АВДЕЕВ Алексей Михайлович

ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР
КОНСТРУКТИВНЫХ И СИЛОВЫХ
ПАРАМЕТРОВ ФРИКЦИОННОГО ПРИВОДА С
ТЯГОВЫМ УСТРОЙСТВОМ НАКЛОННОГО
СКИПОВОГО ПОДЪЕМНИКА

Специальность 05.05.06 – Горные машины

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Тимофеев Игорь Парфенович

Официальные оппоненты:

Бардовский Анатолий Данилович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», кафедра «Инжиниринг технологического оборудования», профессор

Зверев Валерий Юрьевич

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра «Горная электромеханика», доцент

Ведущая организация — федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет»

Защита состоится 24 декабря 2020 г. в 12 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, В.О., 21-я линия, д. 2, ауд. 1171 а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru

Автореферат разослан 23 октября 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ диссертационного совета

ЗВОНАРЕВ Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Ведущее место в горнодобывающей промышленности занимает открытый способ разработки полезных ископаемых. По мере развития открытых горных работ наблюдается четко выраженная тенденция увеличения глубины карьеров, что ведет к значительному повышению суммарных затрат на добычу и транспортировку горной массы.

В настоящее время как в глубоких, так и в нагорных карьерах широко применяется канатный скиповой подъем, существенным недостатком которого является недопустимость углов, больших, чем 50° при ограниченной глубине карьера (не более 450 метров).

Одним из возможных технических решений, позволяющих расширить область применения скипового подъема, является создание горных машин, способных перемещаться без ограничения по углам наклона. Этим условиям отвечают самоходные скипы с фрикционным приводом и регулируемым давлением приводных колес на рельс. Однако такие горнотранспортные машины не нашли широкого применения из-за ряда нерешенных вопросов, связанных со снижением силы тяги из-за некомпенсированного износа их фрикционных элементов. Создание же самоходных скипов, лишенных этого недостатка, является актуальной задачей, что требует для своего решения проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Степень разработанности темы исследования

Большой вклад в вопросы модернизации и совершенствования рельсовых транспортных средств, в том числе, наклонных скиповых подъемников внесли Яковлев В.Л., Шешко Е.Ф., Спиваковский Н.С. и др.

Развитием теории и практики процесса сцепления колеса горных транспортных машин с рельсом, а также тяговых устройств фрикционного типа горных машин занимались известные ученые: Берсенев В.С., Беляев Н.М., Вдовиченко В.И., Глаголев Н.И., Денегин В.В., Керопян А.М., Лужнов Ю.М., Меншутин Н.Н., Минов Д.К., Наумкин О.В., Никифоров И.В., Петров Н.П., Рейнольдс О., Тимофеев И.П. и др.

Однако в их работах недостаточно освещен круг теоретических вопросов, связанных с закономерностями изменений парамет-

ров фрикционного привода наклонного самоходного скипа, что требует формирования конструктивных решений подобного привода, обеспечивающих компенсации износа элементов привода в межремонтный период эксплуатации самоходного скипа без снижения тяговых усилий.

Целью работы является выявление закономерностей изменения тягового усилия фрикционного привода самоходного скипа с учетом износа его элементов в процессе эксплуатации для научно обоснованного технического решения привода самоходного скипа с регулируемым давлением на тяговый рельс и компенсацией износа привода в межремонтный период, обеспечивающего доставку горной массы по крутонаклонным выработкам без использования канатной тяги, что вносит значительный вклад в развитие горной отрасли страны.

Идея работы заключается в снижении нагрузок в элементах привода самоходного скипа на основе комплексного учета взаимосвязи конструктивных и силовых параметров фрикционного тягового привода, адаптированных к изнашиванию его ходовых частей и к различным условиям эксплуатации путем формирования приводной рычажной системы скипа так, что длины прямых рычагов пропорциональны диаметру ведущих колес, а плечи угловых рычагов установлены друг к другу под углом, большим, чем 90°, что повышает стабильность сцепления при изнашивании ходовых частей привода самоходного скипа.

Основные задачи исследований

- 1. Обзор и анализ конструкций и параметров основных видов транспортных средств на карьере.
- 2. Анализ теоретических и экспериментальных исследований процесса сцепления гладкого колеса с рельсом. Анализ и выбор конструктивных схем тяговых устройств фрикционного типа.
- 3. Теоретическое обоснование конструктивных решений рычажного фрикционного привода самоходного скипа. Разработка математической модели механизма привода тягового устройства самоходного скипа. Компьютерное моделирование процесса движения самоходного скипа по рельсовым направляющим с углом наклона от 20° до 50° к горизонту.
- 4. Экспериментальные исследования влияния угла наклона рельсового пути и массы перемещаемого груза на изменение полез-

ной мощности привода самоходного скипа, потребной для его движения с заданной скоростью.

5. Рекомендации по выбору конструктивных и силовых параметров тягового фрикционного привода наклонного самоходного скипа.

Научная новизна

Разработана математическая модель механизма тягового рычажного привода самоходного скипа, учитывающая изменение силы тяги привода от геометрических параметров его рычажной системы и фрикционного взаимодействия ведущих колес привода с центральным тяговым рельсом по траектории движения самоходного скипа.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Установлено, что изменение полезной мощности привода самоходного скипа, приходящейся на единицу перемещаемого груза, от угла наклона рельсового пути и неизменной скорости движения описывается квадратичной функцией с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Разработана конструктивная схема регулируемого тягового устройства, защищенная патентом на полезную модель №165910.

Предложена конструктивная схема тягового устройства, позволяющая уменьшить габариты скипа, защищенная патентом на полезную модель №185909.

Установленная зависимость полезной мощности, приходящейся на единицу перемещаемого груза, от угла наклона рельсового пути позволяет оценить мощность привода самоходного скипа для различных масс насыпного груза и углов наклона траектории движения.

Методология и методы исследований

Используется комплекс методов анализа возможностей совершенствования системы привода самоходного скипа в рамках теории горной механики, триботехники, трибофатики, имитационного и компьютерного моделирования в сочетании с теорией экспериментальных исследований, методов экспериментальной механики и методов оптимизации.

Соответствие паспорту специальности: работа соответствует области исследования паспорта специальности 05.05.06 — Горные машины: п. 3 «Обоснование и оптимизация параметров и режимов работы машин и оборудования и их элементов»; п. 4 «Обоснова-

ние и выбор конструктивных и схемных решений машин и оборудования во взаимосвязи с горнотехническими условиями, эргономическими и экологическими требованиями».

Положения, выносимые на защиту

- 1. Установлено, что в предложенной конструктивной схеме тягового привода самоходного скипа при уменьшении длины прямого рычага рычажной системы от 4D до 2D, где D диаметр ведущих колес, передаточное число увеличивается от 6,3 до 6,8, а при пропорциональном уменьшении длины короткого плеча углового рычага с 0,25D до 0,125D при постоянной длине прямого рычага 2D передаточное число возрастает от 6,8 до 12,5, при этом плечи углового рычага расположены по отношению друг к другу под углом γ =97,0°±0,5°.
- 2. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что зависимость изменения полезной мощности привода самоходного скипа, приходящейся на единицу перемещаемого груза, от угла наклона рельсового пути достоверно описывается квадратичной функцией и при этом составляет 1,1 кВт/т для угла 20° и 2,5 кВт/т для угла 50° при неизменной скорости движения, установленных условиях эксплуатации и фиксированных конструктивных параметрах скипа.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Научные положения, выводы и рекомендации, разработанные в диссертации, соответствуют классическим положениям теоретической механики и основам математического моделирования и подтверждены удовлетворительной сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Основные положения и результаты работы в целом и отдельные ее разделы докладывались и получили положительную оценку на международных и всероссийских конференциях: 2015: 56th STUDENTS SCIENTIFIC SESSION (MINING SECTION) (г. Краков, Польша); 2016: IV Международная научно-практическая конференция «Инновации на транспорте и в машиностроении» (г. Санкт-Петербург, Горный университет); 2018: Санкт-Петербургский международный научно-образовательный салон (г. Санкт-Петербург); 2019: Международный семинар «Круглый стол молодых ученых «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2019» (г. Санкт-Петербург, Горный университет), а также на заседаниях кафедры машиностроения Горного

университета (г. Санкт-Петербург, 2015-2019 гг.).

Личный вклад автора

Включенное участие на всех этапах процесса; участие в получении исходных данных и научных экспериментах; анализ особенностей работы тягового устройства фрикционного привода самоходного скипа с регулируемым в функции сопротивления давлением приводных колес на рельс; разработка алгоритма и обоснование комплекса методов для исследования особенностей работы тягового устройства привода самоходного скипа на наклонном рельсе; разработка прикладной компьютерной программы исследования процесса движения тягового устройства привода самоходного скипа на наклонном рельсе; формулировка научных положений, основных выводов и рекомендаций.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 2 статьях — в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее — Перечень ВАК) (из них в 1 статье — в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus), в 1 статье — в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Усория; получено 2 патента на полезную модель.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 117 наименований. Диссертация изложена на 116 страницах машинописного текста и содержит 51 рисунок и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы актуальность выбранной темы, цель и задачи исследования и обоснована необходимость создания специальных транспортных средств на основе механизмов фрикционного типа.

В первой главе приведен обзор современного состояния карьерного транспорта, рассмотрены конструкции и основные технические параметры эксплуатируемых серийных агрегатов, сформулированы их достоинства и недостатки. Проанализированы результаты

ранее проводимых научно-исследовательских работ и изобретательской деятельности.

Во второй главе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса сцепления гладкого колеса с рельсом привода самоходного скипа; представлены основные уравнения, описывающие процессы создания силы тяги; проведен сравнительный анализ схем тяговых приводов с регулируемым в функции сопротивления давления приводных колес на рельс и сделан вывод о необходимости использования фрикционного привода самоходного скипа с угловыми рычагами, плечи которых расположены по отношению друг к другу под углом 97,0°±0,5°; проведен анализ влияния основных геометрических параметров на передаточное число рычажной системы привода и выявлен элемент, длина которого оказывает наибольшее влияние на передаточное число.

В диссертационной работе проанализированы различные схемы тяговых приводов с возможностью применения для движения самоходного скипа. Окончательно принята схема тягового привода на основе симметричного тягового устройства рычажного типа с угловыми рычагами, плечи которых расположены под углом $97,0^{\circ}\pm0,5^{\circ}$, представленная на рисунке 1.

Расчетная схема силовой загрузки тягового устройства представлена на рисунке 2

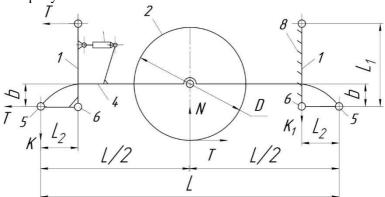


Рисунок 2 — Схема силовой загрузки рычажной системы 1 — угловой рычаг, 2 — ведущее колесо, 3 — шарнир, 4 — прямой рычаг, L — длина прямого рычага, L_1 — длинное плечо углового рычага, L_2 — короткое плечо углового рычага, b — расстояние от центра ведущего колеса до центра шарнира 3, K — усилие, приложенное к

прямому рычагу, N — нормальная реакция рельса, T — касательная реакция рельса, D — диаметр ведущего колеса.

Расчетное передаточное число рычажной системы привода самоходного скипа (1):

$$u = \frac{L_1(L - L_2)}{L_2(0.5L - L_2 + \psi \cdot b)},$$
 (1)

где у – коэффициент сцепления колеса с рельсом.

На основании выражения (1) исследовано влияние геометрических параметров рычажной системы на передаточное число тягового привода самоходно скипа.

Зависимости передаточного числа рычажной системы привода u от длины прямого рычага L при принятых значениях L_1 =0,75D, L_2 =0,25D, ψ =0,12 представлены на рисунке 3.

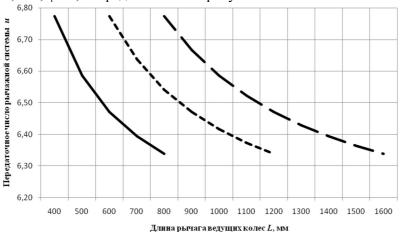


Рисунок 3 — Зависимость передаточного числа рычажной системы привода u от ее геометрических параметров:

Наибольшее влияние на величину передаточного числа u оказывает соотношение размеров длинного L_1 и короткого L_2 плеча углового рычага. По конструктивным соображениям L_1 =0,75D, а L_2 =0,125D, что обеспечивает максимальное значение передаточного

числа u=12,5 (рисунок 4).

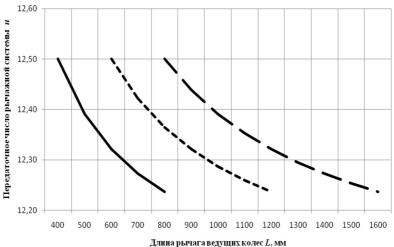


Рисунок 4 – Зависимость передаточного числа рычажной системы привода u от ее геометрических параметров при $L_2 = 0.125D$:

- D =
$$200 \text{ mm}$$
; - = - D = 300 mm ; - = - D = 400 mm

Стабильность работы самоходного скипа возрастает, если в процессе изнашивания ходовых частей тягового привода передаточное число обратной связи будет увеличено. Указанное условие обеспечивается применением угловых рычагов с углом между плечами $97,0^{\circ}\pm0,5^{\circ}$.

Схема сил, действующих на угловой рычаг тягового устройства привода, представлена на рисунке 5.

Передаточное число углового рычага в исходном положении (2):

$$u = \frac{K}{T} = \frac{L_1 \cos \alpha}{L_2},\tag{2}$$

В результате изнашивания ведущих колес и рельса переда-

точное число
$$u$$
 углового рычага после поворота на угол β (3):
$$u_1 = \frac{K_1}{T} = \frac{L_1 \cos(\alpha - \beta)}{L_2 \cos \beta}.$$
 (3)

где K_1 – усилие, приложенное к прямому рычагу в новом положении.

Коэффициент изменения Δ передаточного числа u_I углового рычага привода скипа при повороте на угол β (4):

$$\Delta = \frac{u_1}{u} = \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos \beta \cos \alpha}.$$
 (4)

Зависимость коэффициента изменения передаточного числа углового рычага привода Δ в зависимости от угла β представлена на рисунке 6.

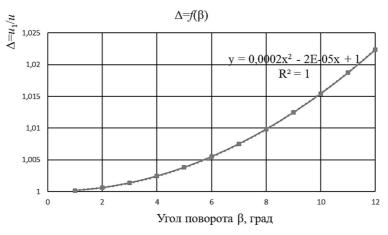


Рисунок 6 — Зависимость коэффициента Δ от угла поворота углового рычага

Установлено, что при любом значении угла $\beta > 0$ наблюдается параболическое возрастание передаточного числа углового рычага, а, следовательно, общего передаточного числа рычажной системы тягового привода самоходного скипа, что повышает стабильность его работы.

В третьей главе составлена математическая модель, описываемая дифференциальным уравнением движения самоходного скипа без проскальзывания при работе на рельсе, которая положена в основу программы «A_PULL», позволяющая оценить кинематические параметры фрикционного привода; установлена функциональная зависимость полезной мощности привода от различных условий эксплуатации самоходного скипа.

На рисунке 7 представлена схема к составлению динамической модели самоходного скипа

Уравнение движения самоходного скипа (5)

$$\varepsilon = \frac{M^* - mgRsin\alpha}{m_0 R^2},\tag{5}$$

где g — ускорение свободного падения, м/c²; α — угол наклона рельсового пути; ϵ — угловое ускорение ведущего колеса, рад/c²; m_0 — масса системы, кг.

Для реализации расчетного режима движения, при котором отсутствует проскальзывание ведущих колес тягового привода самоходного скипа относительно рельса, необходимо выполнение условия (6), (7):

$$\psi < \psi_0, \tag{6}$$

где ψ – расчетный коэффициент трения; ψ_0 – коэффициент трения скольжения;

$$\psi = \frac{F}{N} = \frac{\frac{1}{2R} [(1 - \lambda)M^* + \lambda M^*]}{N_{\rm H} + u \frac{\mu}{2R} [(1 - \lambda)M^* + \lambda M^*]}.$$
 (7)

где $N_{\rm H}$ — сила предварительного прижатия колес к рельсу, H; λ — отношение массы ведущего колеса к массе системы; u — передаточное число рычажной системы привода скипа; μ — отношение массы вагонетки к массе системы.

При движении самоходного скипа с проскальзыванием ведущих колес относительно рельса система имеет две степени свободы.

Движение системы при этом описывается двумя дифференциальными уравнениями (8):

$$\begin{cases} J\frac{d\omega}{dt} = M^* - FR; \\ m\frac{dv}{dt} = F - mg\sin\alpha, \end{cases}$$
 (8)

где J — момент инерции системы приведенный к оси вращения, $\kappa \Gamma^{\times} M^{2}$, α — угол наклона рельсового пути, градус.

В результате компьютерного моделирования процесса движения самоходного скипа в оригинальной программе (MSDEV) получены значения полезной мощности привода, потребной на перемещение груженого скипа для углов наклона рельсового пути α 3-90 градусов, представленные в таблице 1.

По результатам компьютерного моделирования рассчитана удельная полезная мощность привода самоходного скипа на единицу перемещаемого груза для углов наклона рельсового пути α 3-90 градусов, значения которой представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Мощность привода самоходного скипа, затрачиваемая

на перемещение насыпного груза массой m

Угол подъема α, град	Мощность N , к B т				
	(<i>m</i> =2 т)	(<i>m</i> =5 T)	(<i>m</i> =10 т)	(<i>m</i> =20 т)	
3	0,37 0,93 1,85		3,74		
10	1,23	3,08	6,16	12,33	
20	2,43	6,07	12,14	24,28	
30	3,55	8,87	17,75	35,49	
40	4,56	11,41	22,81	45,63	
50	5,44	13,59	27,19	54,38	
60	6,15	15,37	30,74	61,47	
70	6,67	16,68	33,35	66,70	
80	6,99	17,48	34,95	69,90	
90	7,10	17,75	35,49	70,98	

Таблица 2 – Удельная мощность привода самоходного скипа

Угол подъема α, град	Удельная мощность <i>q</i> , кВт/т				
	(<i>m</i> =2 т)	(m=5 T)	(m=10 T)	(<i>m</i> =20 т)	
3	0,167	0,168	0,168	0,168	
10	0,554	0,555	0,555	0,555	
20	1,095	1,094	1,094	1,094	
30	1,599	1,598	1,599	1,599	
40	2,054	2,056	2,055	2,055	
50	2,450	2,449	2,450	2,450	
60	2,770	2,769	2,769	2,769	
70	3,005	3,005	3,005	3,005	
80	3,149	3,150	3,149	3,149	
90	3,198	3,198	3,197	3,197	

Теоретически установлены параболические зависимости удельной мощности привода самоходного скипа от угла наклона рельсового пути для различных масс перемещаемого груза, представленные на рисунках 8, 9.

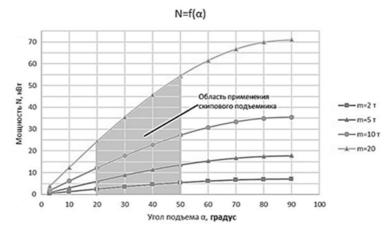


Рисунок 8 — Зависимость мощности привода от угла наклона рельсового пути при различных массах груза

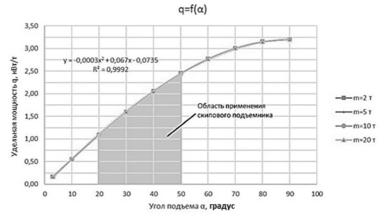


Рисунок 9 — Зависимость удельной мощности привода от угла наклона рельсового пути при различных массах груза

Установлено, что при перемещении горной массы от 2 до 20 т при угле наклона рельсового пути α =20°, удельная мощность q остается постоянной (9) и составляет 1,1 кВт/т, а при подъеме на угол α 50° — 2,5 кВт/т соответственно при постоянной скорости движения скипа.

$$q = -3 \cdot 10^{-4} \alpha^2 + 6.7 \cdot 10^{-2} \alpha - 7.4 \cdot 10^{-2}. \tag{9}$$

В четвертой главе изложены результаты экспериментальных исследований процесса движения самоходного скипа; произведена количественная и качественная оценка влияния угла наклона

рельсового пути и массы перемещаемого груза на мощность привода самоходного скипа; приведены результаты замеров линейной скорости самоходного скипа при различных углах наклона рельсового пути при движении как по сухому рельсу, так и с использованием смазочных материалов, таких как силиконовая смазка, литол, моторное масло.

Исследования проводились на экспериментальном стенде, представленном на рисунке 10.

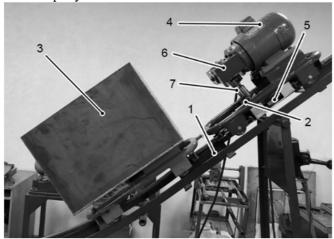


Рисунок 10 — Экспериментальный стенд имитационной модели самоходного скипа

Экспериментальная модель самоходного скипа представляет собой макет рельсового пути (1) с расположенным на нем тяговым агрегатом (2) и вагонеткой (3). Тяговый агрегат включает в себя электродвигатель АОЛ 11-4 (4), соединенный с тяговым устройством (5) (рисунок 11) посредством червячного редуктора (6) и карданных валов (7).



Рисунок 11 – Тяговое устройство фрикционного типа

В ходе проведения эксперимента получены значения удельной мощности электродвигателя привода, снабженного тяговым устройством, при перемещении груза массой 52-82 кг при наклоне участка рельсового пути экспериментального стенда от 0° до 40° , представленные в таблице 3.

Таблица 3 - Удельная мощность электродвигателя, приходящаяся на единицу перемещаемой массы

Угол подъема α,	Удельная мощность q_3 ·10 ⁻⁴ , кВт/кг				Средняя удель-
град	m=52	m=62	m=72	m=82	ная мощность, $q_{\text{3. cp}} \cdot 10^{-4} \text{кBт/кг}$
	КΓ	ΚГ	ΚГ	КГ	43. cp
0	5,2	4,7	4,0	4,0	4,5
20	8,9	8,6	8,4	8,3	8,6
25	10,4	9,8	9,9	10,0	10,0
30	11,4	10,8	11,1	11,5	11,2
35	11,7	11,6	12,1	12,3	11,9
40	11,9	12,0	12,6	12,9	12,4

На рисунке 12 представлены зависимости удельной мощности, потребляемой на единицу массы груза для углов наклона рельсового пути 0° - 40° , построенные по результатам эксперимента.

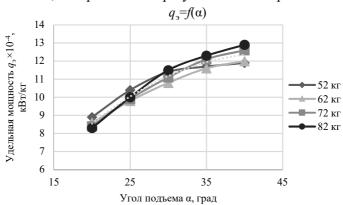
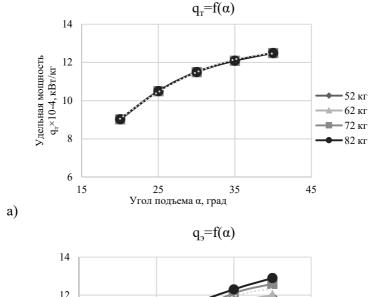


Рисунок 12 – Зависимость удельной мощности электродвигателя от угла наклона рельсового пути при различных массах груза

Экспериментально подтверждена параболическая зависимость удельной мощности электродвигателя $q_{\text{э. cp}}$ на единицу перемещаемой массы от угла наклона рельсового пути (10).

$$q_{\text{3. cp}} = -7.3 \cdot 10^{-3} \alpha^2 + 0.63 \alpha - 1.08.$$
 (10)

Результаты теоретических (а) и экспериментальных (б) исследований зависимости удельной мощности электродвигателя от угла наклона рельсового пути при различных массах груза представлены на рисунке 13.



12 Удельная мощность 52 кг q₃×10-4, кВт/кг 62 кг 10 72 кг -82 кг 8 6 25 3 Угол подъема α , град 15 35 45

Рисунок 13 – Зависимость удельной мощности электродвигателя на единицу массы от угла наклона рельсового пути а) теоретические исследования (компьютерное моделирование), б) экспериментальные исследования.

б)

Установлена удовлетворительная сходимость результатов теоретических (11) и экспериментальных исследований (12).

$$q_{\text{T. cp}} = -7.3 \cdot 10^{-3} \alpha^2 + 0.61 \alpha - 0.17$$

$$q_{\text{3. cp}} = -7.3 \cdot 10^{-3} \alpha^2 + 0.63 \alpha - 1.08.$$
(11)

$$q_{3,cp} = -7.3 \cdot 10^{-3} \alpha^2 + 0.63 \alpha - 1.08.$$
 (12)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой приведены разработанные автором теоретические и практические положения, которые в совокупности можно классифицировать как решение научной задачи по созданию привода фрикционного типа на основе тягового устройства с регулированием в функции сопротивления давлением приводных колес на рельс, выбору конструктивных и силовых параметров тягового фрикционного привода наклонного самоходного скипа.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

- 1. Обзор и анализ конструкций и параметров основных видов транспортных средств на карьере показал, что с ростом глубины карьеров возникает необходимость создания технических средств для перемещения горной массы по выработкам с углом наклона до 50°. Одним из возможных технических решений является создание самоходного скипа с фрикционным приводом на основе тяговых устройств с регулируемым в функции сопротивления движению давлением ведущих колес на рельс.
- 2. В результате анализа теоретических и экспериментальных исследований процесса сцепления гладкого колеса с рельсом установлен диапазон изменения передаточного числа рычажного механизма тягового устройства в зависимости от реализуемого в данных условиях эксплуатации самоходного скипа коэффициента сцепления. Компенсация износа ходовых частей привода самоходного скипа обеспечивается применением тягового устройства с угловыми рычагами, плечи которых расположены по отношению друг к другу под углом γ =97,0°±0,5°.
- 3. Наибольшее влияние на передаточное число рычажной системы привода самоходного скипа u оказывает длина короткого плеча углового рычага. Максимальное значение соотношения длин плеч углового рычага, равное 6, обеспечивает передаточное число u=12.5.
- 4. Разработана математическая модель механизма привода тягового устройства самоходного скипа, устанавливающая зависимость углового ускорения ведущего колеса тягового устройства от массы системы, угла наклона рельсового пути и приведенного момента двигателя, описываемая дифференциальным уравнением второго рода.

- 5. Теоретически установлена зависимость изменения мощности привода самоходного скипа, приходящейся на единицу перемещаемого груза, от угла наклона рельсового пути описывается квадратичной функцией. Диапазон изменения удельной мощности привода для углов наклона рельсового пути 20-50°, соответствующих области применения самоходных скипов, составляет 1,1-2,5 кВт/т.
- 6. Экспериментально подтверждено, что зависимость изменения полезной мощности привода самоходного скипа, приходящейся на единицу перемещаемого груза, от угла наклона рельсового пути описывается квадратичной функцией. Величина удельной мощности привода самоходного скипа не зависит от массы перемещаемого груза и составляет: для угла $20^{\circ} 8.6 \times 10^{-4} \text{ кВт/кг}$, для угла $30^{\circ} 11.2 \times 10^{-4} \text{ кВт/кг}$, для угла $40^{\circ} 12.4 \times 10^{-4} \text{ кВт/кг}$.
- 7. Установлены конструктивные и силовые параметры тягового фрикционного привода наклонного самоходного скипа.
- 8. Научные положения диссертации и технические разработки обеспечивают дальнейшее развитие теории и технологии горных работ. Диссертационное исследование может получить продолжение при совершенствовании существующих методов разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом.
- 9. Основные результаты исследований могут быть использованы научными, проектными и производственными организациями при проектировании наклонных скиповых подъемников, способных перемещаться без ограничений по углам наклона рельсового пути.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. Тимофеев, И.П. Особенности работы тягового устройства на криволинейных участках рельсового пути / И.П. Тимофеев, А.В. Большунов, М.С. Столярова, **А.М. Авдеев.** – Текст : непосредственный. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – Москва : 2019. — №1. – С. 171-178.

Timofeev, I. Features of pulling equipment operation in curved railroad sections/ I. Timofeev, A. Bolshunov, M. Stolyarova, **A. Avdeev.** // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2019. – pp. 171-178 (Scopus).

2. Авдеев, А.М. Анализ кинематических схем тягового

устройства фрикционного привода скипового подъемника / А.М. Авдеев. — Текст : непосредственный. // Строительные и дорожные машины (научно-технический и производственный журнал). — Москва : -2019. — $Noldsymbol{0}$ 10. — С. 37-40.

В издании, индексированном в международной базе данных и системе цитирования Scopus:

3. Timofeev, I. Justification of Lever Arrangement Parameters for Friction-Type Traction Gear / I. Timofeev, A. Bolshunov, A. Avdeev. // Procedia Engineering. – 2016. – № 150. – pp. 1329–1334.

В прочих изданиях:

4. Тимофеев, И.П. Влияние угла наклона рельсового пути на мощность привода фрикционного тягового устройства / И.П. Тимофеев, **А.М. Авдеев.** — Текст: непосредственный // Инновации на транспорте и в машиностроении. Материалы 4 Международной научно-практической конференции. — 2016. — С. 119—121.

Патенты на полезную модель:

- 5. Патент № 165910 Российская Федерация, МПК В61С 15/00 (2006.01). Регулируемое тяговое устройство : № 2016114592 : заявл. 14.04.2016 : опубл. 10.11.2016 / Тимофеев И.П., Соколова Г.В., Колтон Г.А., Большунов А.В., **Авдеев А.М.,** Столярова М.С. ; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. 9 с. : ил. Текст : непосредственный.
- 6. Патент № 185909 Российская Федерация, МПК В61С 13/08 (2006.01). Тяговое устройство : № 2018115496 : заявл. 24.04.2018 : опубл. 24.12.2018 / Тимофеев И.П., Габов В.В., **Авдеев А.М.** ; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. -6 с. : ил. Текст : непосредственный.

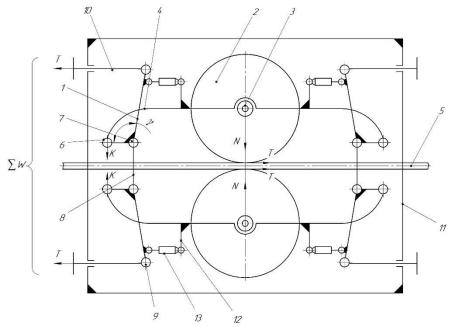


Рисунок 1 – Схема привода самоходного скипа

1 – угловой рычаг, 2 – ведущее колесо, 3 – подшипник, 4 – прямой рычаг, 5 – рельс, 6, 7, 9 – шарниры, 8 – хомут, 10 – тяга, 11 – рама скипа, 12 – кронштейн, 13 – устройство предварительного затяга, K – усилие, приложенное к прямому рычагу, N – давление ведшего колеса на рельс, T – касательная реакция рельса, $\sum W$ – суммарное сопротивление, γ – угол между длинным и коротким плечами углового рычага.

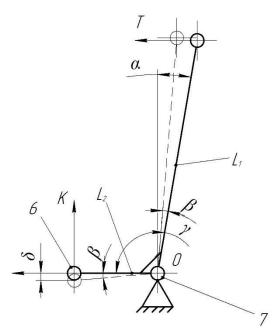


Рисунок 5 — Схема сил, действующих на угловой рычаг L_1, L_2 — плечи углового рычага; α — угол отклонения плеча L_1 углового рычага от вертикали; K — усилие, приложенное к прямому рычагу; T — касательная реакция рельса, 6,7 — шарниры; γ — угол между длинным и коротким плечами углового рычага; β — угол поворота углового рычага в результате износа; δ — величина перемещения шарнира δ в результате поворота углового рычага.

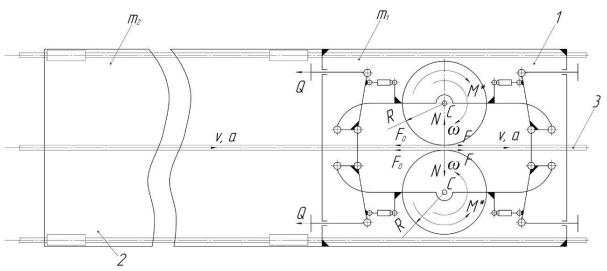


Рисунок 7 – Схема к составлению динамической модели самоходного скипа

1 – тяговое устройство; 2 – скип; 3 – тяговый рельс;

 m_1 — масса тягового устройства, включая массы колес;

 m_2 – масса вагонетки с грузом;

v – линейная скорость поступательного движения системы;

а – линейное ускорение поступательного движения системы;

ω – угловая скорость ведущего колеса;

F – сила сцепления ведущего колеса с рельсом;

R — радиус ведущего колеса;

N — нормальное давление ведущего колеса на рельс;

 M^* – приведенный к ведущему колесу момент двигателя.