Бердников И.М., Великанов В.С., Строганов Ю.Н., Куреннов Д.В. Влияние сопротивления качению и сцепления опорной поверхности на расчётный показатель маневрирования шахтной шарнирно-сочленённой машины // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2026. – № 40. – С. 142-150.

УДК 622.61:629.113.073 https://doi.org/10.26160/2658-3305-2026-40-142-150

ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧЕНИЮ И СЦЕПЛЕНИЯ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА РАСЧЁТНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ МАНЕВРИРОВАНИЯ ШАХТНОЙ ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЁННОЙ МАШИНЫ

Бердников И.М.[1], Великанов В.С.[1,2], Строганов Ю.Н.[1], Куреннов Д.В.[1]

[1]Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург;

[2]Уральский государственный горный университет, Екатеринбург

Ключевые слова: шарнирно-сочленённая машина, подземная выработка, маневренная проходимость, сопротивление качению, продольное сцепление, увлажнение покрытия, поправочный множитель, предельная сила контакта.

Аннотация. Рассмотрено влияние характеристик опорной поверхности на предварительный расчёт маневрирования шарнирно-сочленённой машины специального назначения в подземной выработке. В развитие ранее опубликованного индекса, учитывающего коэффициент сцепления, скорость и радиус траектории, поперечный запрос силы дополнен продольным запросом на преодоление сопротивления качению. При круговой аппроксимации предельной результирующей силы контакта получены выражения для расчётного показателя и безразмерного поправочного множителя, не зависящего от коэффициента сцепления. Сопротивление качению для пяти категорий дорог принято по справочному руководству для карьерных дорог; коэффициент продольного сцепления в сухом и увлажнённом состоянии принят по результатам измерений на карьерных автодорогах, а сопоставление категорий выполнено авторами. Значения получены не в шахте. Расчёт реализован воспроизводимым алгоритмом на языке Python. При радиусе 10 м и скорости 9 км/ч показатель в сухом состоянии составляет от 11,83 для асфальтобетонного покрытия до 3,05-5,40 для временных дорог на породных отвалах, в увлажнённом – от 8,84 до 1,62-2,87; увлажнение снижает показатель на 21-47%. Поправочный множитель составляет от 0,954 до 0,304-0,537. Результаты характеризуют изменение расчётного критерия и не определяют допустимую скорость движения. Предложен состав данных для проверки модели на конкретной машине.

INFLUENCE OF ROLLING RESISTANCE AND ADHESION OF THE RUNNING SURFACE ON A CALCULATED MANEUVERING INDEX OF AN UNDERGROUND ARTICULATED VEHICLE

Berdnikov I.M.[1], Velikanov V.S.[1,2], Stroganov Yu.N.[1], Kurennov D.V.[1]

[1]Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg;

[1]Ural State Mining University, Yekaterinburg

Keywords: articulated vehicle, underground roadway, maneuverability, rolling resistance, longitudinal adhesion, wet surface, correction factor, limiting contact force.

Abstract. The study examines how running-surface characteristics affect a preliminary maneuvering calculation for a special-purpose articulated vehicle in an underground roadway. A previously published index, which involves the adhesion coefficient, speed and trajectory radius, is extended by adding the longitudinal force demand needed to overcome rolling resistance to the lateral force demand. Under an assumed circular envelope of the resultant contact force, expressions are obtained for a calculated index and for a dimensionless correction factor that does not depend on the adhesion coefficient. Rolling resistance for five road categories is taken from a reference manual for surface-mine haul roads; the longitudinal adhesion coefficient for dry and wet conditions is taken from measurements on quarry roads, and the correspondence between categories was established by the authors. The values were not obtained in a mine. The calculation is implemented as a reproducible Python algorithm. For a turning radius of 10 m and a speed of 9 km/h, the index in the dry state ranges from 11.83 for asphalt concrete to 3.05-5.40 for temporary roads on rock dumps, and in the wet state from 8.84 to 1.62-2.87; wetting reduces the index by 21-47%. The correction factor ranges from 0.954 to 0.304-0.537. The results describe a change in the calculated criterion and do not define a permissible speed. A set of data required to test the model on a specific vehicle is proposed.

Введение

Шарнирно-сочленённые машины применяются на транспортных и погрузочно-доставочных операциях в подземных выработках, где ограниченное пространство сочетается с неоднородным состоянием дороги. Возможность разворота за счёт относительного поворота полурам не гарантирует прохождение заданной траектории: оно зависит от габаритного коридора, нагрузок на колёса и способности пары «шина — поверхность» создавать требуемые силы. Геометрическую оценку манёвра поэтому необходимо дополнять оценкой силового запаса, а он, в свою очередь, определяется параметрами опорной поверхности.

В работе [1] предложен инженерный индекс маневренной проходимости, связывающий коэффициент сцепления, скорость и радиус траектории; в качестве направления развития указан учёт нестационарного контакта колёс с грунтом. Состояние поверхности в [1] описывается единым коэффициентом сцепления. Работа [2] рассматривает безопасность движения подземного транспорта во взаимосвязи с условиями выработки. Настоящая работа продолжает эту линию: в расчётную схему вводится продольный запрос силы, необходимый для преодоления сопротивления качению, и оценивается его влияние на ранее предложенный показатель.

Числовые характеристики дорожной поверхности для горной техники приводятся в справочных источниках. Руководство Бюро горного дела США (Kaufman W.W., Ault J.C. Design of surface mine haulage roads: manual. – Washington: U.S. Bureau of Mines, 1977. – Information Circular 8758) содержит приближённые значения сопротивления качению для категорий дорог открытых горных работ – от цементных и асфальтовых покрытий до рыхлого гравия с колеёй. Рекомендации Global Mining Guidelines Group (Recommended practices for battery electric vehicles in underground mining. Version 3. – 2022, табл. 9.2) приводят пример сопротивления качению 3% для подземной техники; коэффициент сцепления в нём не задан. В рассмотренных нами источниках отсутствуют раздельные количественные данные по сцеплению и сопротивлению качению, полученные на одной подземной поверхности и одной машине, поэтому расчёт выполняется на сценарных значениях параметров.

Подходы к описанию контакта колеса с опорной поверхностью различаются детализацией и потребностью в исходных данных; обзор [3] систематизирует их, выделяя среди прочих классическую террамеханику на основе полуэмпирических зависимостей. Кинематика и управление движением электрических шахтных шарнирно-сочленённых машин по траектории рассмотрены в [4], оценка коэффициента сцепления сочленённой техники на основе модели – в [5], определение сопротивления качению дорог по данным диспетчерской системы – в [6]. Электромеханическая модель погрузочно-доставочной машины, основанная на полевых измерениях, приведена в [7], экспериментальная оценка управления сочленённым самосвалом – в [8]. Измерения продольного сцепления колеса автомобиля с покрытиями карьерных автодорог в сухом и увлажнённом состоянии приведены в [9], а сопротивление качению, принимаемое при расчёте параметров съездов для полноприводных автосамосвалов, – в [10].

Цель работы – оценить влияние сопротивления качению и сцепления опорной поверхности на предварительный расчётный показатель манёвра шарнирно-сочленённой машины при фиксированных радиусе и скорости и определить состав данных для проверки модели в подземной выработке. Задачи: получить поправочный множитель к показателю [1]; реализовать воспроизводимый алгоритм расчёта; выполнить расчёт для пяти категорий поверхности; сформулировать данные, необходимые для идентификации параметров на конкретном участке.

Материалы и методы исследований

Параметры опорной поверхности

Сопротивление качению принято по таблице 7 руководства (Kaufman, Ault, 1977) для пяти категорий поверхности и пересчитано в безразмерный коэффициент f_r делением

процентного значения на 100. Коэффициент продольного сцепления μ принят по результатам измерений на карьерных автодорогах [9] (табл. 3, скорость 10 км/ч) отдельно для сухого и увлажнённого состояния покрытия. Категории руководства (Kaufman, Ault, 1977) сопоставлены с покрытиями, исследованными в [9], по близости характера поверхности: A – асфальтобетонное, B – щебёночное без обработки, C – грунтовое, улучшенное щебнем, D – грунтовое, E – временные автодороги на породных отвалах (табл. 1). Для категории C принято значение для продольного уклона 3%, для остальных – для горизонтального участка. Сопоставление выполнено авторами и является допущением: данные руководства (Kaufman, Ault, 1977) и работы [9] получены независимо и не измерялись на одной поверхности. Измерения [9] проведены на рудных карьерах при торможении колеса с шиной 6.40×15; значения для 10 км/ч приняты для расчётной скорости 9 км/ч.

Табл. 1. Категории опорной поверхности и параметры расчёта

Обозн.	Категория по руководству	Покрытие по [9]	μ сух.	μ увл.	Сопротивление качению, %	f_r
A	Цемент, асфальт, грунтоцемент	Асфальтобетонное	0,79	0,59	2	0,020
B	Плотно уплотнённый гравий, шлак или дроблёная порода	Щебёночное без обработки	0,63	0,48	3	0,030
C	Умеренно уплотнённый гравий, шлак или дроблёная порода	Грунтовое, улучшенное щебнем (уклон 3 %)	0,58	0,46	5	0,050
D	Необслуживаемый рыхлый грунт	Грунтовое	0,52	0,39	7,5	0,075
E	Рыхлый гравий и грязная поверхность с колеёй	Временные автодороги на породных отвалах	0,64	0,34	10-20	0,1-0,2

Категории руководства (Kaufman, Ault, 1977) относятся к дорогам открытых горных работ, а покрытия [9] исследованы на рудных карьерах; перенос на подземную выработку требует проверки. Уплотнённая дроблёная порода не эквивалентна обнажённой монолитной поверхности. Для категории E расчёт выполняется по обеим границам интервала f_r. Измеренное в [9] сухое сцепление для E (0,64) выше, чем для D (0,52), так как исследованы дороги на породных отвалах; это учитывается при сравнении категорий в сухом состоянии. Пример рекомендаций GMG с сопротивлением качению 3% соответствует $f_r = 0{,}03$ и показан на рисунке 3 отдельной линией, так как сцепление для него не задано.

Расчётная модель

Рассматривается установившееся движение по дуге окружности на горизонтальном участке с постоянной скоростью v (м/с). Радиус R (м) относится к траектории одной заранее выбранной характерной точки машины и не отождествляется с внешним габаритным радиусом. Далее: m – полная масса машины с грузом, кг; $g = 9{,}81$ м/с² – ускорение свободного падения; f_r – безразмерный коэффициент сопротивления качению; μ – безразмерный коэффициент, ограничивающий результирующую силу контакта на единицу нормальной нагрузки. Поперечная сила F_y, необходимая для движения по дуге, и продольная сила F_x, необходимая для преодоления сопротивления качению (обе в Н), равны

$$F_y = \frac{mv^2}{R};\ F_x = f_r mg\,. \tag{1}$$

Нормированный на вес машины поперечный запрос силы q_y (безразмерный) определяется как

$$q_y = \frac{F_y}{mg} = \frac{v^2}{Rg}\,. \tag{2}$$

Исходный показатель S_0, по форме совпадающий с индексом [1] при замене обозначения коэффициента сцепления на μ, записывается как

$$S_0 = \frac{\mu}{q_y},\ v > 0. \tag{3}$$

В показателе S_0 продольный запрос не учитывается. Для его учёта примем круговую аппроксимацию предельной результирующей силы контакта

$$\sqrt{F_x^2 + F_y^2} \le \mu m g. \tag{4}$$

Тогда дополненный расчётный показатель S (безразмерный) равен

$$S = \frac{\mu}{\sqrt{f_r^2 + q_y^2}} = \frac{\mu}{\sqrt{f_r^2 + \left(\frac{v^2}{Rg}\right)^2}}. \tag{5}$$

Условие $S \ge 1$ означает лишь, что в принятой схеме запрос сил не превышает заданного предела; оно не доказывает удержание траектории, вписывание в выработку или допустимость скорости. Модель не разрешает силы по отдельным колёсам и не включает боковой увод шин, уклон, разгон и торможение. Отношение дополненного показателя к исходному даёт поправочный множитель C, где λ – отношение продольного и поперечного запросов:

$$C = \frac{S}{S_0} = \frac{1}{\sqrt{1+\lambda^2}},\ \lambda = \frac{f_r}{q_y}. \tag{6}$$

Множитель C не зависит от численного значения μ, что позволяет оценить влияние сопротивления качению без назначения коэффициента сцепления. Расхождение двух показателей выражается величиной

$$D = 100(1 - C), \tag{7}$$

где D – снижение дополненного показателя относительно исходного, %.

Чувствительность показателя к параметрам поверхности при фиксированных v и R описывается частными производными

$$\frac{\partial S}{\partial \mu} = \frac{1}{\sqrt{f_r^2 + q_y^2}} > 0, \tag{8}$$

$$\frac{\partial S}{\partial f_r} = -\frac{\mu f_r}{(f_r^2 + q_y^2)^{3/2}} < 0. \tag{9}$$

Из (8), (9) следует расчётная монотонность показателя при принятых допущениях: рост сцепления повышает его, рост сопротивления качению снижает. Это свойство формулы, а не установленная опытом зависимость состояния шахтной дороги от одного признака.

Алгоритм расчёта

Расчёт реализован на языке Python 3 с использованием библиотек NumPy, pandas и Matplotlib. Алгоритм детерминирован: при неизменных входных данных он воспроизводит идентичный результат. Последовательность вычислений следующая.

Шаг 1. Задаются константы и геометрия манёвра: g = 9,81 м/с², R = 10 м (параметры сценария, не измерения).

Шаг 2. Формируется набор скоростей v от 3 до 12 км/ч; каждое значение переводится в м/с делением на 3,6.

Шаг 3. Из табл. 1 загружаются значения f_r и μ для сухого и увлажнённого состояния; для категории E задаются две границы f_r = 0,10 и 0,20. Отдельно фиксируется контрольное значение f_r = 0,03 по рекомендациям GMG без сопоставления ему μ.

Шаг 4. По формуле (2) для каждой скорости вычисляется q_y.

Шаг 5. По формулам (3) и (5) векторно вычисляются S_0 и S.

Шаг 6. По формулам (6) и (7) вычисляются C и D; округление выполняется только при выводе значений в текст.

Шаг 7. На регулярной сетке значений μ и f_r при v = 9 км/ч и R =10 м по формуле (5) рассчитывается поле S; на него наносятся точки сухого и увлажнённого состояния категорий A-E (для E – с вертикальным диапазоном f_r), стрелки перехода от сухого состояния к увлажнённому и линия, соответствующая примеру рекомендаций GMG (рис. 3).

Шаг 8. Числовые результаты сохраняются в таблицу CSV с указанием источника каждого входного значения, графики – в файлы PNG; сохранение отделено от расчёта.

Код и таблица результатов формируют рисунки 1-4 из одного набора входных данных, что исключает расхождение между таблицами и рисунками при повторном запуске. Код и таблица результатов доступны для рецензирования по запросу.

Результаты исследований

При v = 9 км/ч =2,5 м/с и R = 10 м получаем $q_y \approx 0{,}0637$. Результаты расчёта по таблице 1 приведены в таблице 2.

Табл. 2. Расчётные показатели манёвра при v = 9 км/ч и R = 10 м (сухое и увлажнённое состояние)

Обозн.	S_0 сух.	S сух.	S_0 увл.	S увл.	$C = S/S_0$	D, %
A	12,40	11,83	9,26	8,84	0,954	4,6
B	9,89	8,95	7,53	6,82	0,905	9,5
C	9,10	7,16	7,22	5,68	0,787	21,3
D	8,16	5,28	6,12	3,96	0,647	35,3
E	10,05	5,40-3,05	5,34	2,87-1,62	0,537-0,304	46,3-69,6

Переход от A к E изменяет и сопротивление качению, и сцепление, поэтому уменьшение S нельзя приписывать одному из параметров. Множитель C не зависит от μ и изменяется от 0,954 у A до 0,537-0,304 у E; соответствующее снижение D – от 4,6 до 46,3-69,6%. Эти значения выражают расхождение двух расчётных показателей, а не изменение фактической управляемости. При одинаковых f_r, v и R отношение показателей в увлажнённом и сухом состоянии равно отношению $\mu_{увл}/\mu_{сух}$: увлажнение снижает S на 25,3% для A, 23,8% для B, 20,7% для C, 25,0% для D и 46,9% для E. В сухом состоянии показатель для E (5,40-3,05) перекрывается с показателем для D (5,28) из-за высокого измеренного сухого сцепления на дорогах породных отвалов [9]; различие категорий в этом состоянии определяется в основном сопротивлением качению.

На рисунке 1 показано изменение показателя S при увеличении скорости от 3 до 12 км/ч при R = 10 м для сухого (а) и увлажнённого (б) состояния. Для всех категорий S убывает, так как q_y растёт пропорционально квадрату скорости. Для категории A показатель в сухом состоянии уменьшается с 37,24 при 3 км/ч до 6,87 при 12 км/ч, в увлажнённом – с 27,81 до 5,13; для категории E – с 6,38-3,20 до 4,24-2,78 в сухом и с 3,39-1,70 до 2,25-1,48 в увлажнённом состоянии. Наименьшее значение S в рассмотренных режимах составляет 1,48, поэтому граница S = 1 не достигается.

Рисунок 2 показывает поправочный множитель C. Он возрастает со скоростью, так как с ростом q_y отношение λ уменьшается: для категории A C увеличивается с 0,334 при 3 км/ч до 0,985 при 12 км/ч, для категории E – с 0,071-0,035 до 0,750-0,493. Следовательно, множитель C нельзя закреплять за материалом поверхности как постоянное свойство: он зависит от режима движения.

На рисунке 3 представлена карта показателя S в плоскости (μ, f_r) при v = 9 км/ч и R = 10 м. Линиями отмечены уровни S = 2, 5 и 10. Кружки A–E соответствуют сухому, квадраты A′–E′ – увлажнённому состоянию (табл. 1); стрелки показывают смещение при увлажнении, для E вертикальный отрезок отражает интервал f_r. Штриховая линия f_r = 0,03 – отдельный пример рекомендаций GMG, для которого μ не задан; она проходит на уровне, совпадающем с ординатой точек B и B′, однако это не означает подтверждения рекомендациями GMG значений μ для категории B. Цветовое поле между точками – математическое продолжение формулы (5), а не результат обследования покрытий.

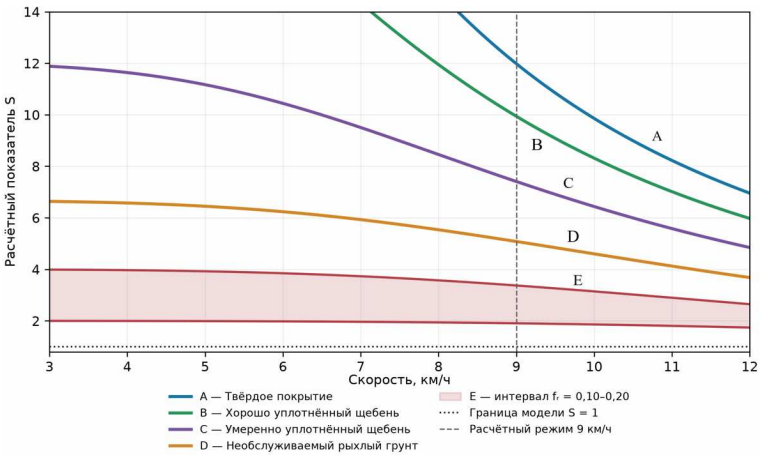


Рис. 1. Изменение показателя S при изменении скорости при R = 10 м: линии: 1 – A, 2 – B, 3 – C, 4 – D, 5 – E (штриховкой отмечена область между границами f_r = 0,10 и 0,20); f_r по руководству (Kaufman, Ault, 1977), μ по [9] по сопоставлению авторов

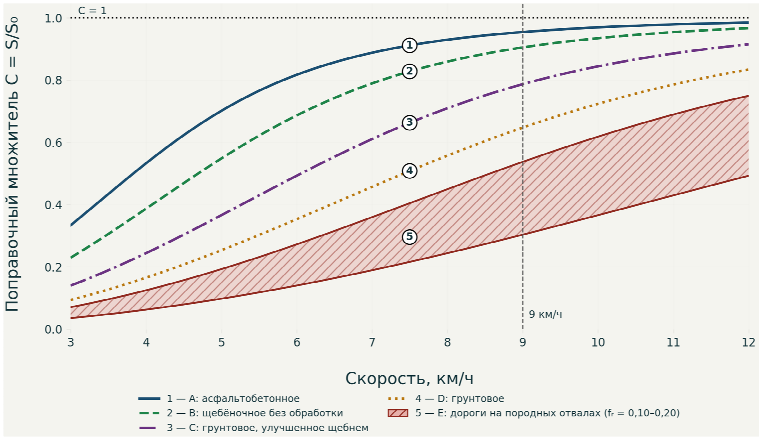


Рис. 2. Изменение поправочного множителя $C = S/S_0$ при изменении скорости при R = 10 м: линии: 1 – A, 2 – B, 3 – C, 4 – D, 5 – E (штриховкой отмечена область между границами f_r = 0,10 и 0,20)

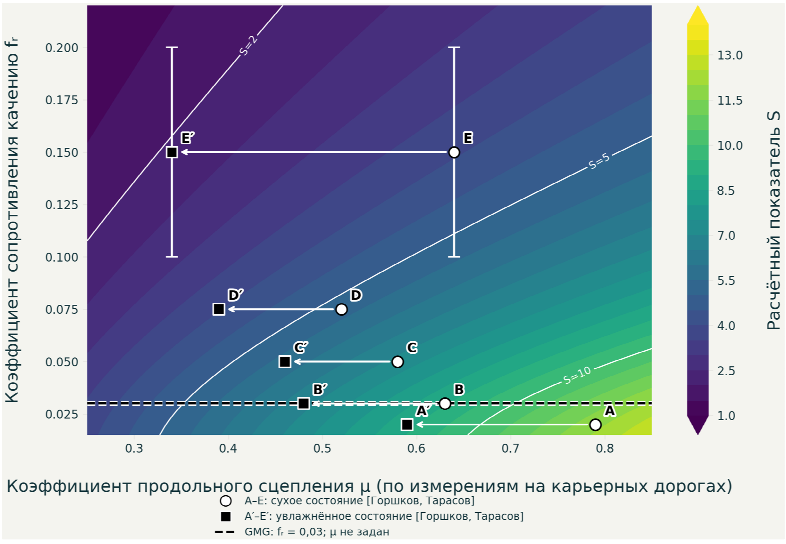


Рис. 3. Карта показателя S при v = 9 км/ч и R = 10 м: кружки A–E – сухое, квадраты A′–E′ – увлажнённое состояние (f_r по руководству (Kaufman, Ault, 1977), μ по [9] по сопоставлению авторов); для E показан интервал f_r; штриховая линия – f_r = 0,03 по рекомендациям GMG, μ не задан

Обсуждение результатов

Для сопоставления вкладов составляющих запроса на рисунке 4 приведены значения q_y и f_r при v = 9 км/ч и R = 10 м. Для категорий A–C сопротивление качению меньше поперечного запроса (λ = 0,31; 0,47; 0,79), для D и E оно его превышает (λ = 1,18 и 1,57-3,14).

Следовательно, в рамках модели при v = 9 км/ч для категорий D и E пренебрегать продольной составляющей нельзя. Для E на рисунке 4 использовано среднее значение диапазона только в целях наглядности, а вертикальный отрезок показывает его границы; в табл. 2 оно не применяется.

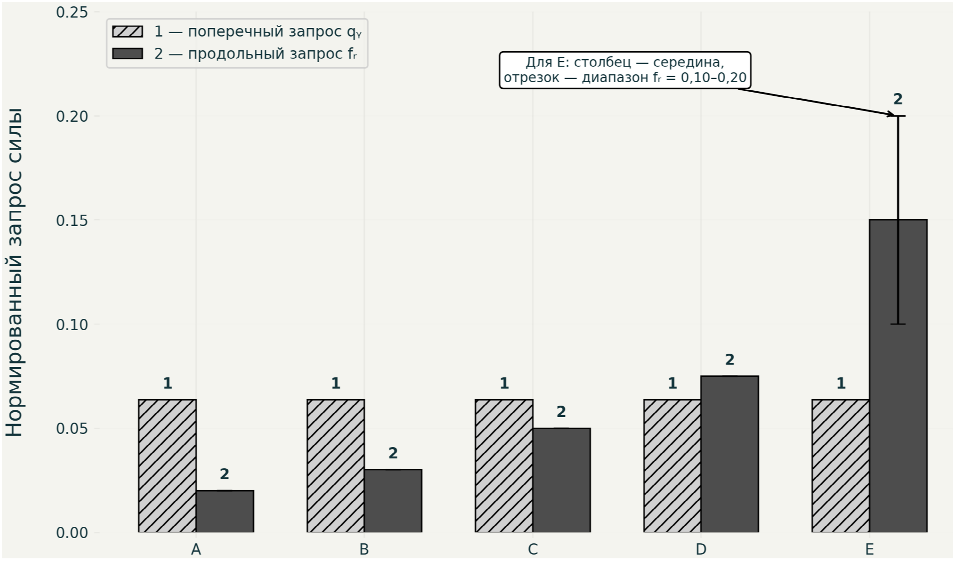


Рис. 4. Сопоставление нормированных запросов q_y (столбцы 1) и f_r (столбцы 2) при v = 9 км/ч и R = 10 м; для E столбец 2 показывает середину диапазона f_r = 0,10-0,20, отрезок – его границы

Результаты зависят от допущений модели. Круговая граница суммарной силы может не соответствовать поведению шины на деформируемой поверхности, где продольный и боковой пределы различаются; детальные подходы к описанию контакта рассмотрены в [3]. Усреднение по полной массе скрывает различие нагрузок на колёса передней и задней полурам. При разгоне, торможении и движении по уклону продольный запрос не равен $f_r mg$. Кроме того, радиус R в реальном манёвре зависит от увода шин и может изменяться вместе с поверхностью. Задачи управления траекторией сочленённой техники решаются более сложными моделями [4, 8]; предложенный показатель их не заменяет.

Значения μ в табл. 1 получены в [9] для рудных карьеров, а f_r – по справочнику для карьерных дорог (Kaufman, Ault, 1977); сопоставление категорий с покрытиями выполнено авторами, а данные руководства (Kaufman, Ault, 1977) и работы [9] не измерялись одновременно. Коэффициент μ в [9] – продольное сцепление при торможении колеса, тогда как в модели он ограничивает результирующую силу в повороте, поэтому равенство продольного и бокового пределов требует проверки. Сопротивление качению для щебёночного покрытия 0,02-0,04, принимаемое в российских расчётах полноприводных автосамосвалов [10], не противоречит значению 0,030 для категории B. Следовательно, абсолютные значения S следует рассматривать как результаты сценарного расчёта. Множитель C, не зависящий от μ, менее чувствителен к этой неопределённости, но зависит от f_r, v и R. Оценка сцепления для конкретной машины является отдельной задачей идентификации [5]; сопротивление качению может быть оценено по эксплуатационным данным [6]. Модель электромеханической нагрузки подземной машины, построенная по полевым измерениям, приведена в [7].

Для перехода к конкретной машине параметры необходимо определять на одном участке при сопоставимых состоянии покрытия, нагрузке и шинах. Состав входных и контрольных величин приведён в таблице 3; она описывает программу проверки, а не выполненные испытания. Отклонение траектории служит независимым наблюдаемым результатом, которого нет в формулах (1)-(9).

Габаритный коридор выработки следует оценивать отдельно: запас по силовому показателю не обеспечивает необходимого пространственного зазора. Испытания в шахте проводятся в соответствии с требованиями безопасности конкретного предприятия.

Табл. 3. Входные и контрольные величины для идентификации и проверки модели

Величина	Обозначение, единица	Способ получения	Назначение
Состояние слоя движения	Категория; место и время	Описание покрытия, уплотнения, воды, загрязнения и колеи с привязкой к участку	Сопоставимость опытов
Сопротивление качению	f_r, безразм.	Оценка по тяговому запросу и параметрам движения с учётом уклона и режима	Вход в (5), (6); проверка справочного значения
Доступная сила контакта	μ, безразм.	Идентификация контакта шины с поверхностью при зафиксированных нагрузке и состоянии шины	Вход в (5); проверка условия (4)
Траектория и скорость	R, м; v, м/с	Регистрация траектории выбранной точки и скорости	Вычисление по (2); сопоставление режимов
Нагрузка на колёса	N_i, Н; m, кг	Определение нормальных реакций по колёсам или осям	Проверка замены контактов суммарным mg
Параметры шин	Тип; давление, кПа	Фиксация комплектации в каждом опыте	Контроль сопоставимости
Реакция машины на манёвр	e_y, м; угол сочленения, рад	Сравнение зарегистрированной траектории с заданной	Проверка связи показателя с манёвром

Выводы

1. При v = 9 км/ч и R = 10 м расчётный показатель S в сухом состоянии изменяется от 11,83 для категории A до 5,40-3,05 для E, в увлажнённом – от 8,84 до 2,87-1,62; интервал для E определяется диапазоном сопротивления качению.

2. Увлажнение при неизменных f_r, v и R снижает S пропорционально отношению $\mu_{увл}/\mu_{сух}$: на 20,7-25,3% для категорий A–D и на 46,9% для E.

3. Учёт продольного запроса вводит множитель $C = (1 + \lambda^2)^{-1/2}$, не зависящий от μ; при 9 км/ч он равен 0,954 для A и 0,304-0,537 для E, а для A возрастает от 0,334 при 3 км/ч до 0,985 при 12 км/ч. Для категорий D и E $\lambda > 1$, и продольной составляющей в предварительном расчёте пренебрегать нельзя.

4. Расчёт воспроизводится алгоритмом на Python из одного набора данных; для применения к конкретной машине параметры поверхности необходимо определить по схеме таблицы 3.

Предложенное дополнение ранее опубликованного индекса позволяет количественно сопоставлять влияние сопротивления качению и сцепления опорной поверхности при одинаковом режиме манёвра и служит основой для планирования натурной идентификации параметров шахтной дороги. Показатель предназначен для предварительной оценки и не определяет допустимую скорость движения.

Список литературы

1. Бердников И.М., Великанов В.С. Оценка динамики и показателей проходимости шарнирно-сочленённых машин специального назначения при маневрировании в условиях ограниченного пространства // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2026. – №37. – С. 56-61. – doi.org/10.26160/2658-3305-2026-37-56-61.
2. Бердников И.М., Великанов В.С. Геотехнологические аспекты безопасности движения подземного транспорта // Горный журнал. – 2026. – №7. – С. 24-29. – doi.org/10.17580/gzh.2026.07.03.
3. Schepelmann A., Creager C.M., Proctor M.P., Johnson K.A., Breckenridge J.R., Elmland A., Naghipour Ghezeljeh P., Oravec H.A. An overview of tire-ground contact modeling approaches for surface mobility applications. – Cleveland: NASA Glenn Research Center, 2025. – NASA/TM-20250006958.
4. Bai G., Liu S., Zhou B., Huang J., Zheng Y., Elham E. Path tracking for electric mining articulated vehicles based on nonlinear compensated multiple reference points linear MPC // World Electric Vehicle Journal. 2024, vol. 15, no. 9, p. 427. doi.org/10.3390/wevj15090427.

5. Gao L., Wang S., Wang D., Ma F., Dong Y. A model-based method of tire-road friction estimation for articulated steering vehicles // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2024, vol. 238, no. 8, doi.org/10.1177/09544070231165936.
6. Alegre D., Peroni R.L., Aquino E.R., Dille F. A method to assess haul roads rolling resistance using dispatch system data // Mining Technology. 2021, vol. 130(3). doi.org/10.1080/25726668.2021.1935098.
7. Freire G., Ramirez G., Gómez R., Skrzypkowski K., Zagórski K. Electro-mechanical modeling and evaluation of electric load haul dump based on field measurements // Energies. 2023, vol. 16, no. 11, p. 4399. doi.org/10.3390/en16114399.
8. Shahirpour A., Reuscher T. Design and experimental evaluation of model predictive control for autonomous articulated dump trucks // Mining, Metallurgy & Exploration. 2025, vol. 42, no. 4, pp. 1975-1987. doi.org/10.1007/s42461-025-01265-6.
9. Горшков Э.В., Тарасов А.П. Исследование коэффициента сцепления колеса автомобиля с покрытием карьерных автодорог // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – №S8. – С. 330-343.
10. Лель Ю.И., Исаков С.В., Ганиев Р.С., Буднев А.Б., Глебов И.А. К обоснованию параметров крутонаклонных автосъездов при вскрытии глубоких горизонтов кимберлитовых карьеров // Известия вузов. Горный журнал. – 2020. – №7. – С. 21-32. – doi.org/10.21440/0536-1028-2020-7-21-32.

References

1. Berdnikov I.M., Velikanov V.S. Assessment of the dynamics and cross-country ability of articulated special-purpose vehicles when maneuvering in a limited space // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2026, no. 37, pp. 56-61. doi.org/10.26160/2658-3305-2026-37-56-61.
2. Berdnikov I.M., Velikanov V.S. Geotechnical aspects of underground transport safety // Mining Journal. 2026, no. 7, pp. 24-29. doi.org/10.17580/gzh.2026.07.03.
3. Schepelmann A., Creager C.M., Proctor M.P., Johnson K.A., Breckenridge J.R., Elmland A., Naghipour Ghezeljeh P., Oravec H.A. An overview of tire-ground contact modeling approaches for surface mobility applications. – Cleveland: NASA Glenn Research Center, 2025. – NASA/TM-20250006958.
4. Bai G., Liu S., Zhou B., Huang J., Zheng Y., Elham E. Path tracking for electric mining articulated vehicles based on nonlinear compensated multiple reference points linear MPC // World Electric Vehicle Journal. 2024, vol. 15, no. 9, p. 427. doi.org/10.3390/wevj15090427.
5. Gao L., Wang S., Wang D., Ma F., Dong Y. A model-based method of tire-road friction estimation for articulated steering vehicles // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2024, vol. 238, no. 8, doi.org/10.1177/09544070231165936.
6. Alegre D., Peroni R.L., Aquino E.R., Dille F. A method to assess haul roads rolling resistance using dispatch system data // Mining Technology. 2021, vol. 130(3). doi.org/10.1080/25726668.2021.1935098.
7. Freire G., Ramirez G., Gómez R., Skrzypkowski K., Zagórski K. Electro-mechanical modeling and evaluation of electric load haul dump based on field measurements // Energies. 2023, vol. 16, no. 11, p. 4399. doi.org/10.3390/en16114399.
8. Shahirpour A., Reuscher T. Design and experimental evaluation of model predictive control for autonomous articulated dump trucks // Mining, Metallurgy & Exploration. 2025, vol. 42, no. 4, pp. 1975-1987. doi.org/10.1007/s42461-025-01265-6.
9. Gorshkov E.V., Tarasov A.P. Study of the friction coefficient of the wheel of a car with the coating of quarry roads // Mining informational and analytical bulletin. 2008, no. S8, pp. 330-343.
10. Lel Iu.I., Isakov S.V., Ganiev R.S., Budnev A.B., Glebov I.A. Rationale for the parameters of steeply inclined ramps of kimberlite pits deep horizons exposing // Minerals and Mining Engineering. 2020, no. 7, pp. 21-32. doi.org/10.21440/0536-1028-2020-7-21-32.

Сведения об авторах:	*Information about authors:*
Бердников Илья Михайлович – аспирант	**Berdnikov Ilya Mikhailovich** – postgraduate student
Великанов Владимир Семенович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Подъёмно-транспортные машины и роботы» УрФУ; профессор кафедры автоматики и компьютерных технологий УГГУ	**Velikanov Vladimir Semenovich** – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department of lifting and transport machines and robots of UrFU; professor of the Department of automation and computer technologies of USMU
Строганов Юрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Подъёмно-транспортные машины и роботы»	**Stroganov Yuri Nikolaevich** – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of lifting and transport machines and robots
Куреннов Дмитрий Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных технологий и автоматизации проектирования	**Kurennov Dmitry Valerievich** – candidate of technical sciences, associate professor, head of the Department of information technologies and design automation
ilia1998-04@mail.ru	

Получена 04.10.2026