

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Игнаткина Евгения Леонидовна

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ ШАХТНЫХ ПОДВЕСНЫХ
МОНОРЕЛЬСОВЫХ ДОРОГ**

Специальность 05.05.06 – Горные машины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2021

Работа выполнена в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» на кафедре «Транспортные системы и логистика им. И. Г. Штокмана», г. Донецк

Научный
руководитель:

Гутаревич Виктор Олегович,
доктор технических наук, доцент
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
заведующий кафедрой «Транспортные системы и логистика им. И. Г. Штокмана» (г. Донецк)

Официальные
оппоненты:

Корнеев Сергей Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования ЛНР «Донбасский государственный технический институт», заведующий кафедрой «Горная энергомеханика и оборудовани» (г. Алчевск)

Паламарчук Николай Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
Государственная образовательная организация высшего профессионального образования «Донецкий институт железнодорожного транспорта», заведующий кафедрой «Подвижной состав железных дорог» (г. Донецк)

Ведущая
организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачёва» (г. Кемерово)

Защита состоится «10» февраля 2022 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.008.01 при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: ул. Артема, 58, г. Донецк, 283001, ДНР, I-й учебный корпус, ауд. 1203. Тел. / факс: +38 (062) 304-30-55, e-mail: uchensovet@donntu.org

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: ул. Артема, 58, г. Донецк, 283001, II-й учебный корпус, адрес сайта университета <http://donntu.org>.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.008.01,
доктор технических наук, доцент



И.А. Бершадский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные шахтные подвесные монорельсовые дороги (далее – ШПМД) осуществляют перевозку вспомогательных грузов и людей по разветвленным подземным выработкам горных предприятий со знакопеременным профилем и углами наклона до 30 градусов. Существующие технологии применения монорельсового транспорта ориентированы на перевозку оборудования очистных механизированных комплексов и позволяют сократить время монтажа добычных лав, а также время на доставку рабочих к непосредственному месту их работы.

Эффективность функционирования ШПМД в значительной степени обусловлена параметрами тормозных устройств, подвижного состава (далее – ПС) и монорельсового пути (далее – МП). Длительный опыт эксплуатации ШПМД на угольных шахтах показал недостаточную их эффективность торможения в выработках со значительными уклонами. Как правило, их область использования ограничивается углами до 12 градусов. Эксплуатационные характеристики (силы тяги и торможения, динамическая нагрузка на ПС и МП, устойчивость и безопасность движения) в значительной мере зависят от системы торможения, являющейся наименее долговечным узлом.

Во время торможения ПС возникают переходные процессы, которые приводят к дополнительным динамическим нагрузкам, воздействующим на МП и крепь горных выработок, что снижает эффективность торможения и безопасность эксплуатации ШПМД.

Таким образом, **актуальная научная задача**, имеющая важное хозяйственное значение, состоит в необходимости повышения эффективности торможения шахтных подвесных монорельсовых дорог, снижения динамических нагрузок на монорельсовый путь, элементы подвижного состава и крепь горных выработок, совершенствования конструкции параметров тормозных устройств.

Степень разработанности темы. Проблемы создания и совершенствования монорельсового транспорта нашли широкое отображение в работах многих ученых. Большой вклад в развитие теории монорельсового транспорта внесли ученые: В.С. Берснев, В.Н. Григорьев, А.И. Дукельский, И.И. Иванченко, М.А. Котов, Е.Е. Новиков, О.С. Петренко, П.С. Шахтарь, Л.Н. Ширин и И.Г. Штокман. Теоретическое обоснование параметров конструкции ШПМД выполнено учеными: А.С. Веткиным, В.А. Еременко, И.П. Киселевым, В.М. Мерецким, П.Е. Мерзляковым, А.Г. Степановым, В.М. Тарасовым, А.А. Ткаченко, А.Е. Хлусовым, М.В. Чашко, Я.В. Шукиным, В. Besa, Е.К. Chanda, M. Naeimi, I. Ristović, J. Tokarczyk, N.S. Trahair.

Исследования, направленные на установление нагрузок на крепь горных выработок, вызванных работой ШПМД, приведены в работах Е.В. Кузнецова, В.Р. Ногих и В.А. Расцветаева. Установлением закономерностей динамических процессов, формирующихся во время движения ШПМД, занимались: Л.И. Айзеншток, Г.Д. Буялич, В.О. Гутаревич, Л.Г. Желтухин, А.И. Кравцов, Л.Г. Лобас, М. Grujić, M. Kawatani, C.W. Kim, Y. Kobayashi, C.H. Lee, N. Nishimura.

Несмотря на значительный объем научных работ, направленных на совершенствование ШПМД, исследованию и обоснованию параметров тормозных систем уделено недостаточно внимания. Современные методики расчета их параметров не позволяют количественно установить влияние динамических характеристик ПС и МП на процессы торможения ШПМД.

В настоящее время практически не нашли отражения вопросы, связанные с установлением влияния параметров ПС и МП на динамические процессы торможения ШПМД. Также не представляется возможным дать рекомендации по обоснованию параметров тормозных устройств и средств снижения динамических нагрузок, формирующихся во время остановки ПС и передающихся на подвесной МП, а также крепь горной выработки. В связи с этим проводимые исследования являются актуальными.

Цель и задачи исследований. Цель работы – повышение эффективности торможения шахтных подвесных монорельсовых дорог за счет снижения динамических нагрузок на основе совершенствования конструкции и обоснования параметров тормозных устройств.

Указанная цель достигается за счет решения следующих задач:

1. Выполнить анализ проблем, связанных с повышением эффективности торможения ПС ШПМД.
2. Составить математическое описание процесса торможения ПС и исследовать динамические характеристики ШПМД.
3. Провести экспериментальные исследования тормозных устройств шахтных подвесных монорельсовых дорог.
4. Разработать рекомендации для снижения динамических нагрузок, возникающих во время торможения ШПМД, воздействующих на ПС, МП и крепь горной выработки.

Идея работы заключается в обосновании параметров и совершенствовании конструкции тормозных устройств, обеспечивающих снижение динамических нагрузок, возникающих во время торможения ПС по монорельсу и передающихся на крепь горных выработок.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются процессы взаимодействия подвижного состава с монорельсом, возникающие во время торможения подвесной монорельсовой дороги, а предметом – функциональная связь между конструктивными особенностями тормозных устройств подвесной монорельсовой дороги и динамическими нагрузками, которые воздействуют на подвижной состав, монорельс и крепь горной выработки.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- впервые разработана математическая модель процесса торможения подвижного состава шахтной подвесной монорельсовой дороги, отличающаяся от известных учетом зазоров в сцепках между подвижными единицами состава, а также зависимости формирования тормозной силы в функции времени торможения, что позволяет уточнить границы изменения тормозного пути и диапазон изменения динамических нагрузок;

- впервые установлены закономерности формирования динамических нагрузок на крепь горных выработок, возникающих во время торможения подвижного состава шахтной подвесной монорельсовой дороги, представленные функциональными зависимостями, учитывающими параметры смещения монорельсового пути, что позволяет установить рациональные схемы подвески монорельса к арочной крепи;

- впервые теоретически обоснован метод комплексного представления динамических параметров структурных компонентов шахтной подвесной монорельсовой дороги при исследовании их реакции на возмущающие воздействия, что позволило обосновать необходимость введения в конструкцию подвижного состава упруго-демпфирующих элементов и за счет этого снизить максимальные динамические нагрузки на подвижной состав, монорельсовый путь и крепь горной выработки не менее, чем на 30%.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается в установлении закономерностей протекания динамических процессов ШПМД, а также их влияние на формирование динамических нагрузок на ПС, подвеску МП и крепь горной выработки.

Практическая значимость выводов и рекомендаций, полученных в диссертации, заключается в разработке методики расчета тормозных устройств для ШПМД и в разработке рекомендаций по снижению динамических нагрузок на ПС, подвеску МП и крепь горной выработки, формирующихся во время торможения.

Новизна и практическая значимость работы подтверждается полученным патентом на изобретение RU 2748829 С1 от 31.05.2021 г. «Шахтная монорельсовая дорога».

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы использован комплексный метод, включающий анализ и обобщение ранее проведенных исследований других авторов и опыта создания подвесных монорельсовых дорог; математическое и физическое моделирование; экспериментальные лабораторные исследования и шахтные инструментальные наблюдения; методы математической статистики для обработки экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту:

- установлены закономерности формирования динамических нагрузок в сцепках, на ПС, подвеску МП и крепь горной выработки, учитывающие зазоры в сцепках и определены границы изменения коэффициентов жесткости, от 1000 кН/м до 3000 кН/м, и демпфирования, от 2 кН·с/м до 10 кН·с/м, при которых динамические нагрузки снижаются более, чем на 30%;

- в режиме торможения ПС ШПМД в подвесах МП возникают дополнительные динамические усилия, которые увеличивают нагрузку на подвес в 1,8...2,0 раза, что определяет выбор нагрузочной способности элементов конструкции ШПМД и крепи горной выработки;

- базовые принципы синтеза тормозных устройств ШПМД, позволяющие установить наименьшее время срабатывания устройства в зависимости от его силовых и кинематических характеристик: рациональная скорость

перемещения колодок составляет 0,4...0,6 м/с, что обеспечивает требуемое время срабатывания 0,1...0,2 с.

Степень достоверности и апробация результатов. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается методологической базой исследований, основанной на фундаментальных положениях теоретической механики и математического моделирования, проверкой адекватности построенных моделей и совпадением полученных результатов исследований с результатами экспериментальных исследований других авторов. Отклонения теоретических результатов моделирования от экспериментальных, полученных на основании опытных поездок в шахте, при доверительной вероятности 0,95, для тормозного пути не превысили 6 %, а углов отклонения подвешенного груза от вертикали – 9 %.

Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и ее реализации, цели и задач работы, выборе методов и направлений исследований, выполнении теоретических, аналитических и экспериментальных исследований, разработке положений и методических рекомендаций по использованию результатов работы, а также их внедрению.

Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и получили позитивную оценку на международных научно-практических конференциях: «Неделя горняка» (Москва, 2016); «Горная электромеханика и автоматика» (Донецк, 2017); «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, 2017, 2018, 2021); «Инновационные перспективы Донбасса» (Донецк, 2018, 2020); «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (Алчевск, 2018), «Проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2018) и «Earth Science» (Владивосток, 2021).

Основные положения и результаты диссертации, полученные автором, доведены до уровня методических и практических разработок, направленных на улучшение свойств торможения ПС ШПМД. Подтверждением практического значения полученных результатов является использование ГБУ «Донуглемаш» методики расчета тормозных устройств шахтных подвесных монорельсовых дорог.

Полученные в ходе выполнения диссертационных исследований результаты использованы в учебном процессе ГОУВПО «ДОННТУ» для студентов по специальности «Горное дело» специализации «Транспортные системы горного производства», а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «КамчатГТУ» для студентов направления «Технологические машины и оборудование» профиля «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов».

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 18 работах, из которых 5 – в рецензируемых изданиях ВАК, 10 – по материалам конференций, 1 патент РФ на изобретение, 2 статьи в других изданиях.

Диссертационная работа содержит 150 страниц машинописного текста, состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных литературных источников из 191 наименования и 5 приложений. Основной

текст работы, изложенный на 107 страницах, иллюстрируется 50 рисунками и содержит 15 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены сведения об апробации результатов и публикациях основных положений работы.

В **первой главе** приведены общие сведения о ШПМД; приведены их характеристики, классификация и конструктивные особенности; выполнен анализ работ по исследованиям монорельсового транспорта для горных предприятий, аналитический обзор систем торможения монорельсовых дорог и научно-исследовательских работ по их совершенствованию; сформулированы цели и задачи исследования, а также идея работы.

Из проведенного обзора литературных источников следует: конструкция тормозных устройств для ШПМД и их условия эксплуатации имеют ряд отличий от других горнотранспортных машин; математическое описание процессов, возникающих во время торможения ШПМД, не позволяет производить оценку динамических нагрузок в сцепках ПС с зазорами.

На основании этого для достижения указанной цели работы – повышение эффективности торможения ШПМД за счет снижения динамических нагрузок на основе совершенствования конструкции и обоснования параметров тормозных устройств, целесообразно решить следующие задачи: выполнить анализ проблем, связанных с повышением эффективности торможения ПС ШПМД; составить математическое описание процесса торможения ПС и исследовать динамические характеристики ШПМД; провести экспериментальные исследования тормозных устройств ШПМД; разработать рекомендации для снижения динамических нагрузок, возникающих во время торможения ШПМД, воздействующих на ПС, МП и крепь горной выработки.

Во **второй главе** изложены общие подходы к формированию процесса торможения ШПМД, разработана математическая модель торможения ПС, проведено моделирование и анализ процесса торможения ПС, исследован процесс формирования динамических нагрузок на крепь горных выработок во время торможения. Установлено, что ПС и МП образуют сложные динамические системы, что приводит во время движения к формированию сложных колебаний, которые возможно рассматривать обособленно, разделяя колебания тележек и подвесной части ПС относительно МП и колебания подвесного МП и тележек относительно продольной оси выработки.

На рис. 1 представлена расчетная схема торможения ПС ШПМД как системы жестких тел, связанных между собой упругими и демпфирующими связями, имеющими линейные характеристики.

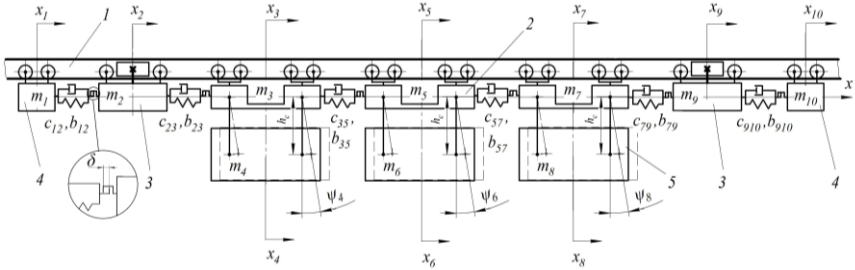


Рисунок 1 – Расчетная схема торможения ПС ШПМД:

1 – монорельсовый путь; 2 – ходовая тележка; 3 – тяговая тележка;
4 – тормозная тележка; 5 – перевозимый груз; δ – зазор в сцепке

На основании расчетной схемы (см. рис. 1) составлена математическая модель торможения ШПМД, учитывающая зазоры δ в сцепках ПС:

$$\begin{cases}
 m_1 \ddot{x}_1 = -T_{q1} - [c_{12}(x_1 - x_2) + b_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)]\sigma_0(-x_1 + x_2) - [c_{12}(x_1 - x_2 + \delta) + \\
 + b_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)]\sigma_0[-x_1 + x_2 + \delta]; \\
 m_2 \ddot{x}_2 = F_{t2} + [c_{12}(x_1 - x_2) + b_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)]\sigma_0(-x_1 + x_2) + [c_{12}(x_1 - x_2 + \delta) + \\
 + b_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)]\sigma_0[-x_1 + x_2 + \delta] - [c_{23}(x_2 - x_3) + b_{23}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3)]\sigma_0(-x_2 + x_3) - \\
 - [c_{23}(x_2 - x_3 + \delta) + b_{23}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3)]\sigma_0[-x_2 + x_3 + \delta] - gm_2 \omega' \text{sign} \dot{x}_2; \\
 m_3 \ddot{x}_3 = [c_{23}(x_2 - x_3) + b_{23}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3)]\sigma_0(-x_2 + x_3) + [c_{23}(x_2 - x_3 + \delta) + \\
 + b_{23}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3)]\sigma_0[-x_2 + x_3 + \delta] - [c_{35}(x_3 - x_5) + b_{35}(\dot{x}_3 - \dot{x}_5)]\sigma_0(-x_3 + x_5) - \\
 - [c_{35}(x_3 - x_5 + \delta) + b_{35}(\dot{x}_3 - \dot{x}_5)]\sigma_0[-x_3 + x_5 + \delta] - g(m_3 + m_4) \omega' \text{sign} \dot{x}_3; \\
 \ddot{x}_4 = g(x_3 - x_4) / h_{34}; \\
 m_5 \ddot{x}_5 = [c_{35}(x_3 - x_5) + b_{35}(\dot{x}_3 - \dot{x}_5)]\sigma_0(-x_3 + x_5) + [c_{35}(x_3 - x_5 + \delta) + \\
 + b_{35}(\dot{x}_3 - \dot{x}_5)]\sigma_0[-x_3 + x_5 + \delta] - [c_{57}(x_5 - x_7) + b_{57}(\dot{x}_5 - \dot{x}_7)]\sigma_0(-x_5 + x_7) - \\
 - [c_{57}(x_5 - x_7 + \delta) + b_{57}(\dot{x}_5 - \dot{x}_7)]\sigma_0[-x_5 + x_7 + \delta] - g(m_5 + m_6) \omega' \text{sign} \dot{x}_5; \\
 \ddot{x}_6 = g(x_5 - x_6) / h_{56}; \\
 m_7 \ddot{x}_7 = [c_{57}(x_5 - x_7) + b_{57}(\dot{x}_5 - \dot{x}_7)]\sigma_0(-x_5 + x_7) + [c_{57}(x_5 - x_7 + \delta) + \\
 + b_{57}(\dot{x}_5 - \dot{x}_7)]\sigma_0[-x_5 + x_7 + \delta] - [c_{79}(x_7 - x_9) + b_{79}(\dot{x}_7 - \dot{x}_9)]\sigma_0(-x_7 + x_9) - \\
 - [c_{79}(x_7 - x_9 + \delta) + b_{79}(\dot{x}_7 - \dot{x}_9)]\sigma_0[-x_7 + x_9 + \delta] - g(m_7 + m_8) \omega' \text{sign} \dot{x}_7; \\
 \ddot{x}_8 = g(x_7 - x_8) / h_{78}; \\
 m_9 \ddot{x}_9 = F_{t9} + [c_{79}(x_7 - x_9) + b_{79}(\dot{x}_7 - \dot{x}_9)]\sigma_0(-x_7 + x_9) + [c_{79}(x_7 - x_9 + \delta) + \\
 + b_{79}(\dot{x}_7 - \dot{x}_9)]\sigma_0[-x_7 + x_9 + \delta] - [c_{910}(x_9 - x_{10}) + b_{910}(\dot{x}_9 - \dot{x}_{10})]\sigma_0(-x_9 + x_{10}) - \\
 - [c_{910}(x_9 - x_{10} + \delta) + b_{910}(\dot{x}_9 - \dot{x}_{10})]\sigma_0[-x_9 + x_{10} + \delta] - gm_9 \omega' \text{sign} \dot{x}_9; \\
 m_{10} \ddot{x}_{10} = -T_{q10} + [c_{910}(x_9 - x_{10}) + b_{910}(\dot{x}_9 - \dot{x}_{10})]\sigma_0(-x_9 + x_{10}) + \\
 + [c_{910}(x_9 - x_{10} + \delta) + b_{910}(\dot{x}_9 - \dot{x}_{10})]\sigma_0[-x_9 + x_{10} + \delta] - gm_{10} \omega' \text{sign} \dot{x}_{10}.
 \end{cases}$$

где m_1, m_{10} – приведенные массы тормозных тележек с кабинами управления; m_2, m_9 – приведенные массы тяговых устройств; m_3, m_5, m_7 – массы ходовых тележек с приведенной массой частью сцепки; m_4, m_6, m_8 – приведенные массы подвесных элементов подвижного состава с учетом приведенной массы груза; x_1, x_2, \dots, x_{10} – координаты перемещения центров тяжести перевозимых масс; h_{34}, h_{56}, h_{78} – расстояния между точкой подвеса груза и его центром тяжести соответственно; $c_{12}, c_{23}, c_{35}c_{57}, c_{79}$ и c_{910} – коэффициенты жесткости сцепок, для стыкуемых между собой тележек; $b_{12}, b_{23}, b_{35}, b_{57}, b_{79}$ и b_{910} – коэффициенты демпфирования сцепок, соответственно; F_{12}, F_{19}, T_{q1} и T_{q10} – тормозные силы, создаваемые тяговыми и тормозными тележками, соответственно; ψ_4, ψ_6, ψ_8 – углы отклонения подвешенного груза от вертикали; ω' – коэффициент сопротивления движению подвижного состава; σ_0 – единичная функция.

В процессе эксплуатации ШПМД значения зазоров могут изменяться и составлять более 0,1 мм. В общем случае этот параметр определяется конструкцией сцепок и зависит от степени изношенности элементов их соединений. На практике не исключены нарушения конструкции, когда зазор в сцепке может составлять 10 мм и более.

Математическое моделирование движения ШПМД позволяет обоснованно устанавливать параметры устройств, обеспечивающих эффективное торможение подвижного состава, а, следовательно, и безопасную эксплуатацию монорельсового транспорта в подземных условиях.

Исходные данные для моделирования режима торможения ШПМД: массы $m_1 = m_{10} = 0,2$ т; $m_2 = m_9 = 4$ т; $m_3 = m_5 = m_7 = 2$ т; $m_4 = m_6 = m_8 = 8$ т; коэффициенты жесткости сцепок $c_{ij} = 2000$ кН/м; коэффициенты демпфирования сцепок $b_{ij} = 5$ кН·с/м; расстояние между центрами масс тележек и перевозимых грузов $h_{ij} = 1$ м. Начальная скорость движения подвижного состава принималась 3,5 м/с; величина зазора в сцепках $\delta = 0,01$ м; значение тормозного усилия подвижного состава принято 100 кН, тормозная сила изменяется по зависимости $T_{qi} = T_{max}(1 - e^{-\varepsilon t})$, где T_{max} – максимальное усилие; ε – коэффициент нарастания силы торможения, торможение осуществляется передней и задней тормозными тележками (поз. 4 на рис. 1).

В качестве параметров, характеризующих процесс торможения ШПМД, используются: фазовые диаграммы колебаний, характеризующие изменение скорости движения единиц ПС в зависимости от изменения их координат; графики изменения координат единиц ПС в зависимости от времени торможения; зависимость усилия в сцепках от времени торможения; зависимость угла отклонения подвешенного груза от времени торможения.

На рис. 2, а представлены фазовые диаграммы для случая, когда зазор $\delta_1 = 0$ мм, на рис. 2, б – $\delta_2 = 10$ мм. Анализируя эти рисунки можно сделать вывод, что наличие зазоров в сцепках оказывает негативное влияние на характер изменения скорости движения тележек. Увеличение зазора до 10 мм привело к увеличению амплитуды первого колебания первой тормозной тележки на 35% – с 2,8 м/с до 3,8 м/с.

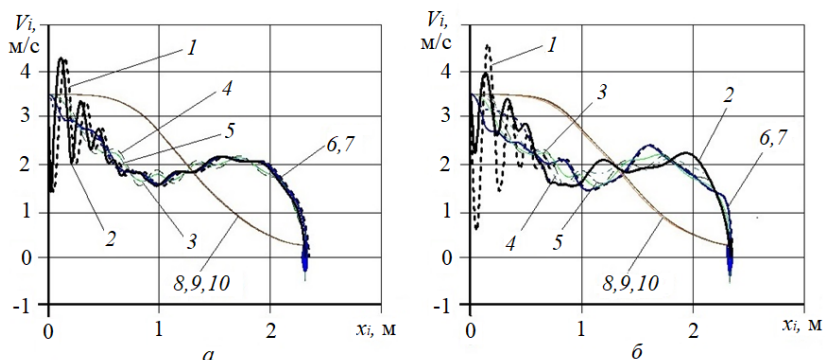


Рисунок 2 – Фазовые диаграммы изменения скорости единиц ПС в зависимости от перемещения при зазоре в сцепках $\delta_1 = 0$ мм (а) и $\delta_2 = 10$ мм (б):

1, 2 – передняя и задняя тормозные тележки; 3, 4, 5 – ходовые тележки; 6, 7 – передняя и задняя тяговые тележки; 8, 9, 10 – подвесные единицы

На рис. 3 показаны графики зависимостей углов отклонения подвешенного груза от времени торможения для случаев, когда $\delta_1 = 0$ мм (рис. 3, а) и $\delta_2 = 10$ мм (рис. 3, б).

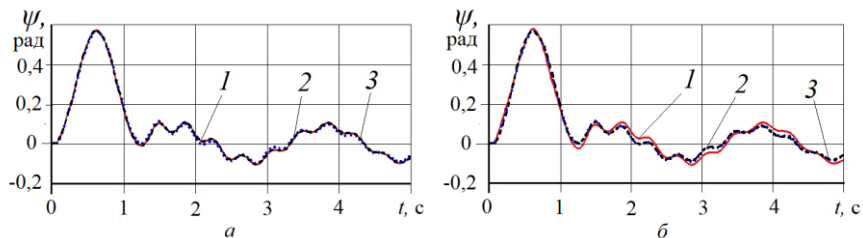


Рисунок 3– Графики изменения углов отклонения подвесных единиц от времени торможения при зазоре в сцепках ПС $\delta_1 = 0$ мм (а) и $\delta_2 = 10$ мм (б):

1, 2, 3 – подвесные единицы

Графики на рис. 3 показывают, что наличие зазора в сцепках приводит к несовпадению колебаний подвесных единиц, при зазоре в 10 мм отклонение в амплитуде возрастает до $2,5^\circ$.

На рис. 4 приведены графики зависимостей усилий в сцепках от времени торможения. Усилия, возникающие в сцепках, при наличии в них зазора, увеличиваются. Так, при зазоре 10 мм усилие на первой сцепке (кривая 1) возросло на 47% (с 75 кН до 110 кН), при этом в последней сцепке (кривая 2) усилие уменьшилось на 40% (с 75 кН до 45 кН). Появление зазоров приводит к неравномерности распределения усилий в начале и конце ПС. При отсутствии зазоров возникающие во время торможения динамиче-

ские нагрузки распределяются равномерно в начале и в конце ПС и не превышают 75 кН.

Наличие зазора в сцепке ухудшает динамику торможения и приводит к увеличению усилий и колебательных процессов, что подтверждает необходимость учета зазора в сцепках ПС при исследовании процесса торможения ШПМД.

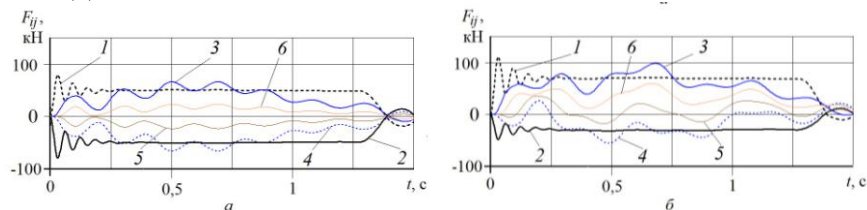


Рисунок 4 – Графики изменения усилий в сцепках от времени торможения при зазоре в сцепках ПС $\delta_1 = 0$ мм (а) и $\delta_2 = 10$ мм (б):

1, 2 – сцепки между тормозной и тяговой тележками соответственно передними и задними; 3, 4 – сцепки между тяговой и ходовой тележками соответственно передними и задними; 5, 6 – сцепки между ходовыми тележками

Были проведены исследования влияния скорости, жесткости и демпфирующих свойств сцепок состава ШПМД, а также места приложения тормозных сил на параметры процесса торможения.

С увеличением начальной скорости торможения от 2,5 м/с до 3,5 м/с тормозной путь увеличивается в 2 раза – с 1,2 м до 2,4 м. Увеличение начальной скорости торможения практически не влияет на амплитуду колебаний подвесных единиц в начале торможения и составляет 0,58 рад. Однако, в дальнейшем амплитуды колебаний уменьшаются с 0,2 рад до 0,1 рад.

Увеличение коэффициента жесткости от 1000 кН/м до 3000 кН/м приводит к росту амплитуды колебаний скорости последней тормозной тележки в 2,2 раза (с 2,2 м/с до 1,0 м/с) и к повышению усилия в сцепках, в частности в первой сцепке с 90 кН до 125 кН.

С увеличением коэффициента демпфирования от 2 кН·с/м до 10 кН·с/м происходит уменьшение амплитуд колебательных процессов. Особенно это относится к передней и задней тормозным тележкам, когда в начале процесса торможения амплитуда колебания первой тележки уменьшается с 5 м/с до 3,8 м/с (на 32%). При этом во всех сцепках происходит снижение усилия, например, на первой наблюдается снижение значений с 120 кН до 100 кН. Увеличение коэффициента демпфирования сцепки в целом оказывает благоприятное влияние на динамику торможения ПС ШПМД.

При исследовании торможения только одной тележкой (передней или задней), тремя и всеми семью тележками было установлено, что торможение всеми тележками является наиболее благоприятным с точки зрения динамических нагрузок на ШПМД и крепь, поскольку из-за уменьшения коле-

бательных процессов торможение происходит более плавно. Снижение необходимого тормозного усилия на одной тележке приводит к уменьшению динамических усилий в сцепках. По сравнению с самым неблагоприятным вариантом, когда торможение производится только передней тележкой, было получено: амплитуда колебаний скорости уменьшилась в 2,2 раза (с 4,2 м/с до 1,9 м/с), усилие в сцепках уменьшилось в 3,3 раза (от 180 кН до 55 кН); амплитуда колебаний подвесных грузов после остановки ПС уменьшилась в 5 раз (с 0,2 рад до 0,04 рад).

Для снижения динамических усилий в сцепках целесообразно выполнять распределенную тормозную систему и располагать тормозные устройства на каждой ходовой тележке. Указанное конструктивное исполнение позволит исключить самопроизвольное скатывание подвижных единиц на наклонных участках МП, что позволит повысить безопасность эксплуатации ШПМД. С точки зрения соотношения эффективности торможения и стоимости ШПМД часто используется вариант с двумя тормозными тележками – передней и задней.

Для определения динамических усилий в подвесах МП была рассмотрена подсистема, представленная на рис. 5, где секция МП и находящиеся на ней во время торможения подвижные единицы ШПМД представляют собой единую механическую систему (далее – ЕМС).

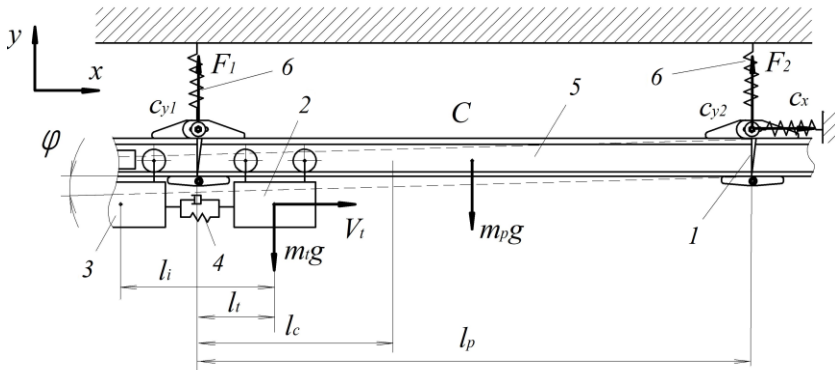


Рисунок 5 – Расчетная схема сил, действующих при торможении ПС на МП:
 1 – стык секций; 2 – тормозная тележка; 3 – тяговая тележка; 4 – сцепка;
 5 – секция МП; 6 – подвесы

На основании представленной на рис. 5 схемы составлены уравнения, с помощью которых можно исследовать воздействие возникающих при торможении ШПМД динамических нагрузок на подвеску МП и крепь горной выработки:

$$\begin{cases} M\ddot{x}_c + c_x x_c = 0; \\ M\ddot{y}_c + c_{y1}(y_c + \phi l_c) + c_{y2}(y_c - \phi(l-l_c)) = Mg; \\ M\ddot{\phi} + c_{y1}(y_c + \phi l_c)l_c - c_{y2}(y_c - \phi(l-l_c))(l-l_c) = 0. \end{cases}$$

где M – масса системы; где \ddot{x}_c , \ddot{y}_c – проекции вектора ускорений центра масс ЭМС на координатные оси; l , l_c – длина секции МП и расстояние до центра масс ЭМС; c_y , c_x – коэффициенты поперечной и продольной жесткости; y_c , ϕ – вертикальное перемещение центра масс и угол поворота ЭМС.

Возможны два случая при торможении: первый – на секции находятся тормозная тележка и кабина машиниста; второй – тормозная и тяговая тележки. На рис. 6 приведены результаты для второго случая.

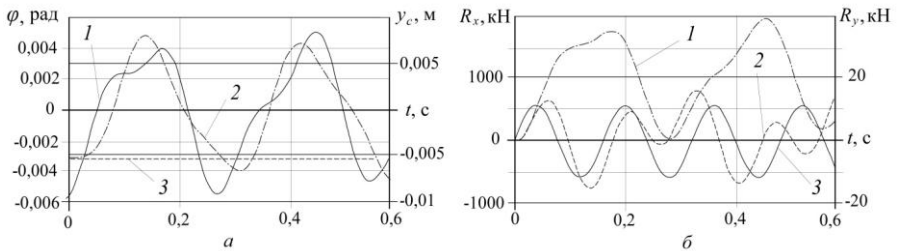


Рисунок 6 – Графические зависимости параметров ЭМС от времени торможения t :

a – изменение координат ЭМС; b – изменение реакций в подвесах МП

На рис. 6, a приняты следующие зависимости от времени t : 1 – вертикального перемещения центра масс ЭМС y_c ; 2 – угла отклонения системы ϕ ; 3 – статического положения ЭМС; на рис. 6, b : 1 – вертикальной реакции в первом подвесе R_{y1} ; 2 – вертикальной реакции во втором подвесе R_{y2} ; 3 – продольной реакции R_x .

Во втором случае значение вертикальных перемещений ЭМС увеличивается в 2,7 раз, достигая значения 0,008 м. Начало затухания вертикальных колебаний наблюдается, когда время торможения достигает 0,5 с, тогда как в первом варианте – 0,1 с. Максимальное значение угла поворота ϕ для второго случая также увеличивается по сравнению с первым и составляет 0,005 рад. Максимальное значение реакции подвесов R_y МП в начале и конце секции для второго варианта увеличиваются и составляют 40 кН.

Увеличение начальной скорости торможения с 2 м/с до 3,5 м/с приводит к возрастанию R_x с 300 кН до 520 кН. Изменение продольной жесткости системы оказывает влияние на продольную реакцию ЭМС. При увеличении c_x в 10 раз, значение R_x увеличивается в 3 раза, частота колебаний продольной реакции в этом случае увеличивается также в 3 раза. Увеличение c_y в 10

раз влечет уменьшение значений перемещения в 10 раз, в 10 раз уменьшается угол поворота ЕМС, а частота поперечных колебаний увеличивается в 6 раз при увеличении поперечной жесткости в 10 раз.

Определен динамический коэффициент реакции подвеса при поперечных колебаниях ШПМД $K_y = 2$, что соответствует результатам известных динамических задач для случая внезапного приложения нагрузки.

Возникающие нагрузки на крепь горной выработки зависят от конструкции подвеса и реакций ЕМС. На рис. 7, а показаны зависимости усилий, действующих на крепь горной выработки в точках крепления подвесов, от времени при угле расположения цепей подвеса $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,5$ рад (рис. 7, б) и коэффициенте жесткости цепей – $C_1 = C_2 = C_3 = 2000$ кН/м.

При коэффициенте жесткости цепи 2000 кН/м и углах $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,5$ рад усилия на крепь составляют $N_1 = N_2 = 500$ кН, а $N_3 = 25$ кН. При увеличении коэффициента жесткости цепи до 20000 кН/м при тех же углах крепления цепей в подвеске, значения N_1 и N_2 увеличиваются в 3 раза и составляют 1500 кН, N_3 уменьшается в 5 раз.

При увеличении угла крепления цепей в 1,6 раз до 0,8 рад при коэффициенте жесткости 2000 кН/м получаем: $N_1 = N_2 = 400$ кН (в 1,2 раза меньше), а N_3 составит 8 кН, что в 2 раза меньше, чем при углах $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,5$ рад с таким же коэффициентом жесткости цепей.

Увеличение жесткости до 20000 кН/м с углами $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,8$ приводит к увеличению значений N_1 и N_2 в 3 раза – до 1250 кН, тогда как N_3 уменьшается в 4 раза и составляет 2 кН.

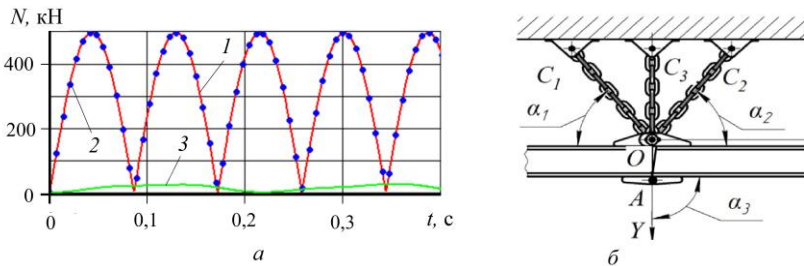


Рисунок 7 – Графические зависимости нагрузок на крепь горной выработки в местах крепления подвесов МП от времени торможения (а) и схема расположения цепей подвеса (б): 1 – $N_1 = f_1(t)$; 2 – $N_2 = f_2(t)$; 3 – $N_3 = f_3(t)$

Используя результаты теоретических исследований второго раздела было предложено и запатентовано устройство (пат. РФ от 31.05.2021 г., №RU2748829C1), которое за счет создания требуемых упруго-фрикционных свойств обеспечивает снижение динамических нагрузок на крепь горной выработки.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям, целью которых являлось получение фактических значений тормозного усилия и

коэффициента трения, развиваемых тормозным устройством с учетом состояния поверхности стенки монорельса, а также проверка адекватности математической модели процесса торможения ШПМД.

Для проведения экспериментального исследования в лабораторных условиях спроектирована и изготовлена модель тормозного устройства ШПМД, которая с комплексом измерительного оборудования устанавливалась на испытательную машину типа ГМС-50 (рис. 8).

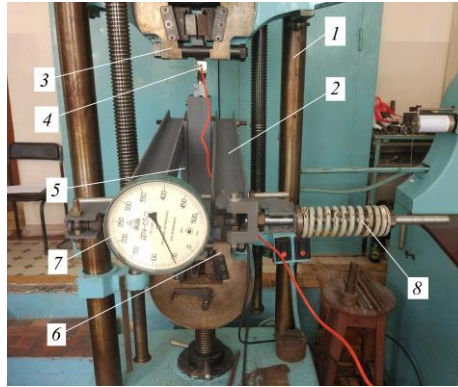


Рисунок 8 – Экспериментальная установка для исследования коэффициента трения:
 1 – испытательная машина ГМС-50; 2 – модель тормозного механизма;
 3 – верхние губки; 4 – тензометрический датчик; 5 – кронштейн; 6 – нижние губки;
 7 – стрелочный прибор; 8 – нагрузочное устройство

Для проведения замеров спланирован и проведен трехфакторный эксперимент $2 \times 2 \times 2$. В качестве факторов, значимо влияющих на коэффициент трения, выбраны: прижимная сила P , влажность поверхности трения W , загрязненность поверхности трения Q .

В результате проведения эксперимента и после соответствующей обработки данных получены экспериментальные значения коэффициентов трения между колодкой и монорельсом, приведенные в таблице.

Таблица - Коэффициенты трения колодок и монорельса

Факторы			Значение коэффициента трения, μ			
$P, \text{кН}$	W	Q	I	II	III	Среднее
10	сухая	чистая	0,52	0,53	0,53	0,53
		пыль	0,37	0,39	0,38	0,38
	мокрая	чистая	0,42	0,40	0,43	0,42
		пыль	0,26	0,26	0,27	0,26
15	сухая	чистая	0,53	0,53	0,53	0,53
		пыль	0,38	0,38	0,38	0,38
	мокрая	чистая	0,42	0,41	0,41	0,41
		пыль	0,25	0,28	0,25	0,26

С использованием разработанной экспериментальной установки исследованы переходные процессы, протекающие в тормозном устройстве. В результате проведения замеров получен график зависимости тормозной силы от времени торможения (рис. 9).



Рисунок 9 – Зависимость реализуемой тормозной силы T во времени:
 I – время срабатывания устройства; II – нарастание тормозной силы; III – установившаяся тормозная сила; IV – уменьшение тормозной силы после остановки

Искомый коэффициент нарастания тормозной силы, характеризующий крутизну нарастания кривой на II участке и входящий в формулу тормозной силы, используемой в математической модели, был определен методом наименьших квадратов и составил $\varepsilon = 0,426 \text{ с}^{-1}$.

Проверка адекватности математической модели движения ПС ШПМД при торможении осуществлялась путем проведения экспериментальных заездов на ШПМД «SCHARF», применяемой на шахте «Комсомолец Донбасса», (г. Кировское, ДНР). При этом измерялись тормозной путь и угол отклонения груза от вертикали при торможении ПС на прямом участке со скорости 1 м/с. Тормозной путь составил 0,094 м, угол отклонения $16,3^\circ$. Весовые и геометрические параметры ШПМД были заложены в математическую модель, с помощью которого были определены теоретические значения тормозного пути и угла отклонения – 0,1 м и $17,7^\circ$. Абсолютные погрешности составили 0,006 м и $1,4^\circ$; относительные погрешности – 6,4% и 8,6 %, что является допустимым.

В четвертой главе изложены особенности расчета параметров режима торможения подвижного состава, проведен синтез тормозных устройств с обоснованием их параметров, разработана методика расчета тормозных устройств ШПМД, определена эффективность предложенных рекомендаций. Проведено исследование ударного включения тормозного устройства.

Установлено, что необходимо ограничивать время включения, исходя из предотвращения возникновения высоких динамических нагрузок, которые не только могут привести к разрушению механизма, повреждению кре-

пи, но и ухудшают тормозную динамику вследствие колебаний колодки относительно монорельса. Кинематическая схема тормозного устройства представлена на рис. 10. Тормозная колодка массой m_1 перемещается поступательно на величину зазора λ . Скоба совершает мгновенно-вращательное движение, поворачиваясь на угол φ_1 относительно точки P_v , центр масс скобы перемещается на величину λ_3 . Планка совершает вращательное движение, поворачиваясь на угол φ_2 . Часть гидроцилиндра массой m_4 перемещается на величину λ_4 под действием пружины с коэффициентом жесткости c_x .

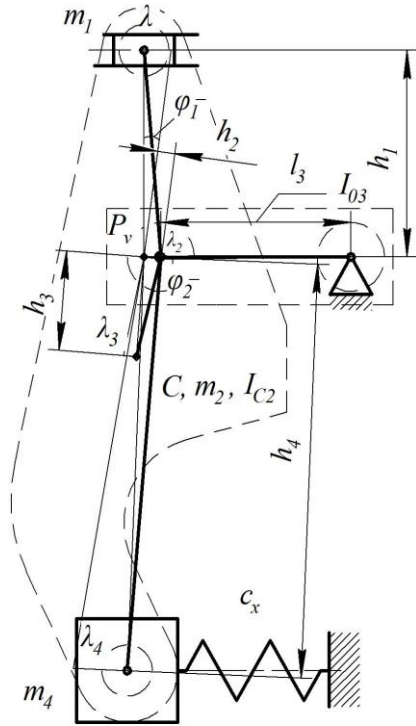


Рисунок 10 – Кинематическая схема тормозного устройства

Требуемое время и плавность включения следует регулировать силой сопротивления R_c в гидроцилиндре для ограничения скорости удара v :

$$v = \sqrt{\frac{2P_n\lambda + c_x\lambda^2\left(\frac{h_4}{h_1}\right)^2 - 2R_c\lambda\frac{h_4}{h_1}}{M_{np}}};$$

$$R_c = \frac{2P_n\lambda + c_x\lambda^2\left(\frac{h_4}{h_1}\right)^2 - M_{np}v_0^2}{2\lambda\frac{h_4}{h_1}},$$

где P_n – сила прижатия колодки; M_{np} – приведенная масса механической системы; v_0 – начальная скорость движения колодки.

Установлено, что для тормозного устройства наиболее рациональная скорость составит $v_0 = 0,5$ м/с; необходимая сила сопротивления в гидроцилиндре – $R_c = 21,9$ кН; время срабатывания – $t = 0,164$ с.

Разработанная методика расчета тормозных устройств шахтных под-

весных монорельсовых дорог принята к внедрению ГБУ «Донуглемаш»

Годовая экономическая эффективность при использовании предложенного устройства, снижающего динамические нагрузки на крепь горной выработки, повышая ее срок эксплуатации, составила не менее 12 тыс. р. на одно устройство.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований решена научно-техническая задача, имеющая важное значение для горной промышленности, заключающаяся в повышении эффективности торможения ШПМД за счет обоснования параметров и совершенствования тормозных устройств, что позволяет снизить более чем на 30% динамические нагрузки, а также уменьшить их воздействие на подвижной состав, монорельсовый путь и крепь горной выработки.

По полученным результатам диссертационной работы сформулированы основные выводы:

1. Выполнен анализ проблем, связанных с повышением эффективности торможения ПС ШПМД и установлены параметры, влияющие на работу тормозных устройств.

2. Составлена математическая модель, позволяющая исследовать динамику торможения ПС ШПМД с учетом зазоров в сцепках и определено, что возникающие в сцепках во время остановки подвижного состава массой 38,4 т продольные динамические силы могут достигать 180 кН и более, чем в 1,7 раза превышать значения прикладываемых тормозных усилий. При этом наибольший угол отклонения подвесок грузовой единицы от вертикали может составлять до 0,6 рад.

3. Исследование математической модели торможения ПС ШПМД с учетом зазоров в сцепках позволило установить, что наличие зазора в сцепке 10 мм ухудшает динамику торможения ПС ШПМД и приводит к увеличению усилий на 47%, что подтверждает необходимость учета зазора в сцепках ПС при исследовании процесса торможения ШПМД. Повышение коэффициента жесткости сцепки с 1000 кН/м до 3000 кН/м приводит к уменьшению амплитуды колебаний скорости подвижной единицы в 2,2 раза и к увеличению усилия, возникающего в сцепке при торможении в 1,4 раза. Увеличение коэффициента жесткости цепи подвеса в 10 раз увеличивает нагрузку на крепь горной выработки в 3 раза.

4. Применение тормозных устройств, устанавливаемых на каждой подвижной единице ШПМД, позволит снизить динамические нагрузки, формирующиеся во время ее торможения более, чем 2 раза.

5. На основании экспериментальных исследований определены значения коэффициентов трения колодок с вертикальными стенками монорельса, имеющими поверхностные загрязнения, а также установлен коэффициент нарастания тормозной силы, развиваемый тормозным устройством. На натурном образце в условиях шахты подтверждена адекватность математической модели торможения ШПМД. При доверительной вероятности 0,95 отклонение теоретических результатов моделирования и экспериментальных замеров тормозного пути и углов отклонения подвешенного груза от вертикали не превысило 9 %.

6. Предложены научно-обоснованные технические решения, которые позволяют снизить динамические нагрузки, возникающие во время торможения подвесной монорельсовой дороги. Представлена рациональная схема подвески МП на участке торможения ШПМД. Разработано устройство, защищенное патентом на изобретение RU 2748829 С1 от 31.05.2021 г., годовая экономическая эффективность использования которого составляет не менее 12 тыс. р. на одно устройство.

7. Полученные в диссертации результаты и разработанная методика расчета параметров тормозных устройств ШПМД, приняты ГБУ «Донуглемаш» к использованию, внедрены в учебный процесс ДонНТУ и КамчатГТУ.

8. Применение полученных результатов дает возможность повысить технический уровень шахтной подвесной монорельсовой дороги. Внедрение результатов работы имеет социальный эффект за счет повышения безопасности работы монорельсового транспорта в угольных шахтах.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Публикации в рецензируемых изданиях ВАК

1. Гутаревич, В.О. Обоснование оптимального режима пуска и торможения шахтной подвесной монорельсовой дороги / В.О. Гутаревич, **Е.Л. Игнаткина** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 9. – С. 29-36.

2. **Игнаткина, Е.Л.** Экспериментальные исследования тормозных устройств шахтных подвесных монорельсовых дорог / Е.Л. Игнаткина // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2019. – №2 (16). – С. 27-32.

3. Гутаревич, В.О. Исследование режима торможения подвижного состава шахтной подвесной монорельсовой дороги с учетом зазоров в сцепках / В.О. Гутаревич, **Е.Л. Игнаткина** // Известия вузов. Горный журнал». – 2020. – № 5. – С. 108-115.

4. Гутаревич, В.О. Снижение динамических нагрузок в сцепках подвижного состава шахтных подвесных монорельсовых дорог / В.О. Гутаревич, **Е.Л. Игнаткина** // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – №1. – С. 33-38.

5. Царенко С.Н. Определение динамических усилий в подвесах пути шахтной подвесной монорельсовой дороги / С.Н. Царенко, **Е.Л. Игнаткина**, А.В. Костенко // Известия вузов. Горный журнал. – 2021. – № 5. – С. 99-108.

Публикации по материалам конференций

6. **Ignatkina, E.L.** Research of the Rate of Changing the Mine Suspended Monorail Brakeforce When Braking / **E.L. Ignatkina**, A.V. Kostenko, S.N. Tsarenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 666, International science and technology conference «Earth science» 8-10

December 2020, Vladivostok, Russian Federation <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/2/022025>. (*Scopus*)

7. **Игнаткина, Е.Л.** Проблемы и направления совершенствования тор-мозных устройств шахтных подвесных монорельсовых дорог / Е.Л. Игнаткина // *Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XXIV международной научно-технической конференции 11-17 сентября 2017 г.* – Донецк: ДонНТУ, 2017. – С. 118-121.

8. **Игнаткина, Е.Л.** Исследование процесса торможения шахтных под-весных монорельсовых дорог для обеспечения безопасности эксплуатации / Е.Л. Игнаткина // *Проблемы недропользования (Международный форум-конкурс молодых ученых, 18-20 апреля 2018 г.): сборник научных трудов. В 2 ч.* – Санкт-Петербургский горный университет, 2018. – Ч. II. – С. 58-61.

9. **Игнаткина, Е.Л.** Математическая модель процесса торможения подвижного состава шахтной подвесной монорельсовой дороги / Е.Л. Игнаткина // *Материалы 4-й международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса», 22-25 мая 2018.* – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Т. 3. – С. 160-164.

10. **Игнаткина, Е.Л.** Моделирование процесса торможения подвесной монорельсовой дороги / **Е.Л. Игнаткина, В.О. Гутаревич, М.П. Кондратенко** // *Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XXV международной научно-технической конференции 10-16 сентября 2018 г.* – Донецк : ДонНТУ, 2018. – Т. 1. – С. 192-195.

11. **Игнаткина, Е.Л.** Моделирование продольных сил в монорельсо-вом поезде для переходных режимов движения / Е.Л. Игнаткина // *Сборник тезисов докладов 3-й международной научно-технической конференции «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства», 17 октября 2018.* – Алчевск: ДонГТУ, 2018. – С. 56-58.

12. Гутаревич, В.О. Общие логистические подходы к формированию процесса перевозки грузов подвесной монорельсовой дорогой / В.О. Гутаревич, **Е.Л. Игнаткина** // *Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: материалы международной научно-технической конференции (17-19 октября 2018 г.). В 2 ч.* – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ – 2019. – Ч. 2. – С.61-63.

13. **Игнаткина, Е.Л.** Экспериментальное определение коэффициента сцепления тормозных колодок с монорельсом шахтной подвесной дороги / Е.Л. Игнаткина, В.О. Гутаревич, М.В. Бридун // *Машиностроение и техно-сфера XXI века: сборник трудов XXVI международной научно-технической конференции 23-29 сентября 2019 г.* – Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 173-177.

14. Гутаревич, В. О. Исследование процессов торможения шахтной подвесной монорельсовой дороги / В.О. Гутаревич, **Е.Л. Игнаткина, А.В. Костенко** // *Инновационные перспективы Донбасса [Электронный ре-сурс]: материалы 6-ой международной научно-практической конференции, 26-28 мая 2020 г., г. Донецк. Т. 3: Инновационные технологии проектирова-ния, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов*

/ ГОУВПО «ДонНТУ» и др.; редкол.: М.Н. Кушаков и др. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 92-97.

15. **Игнаткина, Е.Л.** Анализ креплений подвешенного пути шахтной подвесной монорельсовой дороги / **Е.Л. Игнаткина**, А.В. Костенко // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: материалы Третьей международной научно-технической конференции (26 ноября 2020 г.). – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ – 2021. – С.83-86.

Патенты на изобретения

16. Пат. RU 2748829 С1. Российская Федерация, Шахтная монорельсовая дорога, МПК E21F 13/00, B61B 13/04, B61G 9/10. / заявители А.В. Костенко, В.О. Гутаревич, **Е.Л. Игнаткина** – патентообладатель ФГБОУВО «Камчатский государственный технический университет». – № 2020132787; заявл. 05.10.2020; опублик. 31.05.2021, Бюл. №16.

В других научных изданиях

17. **Игнаткина, Е.Л.** Динамические характеристики подвешенного пути шахтной монорельсовой дороги / Е.Л. Игнаткина // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2016. – №6 (6). – С. 3-6.

18. Гутаревич, В.О. Вертикальные возмущения шахтной подвесной монорельсовой дороги / В.О. Гутаревич, **Е.Л. Игнаткина** // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. – 2021. – №2(88). – С. 58-64.

Личный вклад автора в научных работах, опубликованных в соавторстве: [1, 6, 12, 14, 15] – подбор материала и анализ исследований; [3, 18] – постановка научной задачи и построение системы уравнений; [4, 5, 10] – подбор материала, построение системы уравнений, расчеты; [13] – разработка установки, проведение экспериментальных исследований, обработка экспериментальных данных; [16] – анализ конструкций и разработка устройства.

Подписано к печати «17» ноября 2021 г. Формат 60×84 1/16.
Усл. печ. л. 1,0. Печать лазерная. Заказ № _____. Тираж 100 экз.