using a dedicated test bench, which made it possible to determine the friction force depending on the different normal load and pressure in the tire of the drive wheel. The planning matrix before the experiment is provided, the most significant parameters are determined. Results. It was revealed that the significant parameters include the normal load, the tire pressure and the material of the longitudinal beam of the trolley. It was also revealed that with different coating materials, the traction force can increase or decrease with increasing of the tire pressure and the normal load on the drive wheel. Conclusion. In the course of experimental studies, empirical values were obtained of the traction force between the drive wheel and the side surface of the longitudinal beam of the trolley made of various materials. The maximum values of the traction force have been determined for certain materials over the entire range of pressures and normal loads.

Keywords: traction force, conveyor train, drive station, experimental stand

For citation: Nevzorov D.N., Trufanova I.S. Improving the efficiency of the conveyor train: investigation of the impact of the drive station parameters on the traction force. *Russian Mining Industry*. 2025;(1):184–191. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-184-191>

Введение

Горная промышленность является одной из ключевых отраслей экономики многих стран, обеспечивающая добычу полезных ископаемых, необходимых для производства различных товаров и материалов [1; 2]. Для эффективной работы горнодобывающих предприятий важно использовать передовые технологии и инновационные решения, в том числе в области транспорта, среди которых особое значение имеют конвейерные поезда [3].

Конвейерные поезда представляют собой транспортную систему, состоящую из специальных вагонеток, пространство между которыми перекрыто конвейерными лентами, перемещающимися по рельсовым путям для перевозки насыпных грузов [4]. Перемещение конвейерного поезда осуществляется путем фрикционного взаимодействия пневматической шины с продольной балкой тележки. Привод представляет собой вертикальный мотор-редуктор с пневматическим резиновым колесом, установленным на специальной раме [5; 6].

Альтернативными видами транспорта являются: рельсовый транспорт, самосвалы, погрузочно-доставочные машины (ПДМ) и конвейерный транспорт [7].

Конвейерные поезда в подземных горных работах имеют больше преимуществ по сравнению с другими видами транспорта. Рельсовый локомотивный транспорт имеет ограниченный угол наклона (до 5 промилле), цикличность транспортирования и высокое энергопотребление. Автосамосвалы также работают по циклической схеме и им присущи высокие капитальные и эксплуатационные затраты. ПДМ имеют ограниченную длину транспортирования, высокие капитальные затраты и повышенные требования к вентиляции [8]. Для ленточных конвейеров есть ограничения по физико-механическим характеристикам перемещаемого груза, а также области применения [9; 10].

Конвейерные поезда обладают достоинствами как непрерывного транспорта, так и циклического. Эффективность транспортирования, которая комплексно может быть оценена через время рейса, энергоёмкость, себестоимость транспортирования груза и показатели надёжности, может быть наивысшей при различных производительности и расстоянии транспортирования за счет изменения количества тележек. Количество тележек составляет от 20 до максимално возможного в зависимости от длины транспортирования [11; 12].

Проанализировав производственные мощности угольных шахт и рудников, можно сделать вывод о самом распространённом диапазоне производительности – от 2 до 7 млн т в год. Конвейерные поезда как система транспортирования наиболее эффективны на расстоянии более 5 км при годовом объёме перевозок 2–3 млн т и особенно в условиях сложного рельефа местности.

Вопрос повышения эффективности работы конвейерного поезда имеет особое значение. Для обеспечения оптимальной работы конвейерного поезда необходимо учитывать множество факторов, включающих параметры приводной станции, которые оказывают значительное влияние на силу сцепления и, следовательно, на эффективность работы всей системы [13; 14].

В данной научной статье рассматривается вопрос повышения эффективности работы конвейерного поезда путем исследования влияния параметров приводной станции на силу сцепления. В рамках исследования рассмотрены влияние силы прижатия, давления в шине и других факторов

на коэффициент сцепления с продольной балкой тележки конвейерного поезда [15; 16].

Для проведения исследования использованы методы математического моделирования, анализа данных и экспериментальные исследования на специально подготовленном стенде [17; 18]. Полученные результаты и выводы исследования имеют практическое значение для предприятий, занимающихся транспортировкой грузов с использованием конвейерных поездов [19; 20], а также для предприятий, рассматривающих конвейерные поезда в качестве альтернативных транспортных систем [21]. Они позволят оптимизировать работу конвейерных систем, увеличить производительность и снизить затраты на эксплуатацию.

Цель

Цель исследования заключается в изучении влияния параметров приводной станции на силу сцепления в конвейерном поезде с целью повышения эффективности его работы. В ходе исследования проанализированы существующие проблемы и предложены оптимальные решения для улучшения эксплуатационных показателей транспортной системы.

Материалы и методы

Уравнение движения конвейерного поезда. При создании уравнения движения анализируют взаимосвязь между движущими силами и силами, которые противодействуют перемещению объекта:

$$F_T - F_{\psi} - F_n - F_B - F_p = 0, \quad (1)$$

где F_T – сила тяги конвейерного поезда; F_{ψ} – сила сопротивления движению; F_n – сила сопротивления подъёму; F_B – сила аэродинамического сопротивления; F_p – сила сопротивления поступательному разгону.

Уравнение (1) называют *уравнением движения конвейерного поезда*.

Уравнение движения конвейерного поезда в развёрнутом виде принимает следующий вид:

$$\frac{k_c M_e^c u_{ред} \eta_{ред}}{r_d} - (G_n + Q) \omega - \sum_{i=1}^n G_{B,i} \sin \alpha_i - 0,5 c_w \rho_B A_B V_w^2 - m_{к.п} a_{к.п} = 0 \quad (2)$$

где k_c – коэффициент коррекции; M_e^c – эффективный стеновый крутящий момент; $u_{ред}$ – передаточное число редуктора; $\eta_{ред}$ – коэффициент полезного действия редуктора; γ_e – коэффициент, учитывающий ускорение вращения вала двигателя; M_e – тяговый момент двигателя; J_e – момент инерции вращающихся частей двигателя и связанных с ним деталей; ε_e – угловое ускорение вала двигателя; G_n – вес поезда, кН; Q – вес груза, кН; ω – основное удельное сопротивление движению; α_i – угол продольного уклона i -й вагонетки, град; n – количество вагонеток в составе; $G_{B,i}$ – вес i -й вагонетки; c_w – безразмерный коэффициент полной аэродинамической силы; ρ_B – плотность воздуха; A_B – поперечное сечение тела (площадь миделя); $m_{к.п}$ – масса конвейерного поезда; V_w – скорость воздуха; $a_{к.п}$ – ускорение поступательного движения конвейерного поезда.

Схема сил, моментов и реакций, приложенных к приводной пневматической шине и продольной балке тележки, представлена на рис. 1 [22; 23].

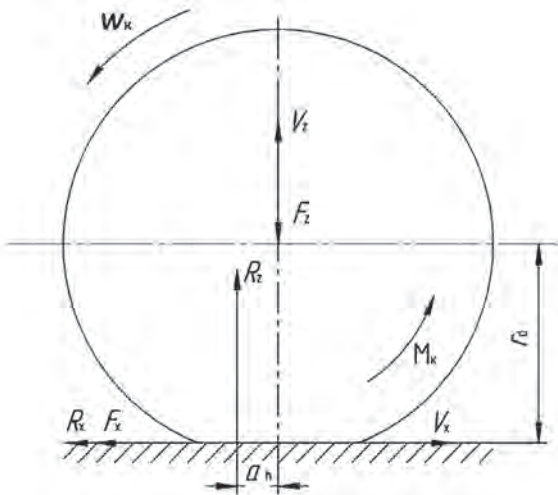


Рис. 1
Схема сил, моментов и реакций, действующих на приводном колесе

Fig. 1
A diagram of forces, moments and responses acting on the drive wheel

Сумма моментов относительно центра колеса $O \sum M = 0$; $J_k \varepsilon_k = M_k - R_x r_d - R_z a_h$, откуда:

$$R_x = \frac{M_k}{r_d} - f R_z + \frac{M_k}{r_k} - \frac{M_k}{r_d} = \frac{J_k \varepsilon_k}{r_d} = -f R_z - \frac{J_k \varepsilon_k}{r_d} \quad (3)$$

где R_x – продольная реакция; M_k – крутящий момент колеса; r_d – динамический радиус; f – коэффициент сопротивления качению колеса; R_z – нормальная реакция; r_k – радиус качения; J_k – момент инерции колеса; ε_k – угловое ускорение вращения.

Уравнение (3) называют *энергетическим балансом колеса*, f – *энергетическим коэффициентом сопротивления качению*, $\frac{M_k}{r_d} = F_{r,0}$ – полной окружной силой колеса.

Тяговая сила на приводной шине конвейерного поезда:

$$F_T = \frac{M_k}{r_d} = \frac{k_c M_e^c u_{ред} \eta_{ред}}{r_d} - \frac{(\gamma_e M_e J_e) \varepsilon_e u_{ред} \eta_{ред}}{r_d} \quad (4)$$

где k_c – коэффициент коррекции; γ_e – коэффициент, учитывающий ускорение вращения вала двигателя; M_e – тяговый момент двигателя; J_e – момент инерции вращающихся частей двигателя и связанных с ним деталей; ε_e – угловое ускорение вала двигателя.

При установившемся движении с постоянной скоростью $\omega_e = \text{const}$, $\varepsilon_e = \frac{d\omega}{dt} = 0$, сила тяги будет иметь вид:

$$F_T = \frac{k_c M_e^c u_{ред} \eta_{ред}}{r_d} \quad (5)$$

В некоторых ситуациях тяговое усилие на ведущих колёсах ограничивается силой сцепления с продольным брусом тележки. Создаётся уравнение силового равновесия приводных шин относительно силы сцепления с продольной балкой тележки. В уравнении (3) максимальная продольная реакция $R_{x, \text{max}}$ по сцеплению приводных шин с продольной балкой тележки:

$$R_{x, \text{max}} = \varphi_x \sum R_{z, \text{пс}} \quad (6)$$

где φ_x – коэффициент продольного сцепления ведущих колес с продольной балкой тележки; $\sum R_{z, \text{пс}}$ – суммарная нормальная реакция на обе приводные шины приводной станции.

Тяговая сила по сцеплению приводных шин:

$$F_{T, \varphi} = \frac{M_{T, \varphi}}{r_{\text{пс}}} = (\varphi_x + f_c) \sum R_{z, \text{пс}} + \frac{\sum J_{k, \text{пс}} \varepsilon_k}{r_{\text{пс}}} \quad (7)$$

При установившемся режиме движения $r_{\text{пс}}$ конвейерного поезда $V = \text{const}$, $\omega_k = \text{const}$, $\varepsilon_k = \frac{d\omega_k}{dt} = 0$:

$$F_{T, \varphi} = (\varphi_x + f_c) \sum R_{z, \text{пс}} \quad (8)$$

При установившемся движении с высоким коэффициентом сцепления и малым коэффициентом сопротивления качению $\varepsilon_k = 0$, $f_c \ll \varphi_x$, $f_c \approx 0$:

$$F_{T, \varphi} = \varphi_x \sum R_{z, \text{пс}} \quad (9)$$

Уравнение (9) показывает, что коэффициент сцепления между приводной шиной и продольной балкой тележки имеет прямое влияние на силу тяги. По данным исследования [23] известно, что при работе конвейерного поезда rail-veyor имеются проскальзывания в приводных станциях по причине недостаточной силы сцепления. Это говорит о том, что исследования трения в области приводной станции имеют особое значение.

Существует достаточно много устройств по измерению коэффициента сцепления приводных колес с твердой поверхностью [24; 25]. Данные устройства имеют ряд недостатков, таких как сложность конструкции, точность измерений, невозможность измерения коэффициента сцепления с металлической пластиной и отсутствие датчиков давления в приводном колесе для комплексного исследования [26; 27].

Более подходящим устройством по измерению коэффициента сцепления является патент [25], который позволяет комплексно исследовать область взаимодействия приводной шины с продольной балкой конвейерного поезда. Устройство измерения коэффициента сцепления резинового колеса с пластиной позволит сделать оптимальный выбор материала пластины с определенными адгезионными свойствами, давлением в приводном колесе и силой прижатия, что приведет к повышению силы тяги конвейерного поезда компании Rail-Vveyor.

Материалы для проведения эксперимента выбраны таким образом, чтобы они соответствовали требованиям к прочности, износостойкости и коэффициенту трения. Обычно для этого используются резина и металл. В настоящее время в качестве фрикционного материала продольной балки тележки используется полированное железо [28; 29].

В качестве исследуемой пластины предлагается использование 6 типов материалов, таких как полированное железо, рифленое железо, гладкая резина, рифленая резина, полированный и рифленый полиуретан, представленные на рис. 2.

На экспериментальном стенде применена резиновая шина Cordiant PROFESSIONAL TR-1 245/70R17,5. Для изменения давления в шине используется портативный компрессор Xiaomi Portable Electric Air Compressor 1S. При измерении силы проскальзывания используется электронный динамометр ДЭП6-1Д-1Р-1 [26].

Значение коэффициента сцепления приводной станции конвейерного поезда зависит от множества факторов. Зависимость этих факторов можно представить в виде следующей функции:

$$k' = f(N, d, b_{\text{ш}}, h, v, p, s, t) \quad (10)$$

где N – нагрузка на боковую пластину; d – диаметр приводного колеса; $b_{\text{ш}}$ – ширина приводного колеса; h – вели-

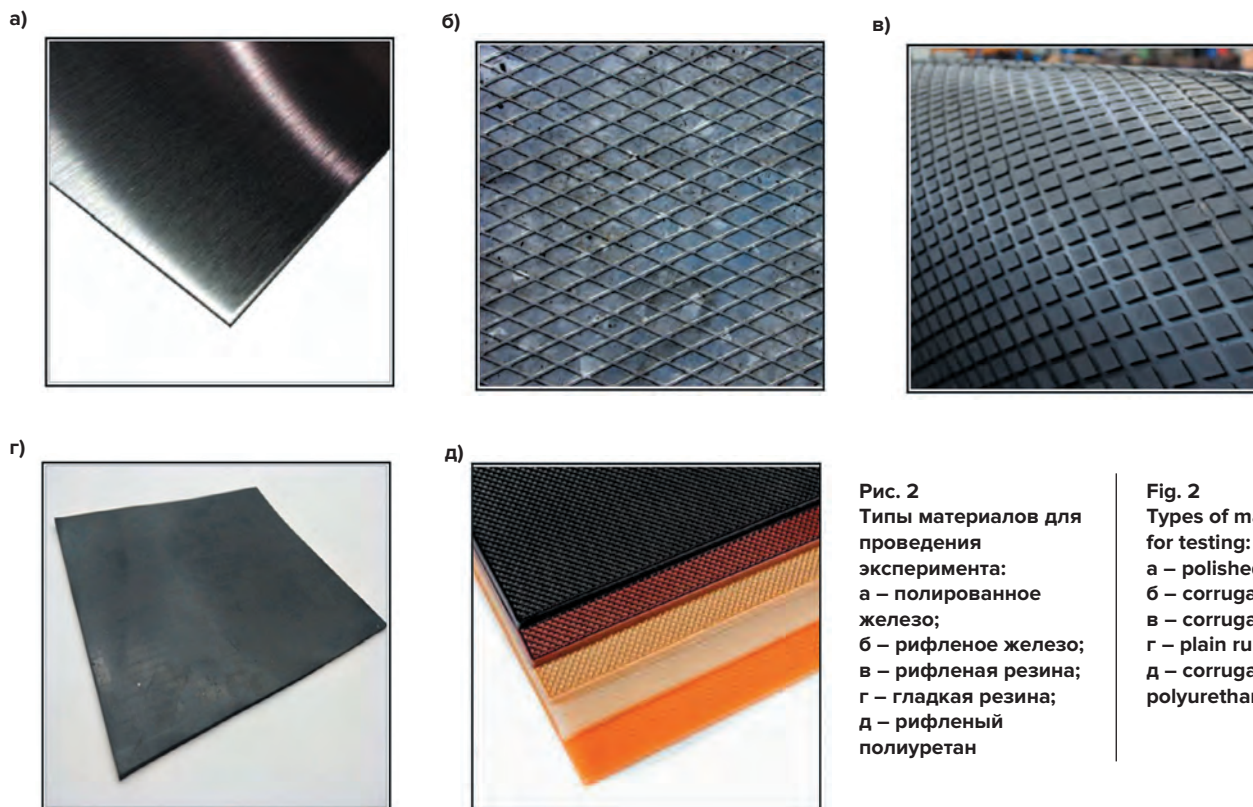


Рис. 2
Типы материалов для проведения эксперимента:
а – полированное железо;
б – рифленое железо;
в – рифленая резина;
г – гладкая резина;
д – рифленый полиуретан

Fig. 2
Types of materials for testing:
а – polished iron;
б – corrugated iron;
в – corrugated rubber;
г – plain rubber;
д – corrugated polyurethane

чина протектора; ν – частота протекторов; p – давление в шине; s – площадь контакта; t – температура.

Используя научный метод отсеивающего плана эксперимента [30; 31], из всех представленных факторов отобрали те, которые оказывают наибольшее влияние на коэффициент сцепления.

При проведении опытов пользуемся теорией подобия как геометрии, так и физических величин процессов [32]. Константа геометрического подобия составит $C_{\text{геом}}=1,5$. Это говорит о том, что в реальных условиях размеры приводной шины и продольной балки тележки больше в 1,5 раза. Константа физических процессов составит $C_{\text{физ}}=10$.

N – нагрузка на боковую пластину. Нагрузка приводной шины оказывает прямое влияние на коэффициент сцепления с боковой пластиной. Для опытов были выбраны следующие показатели: $N_1=0,47$ Н; $N_2=0,51$ Н; $N_3=0,55$ Н; $N_4=0,59$ Н; $N_5=0,63$ Н; $N_6=0,67$ Н; $N_7=0,71$ Н.

P – давление в приводной шине. На стендовых испытаниях нижним пределом по давлению является 0,1 bar, а верхним 1 bar. Для опытов были выбраны следующие показатели: $P_{\text{ш.1}}=0,1$ bar; $P_{\text{ш.2}}=0,2$ bar; $P_{\text{ш.3}}=0,4$ bar; $P_{\text{ш.4}}=0,6$ bar; $P_{\text{ш.5}}=0,8$ bar; $P_{\text{ш.6}}=1$ bar.

Результаты и их обсуждение

По результатам проведения эксперимента были получены данные по силе сцепления пневматической шины с различными твердыми материалами [33]. Экспериментальные данные были полностью обработаны с использованием статистических методов [34; 35].

Один из самых информативных графиков, демонстрирующих влияние входных факторов на исследуемый параметр, – это график зависимости коэффициента сцепления, зависящий от нормальной нагрузки при разных материалах. Данная зависимость представлена на рис. 3.

Приведенный график (рис. 3) показывает, что существует

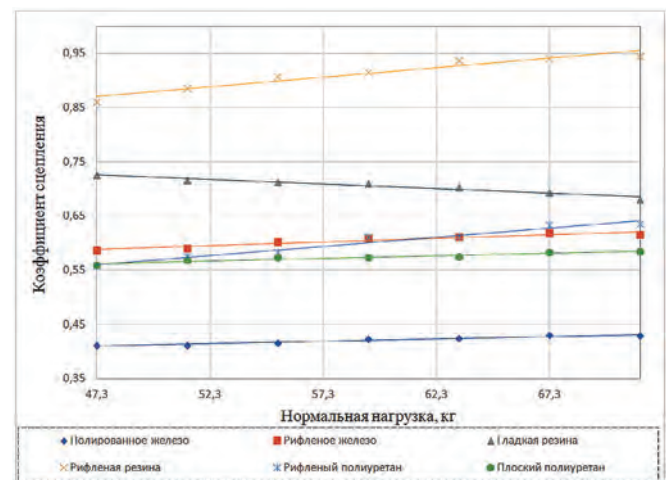


Рис. 3
Зависимость коэффициента сцепления от нормальной нагрузки при разных материалах и давлении в шине $P_{\text{ш}} = 0,8$ bar

Fig. 3
Dependence of the traction coefficient on normal load for different materials and the tire pressure $P_{\text{ш}} = 0.8$ bar

прямая зависимость коэффициента сцепления от нормальной нагрузки. В большинстве случаев при росте нагрузки увеличивается и коэффициент сцепления. Зависимость влияния исследуемого материала на выходной параметр показывает, что рифленая резина имеет наивысший коэффициент сцепления, в то время как полированное железо показывает наименьшие значения.

Вторую по степени влияния на коэффициент сцепления представляет зависимость от давления в приводном колесе (рис. 4). Давление в приводном колесе, как и нормальная нагрузка, приводят к изменению площади контакта только

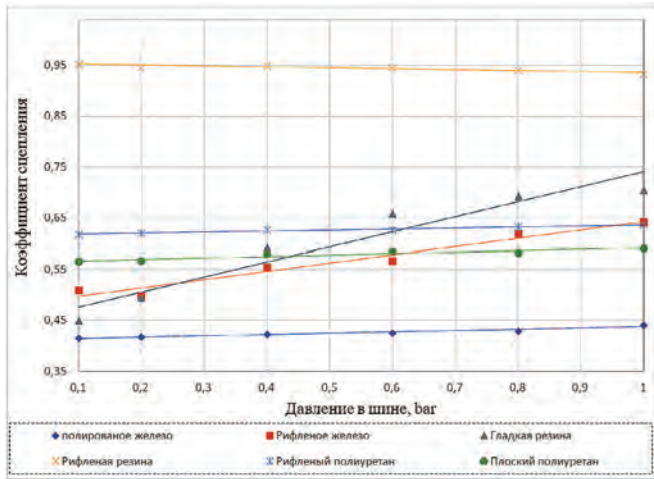


Рис. 4
Зависимость коэффициента сцепления от давления в шине при разных материалах и нормальной нагрузке $N = 67,3$ Н

Fig. 4
Dependence of traction coefficient on the tire pressure for different materials and normal load $N = 67.3$ Н

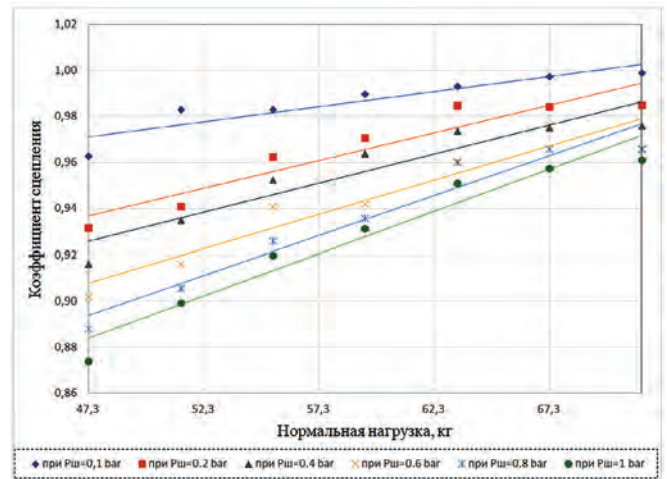


Рис. 5
Зависимость коэффициента сцепления рифленой резины от нормальной нагрузки при разном давлении в шине

Fig. 5
Dependence of the traction coefficient of corrugated rubber on the normal load at different tire pressures

в прямо пропорциональной зависимости. Согласно исследованиям [30] при увеличении давления в приводном колесе сила сцепления может как расти, так и снижаться в зависимости от влажности, скорости и материала покрытия.

По результатам (рис. 4) можно сделать вывод, что давление оказывает влияние в большей мере для таких материалов, как рифленое железо и гладкая резина. Для остальных материалов повышение давления приводит к незначительному повышению коэффициента нагрузки, а для рифленой резины вовсе приводит к уменьшению.

Из вышепостроенных графиков (рис. 3 и 4) с помощью функции Excel определения тренда определим уравнения и сведем их в табл. 1.

Таблица 1
Функциональные зависимости факторов для рис. 3 и 4

Table 1
Functional dependencies of the factors in Figures 3 and 4

Материал	$KC = f(p_{ш})$	$KC = f(N)$
Полированное железо	$y = 0,0258x + 0,412$	$y = 0,0009x + 0,3686$
Рифленое железо	$y = 0,1612x + 0,4821$	$y = 0,0014x + 0,5229$
Гладкая резина	$y = 0,2942x + 0,4469$	$y = -0,0017x + 0,8069$
Рифленая резина	$y = -0,0111x + 0,9507$	$y = 0,0034x + 0,7107$
Рифленый полиуретан	$y = 0,0209x + 0,6163$	$y = 0,0034x + 0,4012$
Плоский полиуретан	$y = 0,0283x + 0,5639$	$y = 0,001x + 0,5169$

Построенные уравнения в табл. 1 позволяют определить диапазон значений коэффициента сцепления при различных нормальной нагрузке и давлении в шине.

Исходя из результатов видно, что наиболее подходящим материалом является рифленая резина с наивысшим коэффициентом сцепления. Таким образом, необходимо вы-

яснить, при каком соотношении давления и нормальной нагрузки можно получить наибольшую силу сцепления. Приведем график зависимостей коэффициента сцепления от нормальной нагрузки (рис. 5).

Представленные выше графики показывают, что при увеличении нормальной нагрузки коэффициент сцепления стремится к 1. Диапазон коэффициента сцепления лежит в интервале от 0,85 до 0,985 с учетом рационально выбранных факторов.

При исследовании зависимости сцепления от давления образовалась противоположная последовательность. При увеличении давления в приводном колесе площадь контакта уменьшается, и количество зацепов между протектором шины и рифов резины соответственно уменьшается.

Представленные уравнения зависимостей позволяют определить конкретный коэффициент сцепления для определенных условий. Выбранные параметры взаимосвязаны, так как при увеличении нагрузки давление в шине повышается и наоборот. Таким образом необходимо подобрать оптимальные значения для определенных условий эксплуатации конвейерных поездов.

Заключение

В заключение можно сделать вывод, что коэффициент сцепления изменяется в зависимости от нормальной нагрузки, давления в приводной шине и материала продольной балки тележки. В настоящее время используется полированное железо в качестве фрикционного материала продольной балки тележки и диапа-

зон коэффициента сцепления лежит в интервале [0,4–0,46]. Для рифленого железа интервал значений составил [0,51–0,61]; для гладкой резины – [0,5–0,7]; для рифленой резины – [0,91–0,95]; для рифленого полиуретана – [0,59–0,6]; для плоского полиуретана – [0,55–0,56].

Согласно формуле (9) при использовании рифленой резины сила тяги увеличится на 116,7%, что приведет к увеличенному углу наклона трассы, увеличенной грузоподъемности и отсутствию проскальзывания при торможении конвейерного поезда.

Вклад авторов

Д.Н. Невзоров – подготовка данных; систематизация материала; анализ результатов исследования; написание текста статьи.

И.С. Труфанова – генерация идеи; постановка задачи исследования; написание текста статьи.

Authors' contribution

D.N. Nevzorov – processing of data; systematization of material; analysis of the research results; writing the text of the article.

I.S. Trufanova – generation of the idea; setting the research problem; writing the text of the article.

Список литературы / References

1. Жданеев О.В. Обеспечение технологического суверенитета отраслей ТЭК Российской Федерации. *Записки Горного института*. 2022;258:1061–1078. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.107>
Zhdaneev O.V. Technological sovereignty of the Russian Federation fuel and energy complex. *Journal of Mining Institute*. 2022;258:1061–1078. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.107>
2. Завьялов В.М., Семькина И.Ю., Дубков Е.А., Велиляев А.С. Система беспроводного заряда аккумуляторов для рудничного электровоза. *Записки Горного института*. 2023;261:428–442. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16188> (дата обращения: 06.11.2024).
Zavyalov V.M., Semykina I.Y., Dubkov E.A., Velilyaev A.S. The wireless charging system for mining electric locomotives. *Journal of Mining Institute*. 2023;261:428–442. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16188> (accessed: 06.11.2024).
3. Gromov E.V. Analysis of contemporary state and development prospects for trunk mine transport in deep mining. In: *Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018, 2–8 July, 2018*, pp. 63–70. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/1.3/S03.009>
4. Логинов Е.В., Масальский С.С., Петров К.Д. Обоснование технологической схемы работы комплекса выемочно-погрузочной техники и автотранспорта на карьере. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):22–34. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_22
Loginov E.V., Masalskiy S.S., Petrov K.D. Justification of technological scheme of work of the complex of extraction and loading equipment and automobile transport in openpit mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):22–34. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_22
5. Wheeler C.A. Development of the rail conveyor technology. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2019;33(2):118–132. <https://doi.org/10.1080/17480930.2017.1352058>
6. Gromov E., Belogorodtsev O. Efficient application of stripping schemes for mineral deposits: Conventional and advanced transportation of ore in dependence of annual productive capacity of underground mines. In: *Proceedings of the 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, 29 June – 5 July, 2017*, 305–311. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/13/S03.039>
7. Мякотных А.А., Иванова П.В., Иванов С.Л. К вопросу классификации комплексов добычи торфяного сырья. *Горная промышленность*. 2023;(6):137–142. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-137-142>
Myakotnykh A.A., Ivanova P.V., Ivanov S.L. On classification of peat extraction complexes. *Russian Mining Industry*. 2023;(6):137–142. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-137-142>
8. Гридина Е.Б., Боровиков Д.О. Повышение безопасности труда рабочего персонала карьера, расположенного в сложных горно-геологических условиях Крайнего Севера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):149–163. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_149
Gridina E.B., Borovikov D.O. Improving the safety of the working personnel of a quarry located in difficult mining and geological conditions of the Far North. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):149–163. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_149
9. Yakovlev V.L., Bersenev V.A., Glebov A.V., Kulniyaz S.S., Marinin M.A. Selecting cyclical-and-continuous process flow diagrams for deep open pit mines. *Journal of Mining Science*. 2019;55(5):783–788. <https://doi.org/10.1134/S106273911905615X>
10. Popov S.O., Malinowskii Y.A., Danilina G. V., Kozyrev S.N. The application features of conveyor trains at mining on deep horizons. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;7(9):1163–1167.
11. Труфанова И.С., Невзоров Д.Н. Применение конвейерных поездов как внешнего транспорта обоганительных предприятий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):64–78. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_64
Trufanova I.S., Nevzorov D.N. The use of conveyor trains as external transport for enrichment enterprises. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):64–78. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_64
12. Rahman A., Robinson W.A., Carr M.J., Wheeler C. A dynamic analysis of the rail conveyor system. In: *13th International Conference on Bulk Materials, Storage, Handling & Transportation*. 2019.
13. Handayani F.S., Pramesty F.P., Setyawan A. Reducing the release of greenhouse gases in the rigid pavement material transportation process unit. In: Kristiawan S.A., Gan B.S., Shahin M., Sharma A. (eds) *Proceedings of the 5th International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering. ICRMCE 2021*. Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 225. Springer, Singapore; 2023, pp. 763–769. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9348-9_67

14. Журавлёв А.Г., Семёнкин А.В., Черепанов В.А., Глебов И.А., Чендырев М.А. Задачи развития перспективных циклично-поточных технологий для глубоких карьеров. *Горная промышленность*. 2022;(1S):53–62. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-53-62>
Zhuravlev A.G., Semenkin A.V., Cherepanov V.A., Glebov I.A., Chendyrev M.A. The purpose of developing advanced in-pit crushing and conveying technology for deep open pits. *Russian Mining Industry*. 2022;(1 Suppl.):53–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-53-62>
15. Ma B., Lv C., Liu Y., Zheng M., Yang Y., Ji X. Estimation of road adhesion coefficient based on tire aligning torque distribution. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*. 2018;140(5):051010. <https://doi.org/10.1115/1.4038095>
16. Назарычев А.Н., Дяченко Г.В., Сычев Ю.А. Исследование надежности тягового электропривода карьерных самосвалов на основе анализа отказов его функциональных узлов. *Записки Горного института*. 2023;261:363–373. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16189> (дата обращения: 06.11.2024).
Nazarychev A.N., Dyachenok G.V., Sychev Y.A. A reliability study of the traction drive system in haul trucks based on failure analysis of their functional parts. *Journal of Mining Institute*. 2023;261:363–373. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16189> (accessed: 06.11.2024).
17. Nevskaya M., Shabalova A., Kosovtseva T., Nikolaychuk L. Applications of simulation modeling in mining project risk management: criteria, algorithm, evaluation. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*. 2024;8(8):5375. <https://doi.org/10.24294/jipd.v8i8.5375>
18. Борисов С.В., Колтунова Е.А., Кладиев С.Н. Совершенствование структуры имитационной модели тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза. *Записки Горного института*. 2021;247:114–121. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.12>
Borisov S.V., Koltunova E.A., Kladiev S.N. Traction asynchronous electric drive of mine electric locomotives simulation model structure improvement. *Journal of Mining Institute*. 2021;247:114–121. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.12>
19. Botyan E.Y., Lavrenko S.A., Pushkarev A.E. Evaluation of complicated mining exploitation conditions influence on service life of open pit trucks suspensions with remote monitoring systems. *International Journal of Engineering*. 2024;37(11):2268–2275. <https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.11b.12>
20. Шишлянников Д.И., Иванов С.Л., Звонарев И.Е., Зверев В.Ю. Повышение эффективности применения выемочных и транспортирующих машин комбайновых комплексов калийных рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(9):116–124. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-116-124>
Shishlyannikov D.I., Ivanov S.L., Zvonarev I.E., Zverev V.Yu. Improving efficiency of shearing and hauling machines in longwall potash mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(9):116–124. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-116-124>
21. Громов Е.В. Обоснование возможности реконструкции подземной транспортной схемы рудника при переходе на перспективные способы транспортирования руды (на примере гор. +170 м Кукисвумчоррского месторождения). *Проблемы недропользования*. 2017;(1):38–47. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.01.038>
Gromov E.V. Grounding the possibility of reconstruction the underground mine transport system by transition to perspective ore transportation processes (on the example of +170 m level of the Kukisvumchorsky deposit). *Problems of Subsoil Use*. 2017;(1):38–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.01.038>
22. Казаков Ю.Ф., Медведев В.И., Батманов В.Н., Павлов В.С. Кинематика и динамика движения неполнокруглого колесного движителя. В кн.: *Перспективы развития аграрных наук: материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Чебоксары, 10 апр. 2020 г.* Чебоксары: Чуваш. гос. сельскохоз. Акад.; 2020. С. 199–200.
23. Малиновский Ю., Ткаченко А., Бондарец А., Власенков Д., Олейник С., Рыбак Д. Особенности расчета сопротивления движению конвейерных поездов. *European Science*. 2023;(20-2):7–34. <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-20-02-008>
Malinovskii Yu., Tkachenko A., Bondarets A., Vlasenkov D., Oleinik S., Rybak D. Features of calculation of resistance to traffic of conveyor trains. *European Science*. 2023;(20-2):7–34. (In Ukrain.) <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-20-02-008>
24. Путов В.В., Путов А.В., Шелудько В.Н. Устройство измерения коэффициента сцепления транспортных колес с аэродромными и автодорожными покрытиями. Патент РФ RU 118753 U1. Дата подачи заявки: 03.11.2011 Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU118753U1_20120727 (дата обращения: 06.11.2024).
25. Труфанова И.С., Невзоров Д.Н. Устройство измерения коэффициента сцепления. Патент РФ RU 2809399 C1. Дата подачи заявки: 29.06.2023. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU2809399C1> (дата обращения: 06.11.2024).
26. Корневский В.В., Мордик Е.А., Попов А.В. Оптимизация процедур измерения коэффициента сцепления дорожных покрытий. *Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки*. 2020;(10):230–233.
Korenevsky V.V., Mordik E.A., Popov A.V. Optimization of procedures for measuring adhesion coefficient of road surfaces. *Humanities, Social-Economic and Social Sciences*. 2020;(10):230–233. (In Russ.)
27. Стрелок С.В., Семенова Т.В., Александрова Н.П. Математические модели коэффициента сцепления шины с асфальтобетонным шероховатым покрытием. В кн.: Бурлаченко О.В. (ред.) *Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса: сборник трудов Междунар. науч.-практ. конф., г. Волгоград, 7–8 дек. 2021 г.* Волгоград: Волгоград. гос. техн. ун-т; 2021. Ч. 2. С. 228–234.

28. Штефан Г.В., Беушев А.А. Фрикционные материалы для автопромышленности. В кн.: Протопопов А.В. (ред.) *Наука и молодежь: материалы XVII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Барнаул, 1–5 июня 2020 г.* Барнаул: Алт. гос. техн. ун-т; 2020. Ч. 3. С. 214–216.
29. Войтенко В.А., Сметанин С.А., Войтенко Г.О., Куценко В.Н., Нелюбов С.В. Перспективы новых фрикционных материалов. *Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении.* 2020;(2):65–76.
Voytenko V.A., Smetanin S.A., Voytenko G.O., Kutsenko V.N., Nelyubov S.V. Perspectives of new frictional materials. *Resource Saving Technologies for Production and Pressure Shaping of Materials in Machine-Building.* 2020;(2):65–76.
30. Бобрик Л.П. Существенные факторы сведений и планов отсеивающих экспериментов. *Инновации и инвестиции.* 2021;(5):141–144.
Bobrik L.P. Essential factors of intelligence and design of screening experiments. *Innovatsii i Investitsii.* 2021;(5):141–144. (In Russ.)
31. Иванищев Ю.Г., Давыдов В.М. Автоматизированная обработка результатов эксперимента. *Вестник Тихоокеанского государственного университета.* 2020;(3):25–32. Режим доступа: https://vestnik.togudv.ru/media/vestnik/articles-2020/025-032_Иванищев_Ю._Г._Давыдов_В._М..pdf (дата обращения: 06.11.2024).
Ivanishchev Y.G., Davydov V.M. Automated processing of experiment results. *Bulletin of Pacific National University.* 2020;(3):25–32. (In Russ.) Available at: https://vestnik.togudv.ru/media/vestnik/articles-2020/025-032_Иванищев_Ю._Г._Давыдов_В._М..pdf (accessed: 06.11.2024).
32. Логинова М.Е., Мовсумзаде Э.М., Фаттахов М.М., Ахтямов Э.К., Четвертнев С.С. Развитие теорий подобия для физико-химических процессов. *История и педагогика естествознания.* 2022;(4):39–42. <https://doi.org/10.24412/2226-2296-2022-4-39-42>
Loginova M.E., Movsumzade E.M., Fattakhov M.M., Akhtyamov E.K., Chetvertnev S.S. Development of the theories for similarity of physic-chemical processes. *History and Pedagogy of Natural Science.* 2022;(4):39–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2226-2296-2022-4-39-42>
33. Гайназаров А.Т., Абдурахмонов С.М. Системы обработки результатов научных экспериментов. *Scientific Progress.* 2021;2(6):134–141.
Gainazarov A.T., Abdurakhmonov S.M. Systems for processing the results of scientific experiments. *Scientific Progress.* 2021;2(6):134–141. (In Russ.)
34. Шамина С.В. Проведение корреляционного анализа данных научного эксперимента средствами программы Microsoft Excel. В кн.: Низамутдиновой Н.С. (ред.). *Современные проблемы экологии и естественных наук: материалы Национ. (Всерос.) научн. конф., г. Троицк, 15–17 марта 2021 г.* Челябинск: Южно-Урал. гос. аграр. ун-т; 2021. С. 150–155
35. Бочкарев С.В., Васильева Т.В., Галиновский А.Л., Даденков Д.А., Колпаков В.И., Костыгов А.М. *Планирование и обработка результатов эксперимента.* Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии»; 2020. 508 с.

Информация об авторах

Невзорov Данил Николаевич – аспирант кафедры транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: s225072@stud.spmi.ru

Труфанова Инна Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-3182-9746>

Information about the authors

Danil N. Nevzorov – Postgraduate Student of the Department of Transport and Technological Processes and Machines, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: s225072@stud.spmi.ru

Inna S. Trufanova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Transport and Technological Processes and Machines, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-3182-9746>

Информация о статье

Поступила в редакцию: 13.10.2024

Поступила после рецензирования: 09.01.2025

Принята к публикации: 14.01.2025

Article info

Received: 13.10.2024

Revised: 09.01.2025

Accepted: 14.01.2025