ISSN 1816-4528 (Print) **ISSN 2949-0634 (Online)**

ГОРНЫЕ МАШИНЫ
MINING MACHINES

Научная статья

УДК 622.271
DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-62-72

Зерщиков Константин Юрьевич [1], Антоненков Дмитрий Васильевич [2], Сергеичев Иван Валерьевич [3], Елкин Александр Сергеевич [3]

[1] ООО «Константа-2»
[2] ООО «УК» «Сибирский Антрацит»
[3] Сколковский институт науки и технологий

[*] для корреспонденции: director@constanta-2.ru

КАБЕЛЬНЫЕ ПЕРЕЕЗДЫ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация.
В статье представлено инновационное решение для снижения затрат при эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов – кабельные переезды из полимерных композиционных материалов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью оптимизации производственных процессов в горнодобывающей промышленности и снижения себестоимости добычи полезных ископаемых. Кабельные линии, снабжающие электроэнергией разрезные комплексы, должны быть надежными и недорогими в эксплуатации. Существующие варианты подвода кабельных линий являются сложными технологически и требуют серьезных мер по обеспечению безопасности. Предлагаемый кабельный переезд для силового кабеля из полимерного износостойкого композита обеспечивает долговременную эксплуатацию, отличается высокой мобильностью, не требует применения спецтехники, в результате снижаются суммарные затраты. Но применение новой техники требует подтверждения ее эксплуатационных характеристик. Для этого был выполнен прочностной расчет методом конечных элементов в программном комплексе Abaqus секции переезда при наезде самосвала общей массой 630 т. Расчет показал, что прочность обеспечена. Учитывая циклический характер нагружения, произвели также расчет прочности исходя из условия 100000 наездов на переезд. Поскольку такое количество циклов соответствует примерно 10 годам эксплуатации, сделан вывод о возможности долговременной эксплуатации переездов. Выполнен расчет экономической эффективности применения кабельных переездов в сравнении с традиционно применяемой схемой прокладки кабелей. Таким образом, технико-экономические характеристики кабельных переездов позволяют получить существенный эффект от их применения. Научная новизна работы заключается в разработке и обосновании эффективности использования мобильных кабельных переездов из полимерных композитов взамен традиционных металлических конструкций.

CC BY

Информация о статье
Поступила:
05 февраля 2026 г.

Одобрена после рецензирования:
01 сентября 2026 г.

Принята к печати:
15 сентября 2026 г.

Ключевые слова:
экскаваторно-автомобильные комплексы, кабельные ворота, мобильный кабельный переезд, композиционный материал, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, расчет прочности, метод конечных элементов, экономическая эффективность

Для цитирования: Зерщиков К.Ю., Антоненков Д.В., Сергеичев И.В., Елкин А.С. Кабельные переезды из полимерных композиционных материалов для снижения затрат при эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов // Горное оборудование и электромеханика. 2026. № 4 (186). С. 62-72. DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-62-72, EDN: JQQGXA

Введение

Снижение себестоимости добычи полезных ископаемых является актуальной задачей, особенно в условиях воздействия на конечную стоимость продукта трудно прогнозируемых внешних факторов техногенного и политического характера, поэтому необходимо активнее внедрять организационные и технические мероприятия, направленные на решение этой задачи. Развитие и внедрение автоматизированных методов управления предприятиями, применение искусственного интеллекта и аналитических систем больших данных в технологиях и организации производства горной промышленности являются важными шагами в этом направлении [1, 3–5]. Но эти безусловно важные элементы цифровой трансформации в конечном итоге имеют целью обеспечение производительной и безаварийной работы добычных комплексов. Этой же цели служит внедрение наиболее производительных технологий при разработке полезных ископаемых. Поэтому нельзя забывать о разработке новых производительных технических решений, которые не менее важны для снижения себестоимости добычи.

По мере того, как горные предприятия становятся глубже, а забои удаляются от пунктов разгрузки, растут затраты на транспортирование горной массы и, соответственно, себестоимость добычи. Требуется поиск компромисса между стоимостью и гибкостью транспортных систем для снижения издержек на транспортировку горной массы [2].

Одним из практических решений является возможность при эксплуатации оборудования организации погрузки экскаваторов с обеих сторон, что повышает производительность за счет сокращения времени ожидания при позиционировании автосамосвалов [6, 7]. Для достижения максимальной производительности необходимо создавать условия для эффективной работы экскаватора, включая организацию двухсторонней погрузки [8–10].

Для бесперебойной работы экскаваторно-автомобильных комплексов важно надежное, долговременное снабжение электроэнергией экскаваторов и беспрепятственная и своевременная подача транспорта для вывоза породы. Для этих целей сейчас применяют кабельные ворота и передвижные металлические опоры. Однако их применение является сложным технологически и требует серьезных мер по обеспечению безопасности.

Кабельные ворота (Рис. 1) являются одним из важных компонентов действующей системы электроснабжения и предназначены для нестационарной прокладки высоковольтного кабеля в местах пересечения кабельных сетей и технологических дорог для исключения его повреждения. Однако они имеют высокую материалоемкость – масса более 10 т, габариты в рабочем положении 11000×14700×13500 мм, ограничения по ветровым и погодным условиям, требуют применения специального транспорта и технологий буксировки для перестановки с одного места на другое. Следовательно, их применение является сложным технологически и требует серьезных мер по обеспечению безопасности.

Самый распространенный вариант – это применение передвижных металлических стоек. Кабельная стойка (Рис. 2) и кабельная опора (Рис. 3) предназначены для навески высоковольтных проводов при электроснабжении горных работ внутри разреза для исключения их повреждения при пересечении технологических путей. Они могут использоваться как мачта освещения и стойка для кабельных ворот, но также имеют высокую материалоемкость – масса до 5 т, габариты в рабочем положении 3000×3000×14000 мм, ограничения по ветровым и погодным условиям, требуют применения специального транспорта и технологий буксировки для перестановки с одного места на другое, поэтому их применение сопряжено с теми же рисками, что и при использовании кабельных ворот.

Эксплуатация кабельных ворот (технических устройств) на открытых горных работах связана с существенными рисками и может приводить к несчастным случаям. Анализ инцидентов показывает, что они возникают из-за нарушений в эксплуатации передвижных кабельных конструкций и

Рис.1. Кабельные ворота (тип гусак с кабельным барабаном и без)
Fig. 1. Cable gates (type of gooseneck with and without a cable drum)

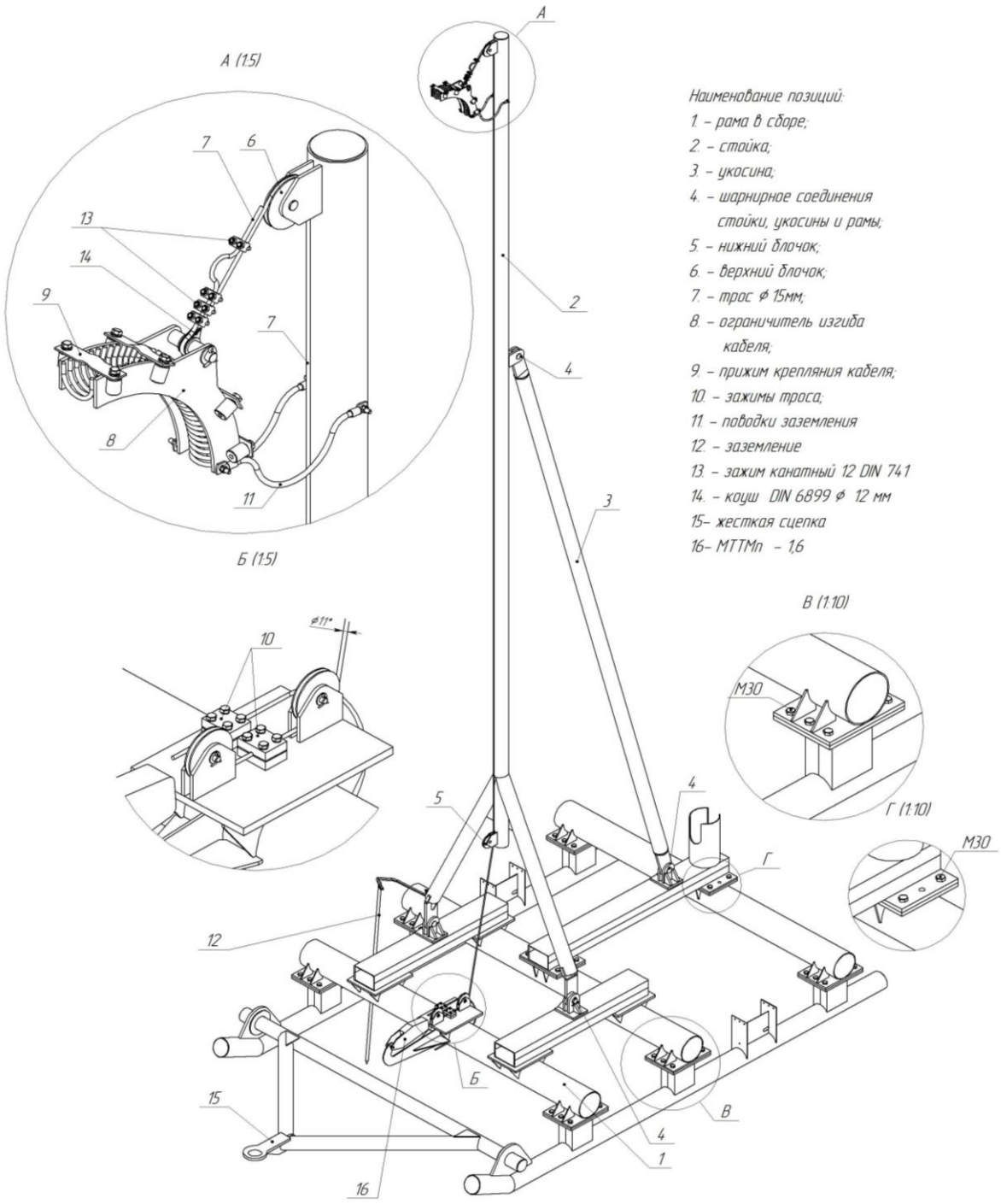

Рис. 2. Кабельные ворота (тип передвижная стойка)
Fig. 2. Cable gates (mobile stand type)

несоблюдения требований проекта производства работ: несоответствие параметров опор кабельных ворот проекту, отсутствие ознакомления работников с требованиями проекта, нарушение технологии при перемещении опор, особенно в темное время суток, с поднятым кабелем и при близком нахождении людей, использование жесткой сцепки без мер безопасности. В целях снижения риска предлагается доводить причины случая до персонала, устанавливать единые требования к эксплуатации передвижных кабельных конструкций и обеспечивать их соответствие проектам, рассматривать и разрабатывать альтернативные варианты организации работ и усилить меры безопасности на предприятии [11].

За рубежом для защиты кабельных линий, обеспечивающих электроснабжение объектов горнодобывающей, лесной, целлюлозно-бумажной, нефтяной и газовой промышленности, используют мобильные кабельные переезды (Рис. 4), изготовленные из полимерных материалов [12–14]. Для этих целей применяется полиуретан с твердостью 70-90 Шор А. Полиуретан обладает уникальной износостойкостью, невысокой, но видимо достаточной прочностью. В то же время даже полиуретаны на основе простых эфиров в силу своего химического

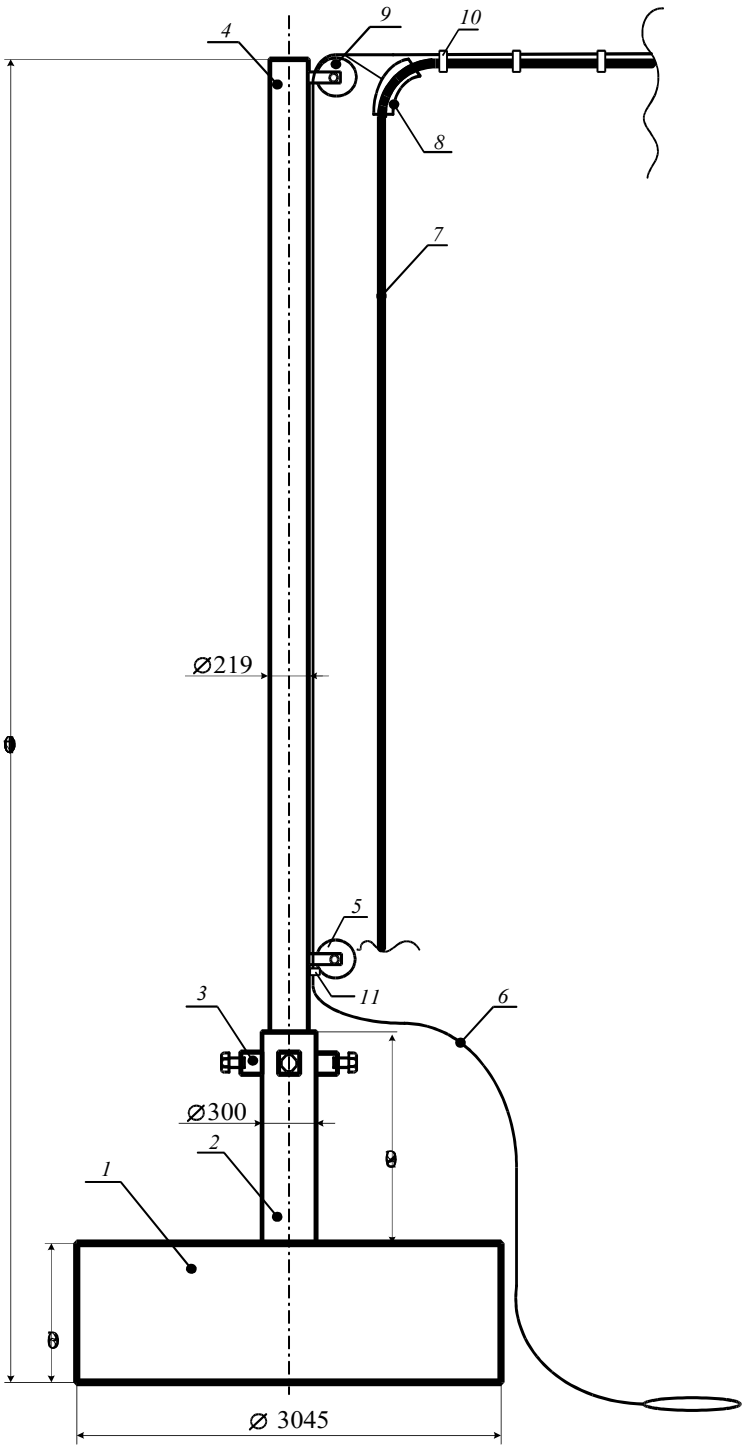

Рис. 3. Кабельные ворота (тип передвижная опора)
Fig. 3. Cable gate (mobile support type)

строения не обладают достаточной стойкостью к длительному воздействию окружающей среды. Видимо, поэтому рекомендуются дополнительные покрытия переездов легкосъемными матами. Предлагаются переезды различных размеров и грузоподъемности для использования при разных эксплуатационных нагрузках.

В силу обстоятельств в России они до настоящего времени не нашли применения, тогда как преимущества их применения очевидны. Во-первых, это быстрота монтажа – не требуется специальная подготовка поверхности дорожного полотна. Во-вторых, это на порядок меньшая масса и, следовательно, меньшие затраты на перемещение; также не требуется специальное оборудование для установки в рабочее положение. В-третьих, отсутствуют какие бы то ни было ограничения по ветровым, снежным нагрузкам, обледенению и обмерзанию. В-четвертых, стоимость комплекта переезда из полимерного композита существенно ниже трудоемких и металлоемких аналогов. В-пятых, отсутствует необходимость в проведении экспертизы

Рис. 4. Применение кабельного переезда
Fig. 4. Application of a cable crossover

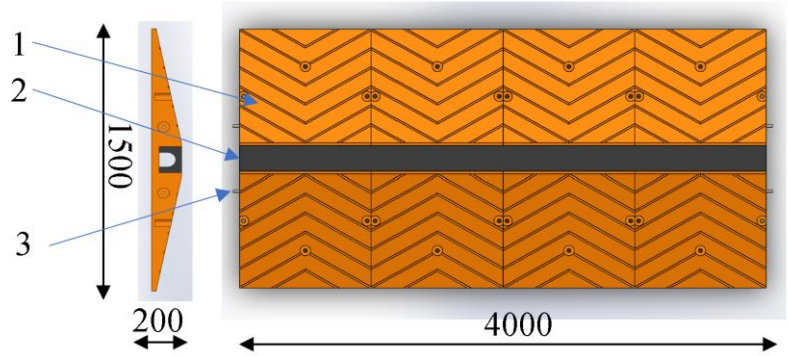

Рис. 5. Геометрические размеры кабельного переезда
Fig. 5. Geometric dimensions of a cable crossing

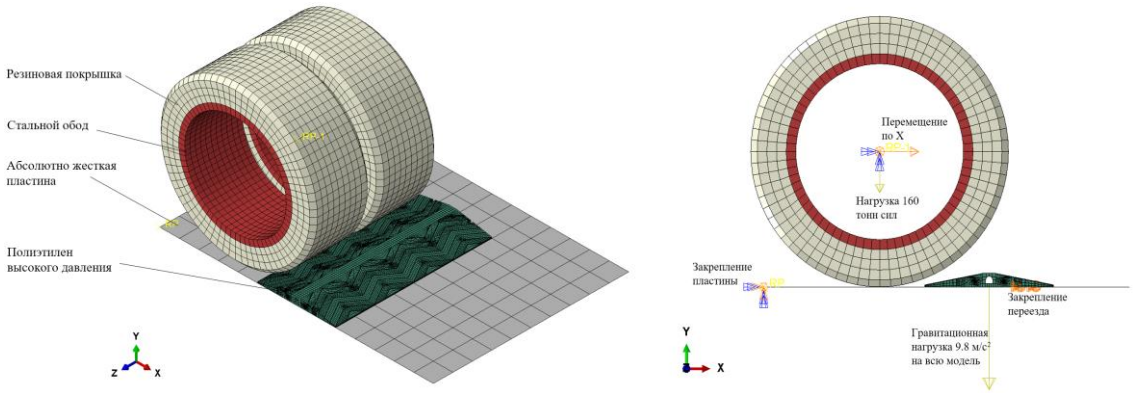

Рис. 6. Конечно-элементная модель кабельного переезда и граничные условия
Fig. 6. Finite element model of a cable crossing and boundary conditions

промышленной безопасности технического устройства.

Расчет методом конечных элементов

Однако для успешной долговременной эксплуатации требуется подтверждение заявленных возможностей, в первую очередь грузоподъемности, то есть способности длительное время выдерживать нагрузки от карьерных самосвалов. В плане отработки конструкции переезда и подтверждения его грузоподъемности выполнили расчет прочности методом конечных элементов. Переезд состоит из четырех секций 1, защитного кожуха канала 2, цилиндрических соединителей 3. Геометрические параметры переезда: длина 4 м, ширина 1.5 м, высота 0.2 м, защитный канал под кабель D=120 мм (Рис. 5).

Решение задачи выполнено с помощью конечно-элементного метода путем решения нелинейной задачи в явном виде (Explicit) с помощью программного комплекса ABAQUS. Расчет провели для наиболее нагруженного переезда при использовании БелАЗа массой 630 т. Модель имитирует наезд сдвоенного колеса (спарки) карьерного самосвала массой 630 т и состоит из пары колес, полимерного переезда, состоящего из паза под кабель и защитного кожуха, жесткой пластины, имитирующей поверхность. Между деталями конечно-элементной модели (КЭМ) задано условие контакта

Таблица 1. Свойства материала, использованные в расчете
Table 1. Material properties used in the calculation

Предел текучести при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве (текучести), %	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Коэффициент сухого трения скольжения по льду
24	10	1000	0,35	0,1

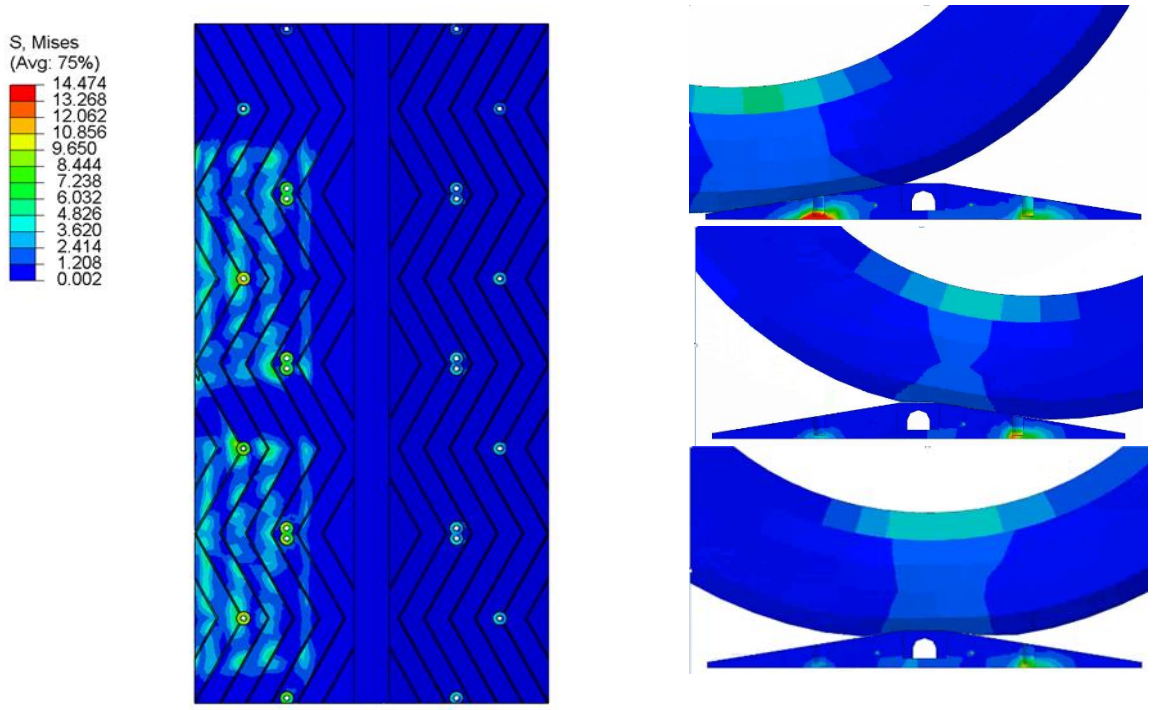

Рис. 7. Напряжения в различные фазы пересечения переезда колесом
Fig. 7. Mises stresses during different phases of crossing a level crossover.

по методу штрафных функций (penalty) с коэффициентом трения 0.5. Поверхность обода пары колес жестко связана в одну точку RP-1, на которую приложено сосредоточенное усилие 160 тонн-сил (630 тонн/4). Граничные условия в КЭМ следующие: задана гравитационная нагрузка 9.8 м/с^2 на всю модель, задана нагрузка на колесо на точку RP-1 в 160 тонн-сил. Пластина закреплена от перемещений и поворотов, переезд закреплен от перемещений по оси X и Z. Задано перемещение пары колес на 5 м по оси X. Начальные условия следующие: время расчета 1 сек, за это время пара колес должна преодолеть расстояние в 5 м, что соответствует скорости самосвала 18 км/ч. Общий вид КЭМ и граничные условия представлены на Рис. 6.

Чтобы максимально точно воспроизвести в расчетах реальную картину нагружения переезда, в модели колеса была заложена резина для покрышек колес с использованием гиперэластичной модели материала Муни-Ривлина с коэффициентами C10=0.69, C01=0.173, D1=0.0124 и обод из стали, модель задана как упругая линейная модель материала с модулем упругости E=210 ГПа и коэффициентом Пуассона 0.3. Исходя из условий эксплуатации, наиболее приемлемым для переезда является композиционный материал на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, обладающего уникальной износостойкостью, коррозионной стойкостью и морозостойкостью, высокими антиадгезионными характеристиками по отношению ко льду и снегу. Для повышения его стойкости в атмосферных условиях в него вводятся противостарители, а для увеличения прочности – усиливающие наполнители. Таким образом добиваются оптимального баланса между длительной прочностью при циклических нагрузках и переменных температурах и атмосферостойкостью. В Таблице 1 представлены физико-механические свойства материала, использованные в расчете. Свойства композита заданы в КЭМ как упруго-пластичная модель с изотропным упрочнением. Пластина (поверхность) задана абсолютно жесткой. В модели использованы кубические элементы C3D8R для колес с размером 140 мм, для переезда размер элементов равен 40 мм. Пластина выполнена жесткими элементами R3D4 размером 500 мм.

Результаты расчета и их обсуждение

На Рис. 7 показаны напряжения в переезде в разные фазы наезда колеса. Видно, что максимальные напряжения 14,5 МПа находятся в зоне крепления переезда и они не превосходят предела текучести. При этом коэффициент запаса $n= \sigma_в /\sigma_{max} =24$ МПа /15 МПа =1.6 > 1. Таким образом, условие по статической прочности обеспечено. В остальных зонах напряжения существенно ниже, что позволяет в дальнейшем оптимизировать массогабаритные характеристики переезда. Пользуясь данными [15], оценим возможность длительной эксплуатации пе-

реездов при 100 000 циклах нагружения. Опираясь на данные [16], 100 000 циклов-наездов примерно соответствует 10 годам эксплуатации. Предел длительной прочности при 100000 циклах нагружения HDPE $\sigma_д$ =15,5 МПа. Соответственно, коэффициент запаса $n_д = \sigma_д / \sigma_{max}$ =15,5 МПа /14,5 МПа > 1. Значит, условие по длительной прочности также выполнено.

В расчете предполагалось, что подложка абсолютно ровная и жесткая. В реальности это, безусловно, не так, но предварительная оценка показывает, что материал и конструкция переезда таковы, что за счет эластических свойств композита давление равномерно распределяется на всю площадь, занимаемую переездом, сглаживая неравномерности рельефа, поэтому в качестве подготовки поверхности дорожного полотна достаточно стандартного разравнивания и прикатки.

Переезд набирается общей шириной до 14 м из секций метровой ширины. Как отмечалось, секции изготавливаются из высокоизносостойкого высокопрочного и коррозионностойкого композиционного материала, устойчивого к ультрафиолету и соляному туману. Как показал расчет, они обладают достаточной прочностью и пластичностью для сопротивления динамическим нагрузкам и изгибным напряжениям. Разработанная расчетная методика позволяет в параметрическом режиме производить проектирование переездов и подбор материалов для их изготовления на основе данных о нагрузках и условиях эксплуатации.

Монтаж-демонтаж переездов может быть выполнен двумя рабочими в течение 0,5 часа, причем без применения грузоподъемных механизмов. Правильно смонтированные и закрепленные переезды не подвержены риску обводнения при прохождении ливневых явлений. Антиадгезионные свойства полимерного материала гарантируют секции от

Рис. 8. Секция для проведения испытаний
Fig. 8. Test section

Таблица 2. Сравнительная таблица двух вариантов
Table 2. Comparison table of two options

Параметр	Кабельные ворота	Кабельный переезд
Общее время работ	3 часа 25 минут	1 час 15 минут
Участники работ	Электромеханик и бригада электриков, машинист бульдозера	Электромеханик/мастер/машинист экскаватора, машинист бульдозера
Демонтаж кабелей	30 минут	10 минут
Демонтаж кабельных зажимов	15 минут	Не требуется
Перемещение переезда	20 минут	10 минут
Монтажные работы	20 минут	30 минут
Монтаж/укладка кабеля	35 минут	15 минут
Дополнительные операции	Да (оформление документов, отключение электроустановки, заземление)	Нет
Отключение/включение напряжения	Требуется	Не требуется
Установка и замеры заземления	Обязательно	Не требуется

вмерзания и засыпания снегом при минусовых температурах. На Рис. 8 показана секция, изготовленная с помощью 3D-печати для проверки теоретических расчетов.

Предлагаемое исполнение соответствует требованиям нормативно-правовых актов в области безопасности: Приказу Ростехнадзора от 10 ноября 2020 г. N 436 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при разработке угольных месторождений открытым способом»; Правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии, утвержденных приказом Минэнерго России от 12 августа 2022 г. N 811; Федеральному закону от 21.07.1997 года (в редакции от 29.07.2018г.) № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

Технико-экономические показатели кабельного переезда для силового кабеля.

Подходит для грузовых автомобилей грузоподъемностью до 630 т.

Защищает кабели диаметром до 120 мм.

Напряжение высоковольтного кабеля – 6-10 кВ.

Пределы температур эксплуатации: -100 ÷ +100 °С.

Вес секции: 100 кг.

Комплект состоит из 14 секций размером 1000х1500х200, защитного кожуха канала, соединителей секций.

Климатическое исполнение УХЛ1 ГОСТ 15150.

Может эксплуатироваться в районах с сейсмичностью до 8 баллов СНиП II-7-81.

Не требует технического обслуживания.

Выпускаются в цвете для улучшения видимости.

Прогнозируемый срок службы: не менее 10 лет.

Гарантированно выдерживают 100 000 циклов нагружения.

На основе имеющейся информации в Таблице 2 представлены сравнительные характеристики двух вариантов по перемещению и организации кабельных переходов.

Сравнительный анализ вариантов выявляет принципиальные различия в методологии и технических решениях. Применение кабельных ворот характеризуется максимально детализированной и строгой процедурой, включающей полный демонтаж электроустановки. Общая длительность работ составляет 3 часа 25 минут, что существенно превышает время установки кабельного переезда – 1 час 15 минут.

Ключевые отличительные особенности первого варианта:

- Полный демонтаж кабелей с разъединением всех элементов;
- Обязательное оформление наряда-допуска;
- Необходимость отключения электроустановки;
- Проведение процедуры заземления;
- Замер сопротивления заземления;
- Сложная многоступенчатая процедура монтажа и демонтажа.

Второй вариант принципиально отличается своей мобильностью и эффективностью:

- Перемещение кабеля без разъединения;
- Минимальное время выполнения работ;
- Отсутствие необходимости отключения напряжения;
- Работы выполняются в штатном режиме эксплуатации;
- Отсутствие дополнительных согласований и документирования.

Технологические нюансы монтажа кабельных ворот требуют высокой квалификации персонала и предполагают значительные временные затраты на подготовительные и заключительные операции. Электромеханик вынужден выполнять трудоемкие процессы демонтажа кабельных зажимов, замера сопротивления и оформления документации.

Второй вариант демонстрирует принципиально новый подход к перемещению кабельных переездов – максимально быстро, без остановки производственного процесса, с минимальным вмешательством в существующую инфраструктуру.

Экономическая целесообразность второго подхода очевидна:

- Сокращение времени работ более чем в 2,5 раза;
- Минимизация производственных рисков;
- Отсутствие простоя оборудования;
- Снижение трудозатрат персонала.
- Высокая мобильность и эффективность.

При возможности технической реализации предпочтительным является второй подход, который обеспечивает высокую мобильность, безопасность и эффективность работ. Выбор конкретного метода должен осуществляться с учетом специфики оборудования, состояния кабельных линий и требований производственной безопасности.

Выводы

Современные тенденции развития горнодобывающей промышленности требуют постоянной оптимизации технологических процессов, направленных на повышение эффективности и безопасности производства. Разработанное техническое решение – кабельный переезд из полимерных композиционных материалов – демонстрирует принципиально новый подход к организации электроснабжения на горных предприятиях.

Перспективы внедрения решения связаны с общемировым трендом цифровой трансформации горнодобывающей отрасли, направленной на:

- Повышение производительности комплексов;
- Снижение себестоимости выемочно-погрузочных работ;
- Оптимизацию производственных процессов.

Предложенная технология кабельных переездов является инновационным решением, которое качественно улучшает существующие подходы к организации электроснабжения на горных предприятиях.

Ключевые результаты исследования:

- разработана конструкция кабельного переезда с защитным каналом для высоковольтных кабелей;

- выполнен расчет прочности с использованием нелинейного конечно-элементного моделирования;

- доказана возможность эксплуатации переезда в течение 10 лет с гарантией 100 000 циклов нагружения;

- продемонстрирована экономическая эффективность – сокращение времени работ более чем в 2,5 раза.

Материалы статьи имеют практическую значимость для горнодобывающих предприятий, занимающихся открытой разработкой месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коптев В. Ю., Коптева А. В. Анализ предпосылок создания транспортных систем «умного» горнодобывающего предприятия // Russian Mining Industry. 2025. № 1S. Pp. 92–96.

2. Журавлев А. Г., Глебов И. А., Черепанов В. А. Поиск резервов повышения производительности экскаваторно-автомобильных комплексов с применением компьютерного моделирования // Горная Промышленность. 2023. № 6. С. 148–154.

3. Safiullin R. N., Safiullin R. R., Sorokin K. V., Kuzmin K. A., Rudko V. A. Integral assessment of influence mechanism of heavy particle generator on hydrocarbon composition of vehicles motor fuel // International Journal of Engineering. 2024. № 37(8). Pp. 1700–1706.

4. Safiullin R., Epishkin A., Safiullin R., Haotian T. Method of forming an integrated automated control system for intelligent objects // In: Ceur workshop proceedings: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference «Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems» (ITIDMS-II-2021). Germany : Aachen, 2021. Pp. 17–26.

5. Choi Y. Recent advances in smart mining technology // Applied Sciences. 2023. № 13(6). Art. 3726.

6. Хаструлид У. А., Кухта М., Мартин Р. К. Открытая горная разработка: проектирование и планирование. Бока-Ратон : CRC Press, 2013. URL: https://www.mondl.com/research-papers/on-it-mine-planning-design-two-volume-set-drm-pack/ (дата обращения: 22.08.2025).

7. Arara A. S., Nohring M., Vega E. N., Miranda N. S. The impact of equipment productivity and pushback width on the mine planning process // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2020. Vol. 120. № 10. Pp. 599–608.

8. Анистратов К. Ю. Экономико-математическая модель комплексной механизации горных работ на карьерах // Горная промышленность. 2015. № 3. С. 54–55.

9. Ясюченя С. В. О повышении операционной эффективности открытых горных работ в компании ОАО «СУЭК» // Электронный журнал «Горное дело». 2014. № 1 (2). С. 24–33.

10. Анистратов К. Ю., Конопелько С. А. Оптимальный срок службы карьерных одноковшовых экскаваторов с электрическим приводом // Горная промышленность. 2012. № 3 (103). С. 8–12.

11. Сибирское управление Ростехнадзора. На соблюдении требований промышленной безопасности [Электронный ресурс]. Сибирское управление Ростехнадзора завершило расследование тяжелого несчастного случая, произошедшего с горным мастером участка горных работ № 9 АО «Черниговец». 2023. Номер дела 340-954 (06.03.2023).

12. https://www.pattonandcooke.com/product-category/mining/cable-protection/ 16.12.2025г.

13. Rubber Cable Crossover Matshttps://www.minecableservices.ca/products/rubber-cable-crossover-mats/ 16.12.2025г.

14. Cable Support & Protection - https://www.minesupply.com/product/cable-support-protection/ 18.12.2025г.

15. Djebli Abdelkader, A. Aid, Bendouba Mostefa, Benguediab Mohamed. Uniaxial Fatigue of_HDPE-100 Pipe Experimental_analysis // Engineering, Technology and Applied Science Research. 2014. Vol. 4. Pp. 600–604.

16. Жилинков А. А., Калянов А. Е., Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А. Обоснование параметров экскаваторно-автомобильных комплексов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 12−1. С. 44–55. DOI: 10.25018/0236_1493 2023_121_0_44.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Зерщиков Константин Юрьевич, кандидат технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Константа-2», г. Волгоград, +79880283860, e-mail: director@constanta-2.ru

Антоненков Дмитрий Васильевич, кандидат технических наук, доцент, руководитель проектов по энергообеспечению Дирекции по операционной эффективности ООО «УК» «Сибирский Антрацит», г. Новосибирск

Сергеичев Иван Валерьевич, кандидат физико-математических наук, Сколковский институт науки и технологий, г. Москва

Елкин Александр Сергеевич, кандидат технических наук, Сколковский институт науки и технологий, г. Москва

Заявленный вклад авторов:

Зерщиков Константин Юрьевич – концептуализация исследования, написание текста, выводы.

Антоненков Дмитрий Васильевич – обзор литературы, сравнительный расчет экономической эффективности.

Сергеичев Иван Валерьевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент.
Елкин Александр Сергеевич – разработка модели и прочностной расчет методом конечных элементов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-62-72

Konstantin Y. Zershchikov [1], Dmitry V Antonenkov [2], Ivan V. Sergeichev [3], Aleksandr S. Elkin [3]

[1] Constanta-2 LLC
[2] Siberian Anthracite Management Company LLC
[3] Skolkovo Institute of Science and Technology

***** for correspondence: director@constanta-2.ru

CABLE CROSSOVERS MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS TO REDUCE THE COST OF OPERATING EXCAVATOR-VEHICLE COMPLEXES

Article info
Received:
05 February 2026

Accepted for publication:
01 September 2026

Accepted:
15 September 2026

Keywords: *excavator-vehicle complexes, cable gates, mobile cable crossover, composite material, strength calculation, finite element method, economic efficiency*

Abstract.
The article presents an innovative solution for reducing costs during the operation of excavator-vehicle complexes – cable crossovers made of polymer composite materials. The relevance of the study is due to the need to optimize production processes in the mining industry and reduce the cost of extracting minerals. Cable lines that supply electricity to mining complexes must be reliable and cost-effective to operate. Existing cable line supply options are technologically complex, require significant safety measures, and are costly. Proposed cable crossover for a power cable made of a polymer-based wear-resistant composite ensures long-term operation, is highly mobile, and does not require the use of special equipment. As a result, total costs are reduced. However, the use of new technology requires confirmation of its performance characteristics. To achieve this, a finite element analysis was performed using the Abaqus software package to assess the impact of a 630-ton dump truck on the cable crossing. The calculation showed that the strength is ensured. Given the cyclic nature of loading, the strength was also calculated based on the condition of 100,000 overpasses. Since this number of cycles corresponds to approximately 10 years of operation, it was concluded that the crossovers can be used for a long time. The economic efficiency of using cable crossovers was calculated in comparison with the traditional cable routing scheme. Consequently, the technical and economic advantages of cable crossovers make their implementation highly effective. The scientific novelty of the work lies in the development and justification of the effectiveness of using mobile cable crossovers made of polymer composites instead of traditional metal structures.

For citation: Zerschikov K.Yu.. Annenkov D.V.. Sergeichev I.V.. Elkin A.S. Cable crossovers made of polymer composite materials to reduce the cost of operating excavator-vehicle complexes. Mining Equipment and Electromechanics, 2026; 4(186):62-72 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-62-72, EDN: JQQGXA

REFERENCES

1. Koptev V.Yu., Kopteva A.V. Analiz predposylok sozdaniya transportnykh sistem «umnogo» gornodobyvayushchego predpriyatiya. *Russian Mining Industry* 2025; 1S:92-96.

2. Zhuravlev A.G., Glebov I.A., Cherepanov V.A. Poisk rezervov povysheniya proizvoditel'nosti ekskavatorno-avtomobil'nykh kompleksov s primeneniem komp'yuternogo modelirovaniya. *Gornaya Promyshlennost'.* 2023; 6:148-154.

3. Safiullin R.N., Safiullin R.R., Sorokin K.V., Kuzmin K.A., Rudko V.A. Integral assessment of influence mechanism of heavy particle generator on hydrocarbon composition of vehicles motor fuel. *International Journal of Engineering.* 2024;37(8):1700-1706.

4. Safiullin R., Epishkin A., Safiullin R., Haotian T. Method of forming an integrated automated control system for intelligent objects. *In: Ceur workshop proceedings: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference "Information Technolo-*

gies and Intelligent Decision Making Systems" (ITIDMS-II-2021). Germany: Aachen; 2021. Pp. 17-26.

5. Choi Y. Recent advances in smart mining technology. *Applied Sciences.* 2023; 13(6):3726.

6. Khastrulid U.A., Kukhta M., Martin R.K. Otkrytaya gornaya razrabotka: proektirovanie i planirovanie. Boka-Raton: CRC Press; 2013. URL: https://www.mondl.com/research-papers/on-it-mine-planning-design-two-volume-set-drm-pack/ (data obrashcheniya: 22.08.2025).

7. Arara A.S., Nohring M., Vega E.N., Miranda N.S. The impact of equipment productivity and pushback width on the mine planning process. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy.* 2020; 120(10):599-608.

8. Anistratov K.Yu. Ekonomiko-matematicheskaya model' kompleksnoj mekhanizacii gornykh rabot na kar'erakh. *Gornaya promyshlennost'.* 2015; 3:54-55.

9. Yasyuchenya S.V. O povyshenii operacionnoj effektivnosti otkrytykh gornykh rabot v kompanii OAO «SUEK». *Elektronnyj zhurnal «Gornoe delo».* 2014. № 1 (2). P. 24-33.

10. Anistratov K.Yu., Konopel'ko S.A. Optimal'nyj srok sluzhby kar'ernykh odnokovshovykh ekskavatorov s elektricheskim privodom. *Gornaya promyshlennost'.* 2012; 3(103):8-12.

11. Sibirskoe upravlenie Rostekhnadzora. Na soblyudenii trebovanij promyshlennoj bezopasnosti [Elektronnyj resurs]. Sibirskoe upravlenie Rostekhnadzora zavershilo rassledovanie tyazhelogo neschastnogo sluchaya, proizoshedshego s gornym masterom uchastka gornykh rabot № 9 AO «Chernigovec». 2023. Nomer dela 340-954 (06.03.2023).

12. https://www.pattonandcooke.com/product-category/mining/cable-protection/ 16.12.2025

13. Rubber Cable Crossover Mats – https://www.minecableservices.ca/products/rubber-cable-crossover-mats/ 16.12.2025

14. Cable Support & Protection – https://www.minesupply.com/product/cable-support-protection/ 18.12.2025

15. Djebli Abdelkader, A.Aid, Bendouba Mostefa, Benguediab Mohamed. Uniaxial Fatigue of_HDPE-100 Pipe Experimental_analysis. *Engineering, Technology and Applied Science Research.* 2014; 4:600-604.

16. Zhilinkov A.A., Kalyanov A.E., Komissarov A.P., Lagunova Yu.A. Obosnovanie parametrov ekskavatorno-avtomobil'nykh kompleksov. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'.* 2022; 12-1: 44-55. DOI: 10.25018/0236_1493 2023_121_0_44.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:
Konstantin Y. Zershchikov, doctor of science, Constanta-2 LLC, Volgograd, Russian Federation, e-mail: director@constanta-2.ru
Dmitry V Antonenkov, doctor of science, Head of energy projects at the Operational Efficiency Directorate of Siberian Anthracite Management Company LLC, Novosibirsk, Russian Federation
Ivan V. Sergeichev, doctor of science, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russian Federation
Aleksandr S. Elkin, doctor of science, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russian Federation

Contribution of the authors:
Konstantin Y. Zershchikov – research conceptualization, writing, and conclusions.
Dmitry V Antonenkov – literature review, comparative cost-effectiveness calculation.
Ivan V. Sergeichev – research problem statement, scientific management.
Aleksandr S. Elkin – model development and strength analysis using the finite element method.

Authors have read and approved the final manuscript.