

УДК 621.865.8

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОВ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Руденко Сергей Анатольевич,

Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования», заведующий отделом

Электронная почта: niive@list.ru

Россия, г. Донецк

Гамий Светлана Михайловна,

Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования», инженер-конструктор I категории

Электронная почта: niive@list.ru

Россия, г. Донецк

Аннотация

Рассмотрены особенности применения мобильных и автономных робототехнических систем в угольных шахтах, опасных по рудничному газу и угольной пыли. Выполнен краткий обзор специализированных шахтных роботов и показано, что наличие автономных функций само по себе не обеспечивает пригодность устройства для подземных выработок: конструкция должна одновременно отвечать требованиям функциональной безопасности, взрывозащиты, устойчивости к пыли, влаге, вибрации и ограничениям подземной навигации и связи. Систематизирован нормативный контур, включающий требования к машинам, робототехническим устройствам и оборудованию группы I. Для основных подсистем робота – перемещения, позиционирования, управления, питания и измерения – предложено распределение видов взрывозащиты и защитных мер. Сформулирован концептуальный порядок выбора технических решений, основанный на декомпозиции потенциальных источников воспламенения и оценке безопасности всего робототехнического комплекса, а не отдельных компонентов.

Ключевые слова: угольная шахта, робототехника, автономный робот, взрывоопасная среда, взрывозащита, рудничное оборудование, навигация, функциональная безопасность.

FEATURES OF ROBOT APPLICATIONS IN COAL MINES

Rudenko Sergey Anatolyevich,

State budgetary institution scientific-research, project-designing and technological institute of explosion proof and mine electrical equipment, head of department

E-mail: niive@list.ru

Russia, Donetsk

Gamiy Svetlana Mikhailovna,

State budgetary institution scientific-research, project-designing and technological institute of explosion proof and mine electrical equipment, design engineer

E-mail: niive@list.ru

Russia, Donetsk

ABSTRACT

The paper considers the application of mobile and autonomous robotic systems in coal mines endangered by firedamp and coal dust. A brief review of specialized mine robots is presented. It is shown that autonomy alone does not make a robot suitable for underground coal mines: functional safety, explosion protection, resistance to dust, moisture and vibration, as well as underground navigation and communication constraints must be addressed simultaneously. The regulatory framework for machinery, robotic devices and Group I equipment is systematized. Explosion-protection concepts and protective measures are mapped to the locomotion, positioning, control, power-supply and measurement subsystems. A general design procedure is proposed based on ignition-hazard decomposition and system-level safety assessment rather than component-by-component selection.

Keywords: coal mine, robotics, autonomous robot, explosive atmosphere, explosion protection, mining equipment, navigation, functional safety.

Введение

Автоматизация и роботизация относятся к приоритетным направлениям технологического развития промышленности. Для угольной отрасли этот процесс имеет дополнительное значение, поскольку часть производственных, инспекционных и аварийно-спасательных операций выполняется в условиях, потенциально опасных для человека. Снижение присутствия персонала в забоях, протяженных транспортных выработках и аварийных зонах позволяет одновременно повышать безопасность и регулярность контроля оборудования. Государственная политика Российской Федерации также ориентирована на повышение уровня промышленной роботизации и технологической независимости [1].

Вместе с тем угольная шахта представляет собой среду, в которой прямой перенос общепромышленных мобильных роботов ограничен. Помимо обычных опасностей движущейся машины необходимо учитывать взрывоопасную газовую и пылевую среду, высокую запыленность и влажность, вибрацию, загрязнение оптических поверхностей, стесненные габариты, локальные неровности и уклоны, электромагнитные помехи, отсутствие спутниковой навигации и возможную потерю устойчивой радиосвязи. В этих условиях робот должен рассматриваться не как совокупность готовых коммерческих модулей, а как единый технический объект, для которого функциональная архитектура и взрывозащита проектируются совместно.

Исследование выполнено на основе аналитического обзора существующих технических решений, анализа нормативной документации по робототехнике и взрывозащите, с применением разделения рассматриваемой системы на основные функциональные подсистемы. Данное исследование проводилось в рамках текущей опытно-конструкторской работы по созданию взрывозащищенной роботизированной

системы мониторинга роlikоопор магистральных ленточных конвейеров, выполняемой в ГБУ «НИИВЭ».

Цель исследования – систематизировать технические и нормативные особенности проектирования роботов для угольных шахт и сформулировать практическую концепцию выбора решений для взрывозащищенного мобильного робототехнического комплекса. Для достижения цели решались задачи: сопоставить существующие шахтные робототехнические платформы и примененные технические решения; определить факторы подземной среды, влияющие на конструкцию и автономность; выделить применимый нормативный контур; связать потенциальные источники воспламенения с возможными видами взрывозащиты; сформировать требования к основным подсистемам и последовательность проектной оценки.

1. Основные направления применения и применяемые шахтные роботы

В отечественной научной литературе одним из базовых исследований этого направления является работа Л. Д. Певзнера и М. Л. Ким [2], посвященная робототехнике в горном деле. В ней робототехнические средства рассматриваются как самостоятельное направление автоматизации горных работ. Более прикладное развитие отечественного направления представлено в работе А. М. Липанова и соавторов [3], где предложена концепция многомодульного беспилотного самоходного аппарата для угольных шахт в рамках проекта «Хамелеон». Основой комплекса является базовый транспортный модуль «Мул», который может объединяться со специализированными функциональными модулями, что позволяет изменять конфигурацию системы под конкретную задачу. В продолжении работы описан модуль «Следопыт»: совместно с модулем «Мул» он формирует аппарат-разведчик, оснащенный средствами построения модели окружающей среды, видео- и тепловизионного наблюдения и способный продолжать движение при отсутствии связи с оператором. Рассмотрены сценарии мониторинга, поиска, спасательных работ и ликвидации пожара в шахте. Существенной особенностью предложенного подхода является модульность, позволяющая создавать на общей транспортной базе робототехнические комплексы различного функционального назначения.

Из реально эксплуатирующихся же шахтных роботов можно выделить следующие.

Универсальный робототехнический комплекс (ООО «Специализированное конструкторско-технологическое бюро прикладной робототехники», Россия) [4] предназначен для проведения в шахтных выработках инспекционных проверок, аварийно-спасательных и взрывотехнических работ. Комплекс выполнен как мультисредный (подземный, наземный, подводный), может перемещаться на гусеничном и колесном шасси и оснащается телевизионной аппаратурой, телекамерами, лазерным дальномером и тепловизором.

Gemini-Scout (Sandia National Laboratories, США) [5] создавался как двухсекционная гусеничная платформа для угольных шахт и оснащался газовыми и температурными датчиками, видеокамерами и тепловизором; в литературе указывается взрывозащищенное и разрешенное для шахт исполнение.

MINBOT-II (Harbin Institute of Technology, Китай) [5] представляет модульную гусеничную платформу с дополнительными рычагами для преодоления препятствий, газоаналитическими датчиками и оптоволоконной связью; при разработке отдельно прорабатывались водозащита, взрывозащита и искробезопасность.

Европейский TeleRescuer (консорциум TeleRescuer под координацией Silesian University of Technology, Польша/ЕС) [5] проектировался как тяжелая гусеничная разведывательно-спасательная платформа с подвижными траками, лазерным картографированием, видеокамерами, тепловизором, газоанализом и каналами

проводной/радиосвязи. В его конструкции использовались решения, ориентированные на АТЕХ-требования и предотвращение воспламенения.

CUMT-V (China University of Mining and Technology совместно с Changzhou Scientific Research and Development Center Co., Ltd., Китай) [6, 7] развивает эту линию за счет улучшения ходовой части, сенсорики, картографирования и режимов автономности. Испытания платформы в условиях шахты показали хорошую адаптацию к сложному рельефу, но одновременно выявили типичные для тяжелых мобильных систем проблемы ходовой части, торможения и связи.

Для регулярных производственных инспекций развивается и другой класс устройств: в 2025 г. опубликована инженерная реализация взрывозащищенного многозвенного рельсового инспекционного робота (Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd., Китай) [8] для механизированного очистного забоя. Это показывает переход от универсальных спасательных платформ к специализированным роботам, оптимизированным под конкретную трассу и функцию.

Как видно, подавляющая часть реально эксплуатирующихся роботов для шахт применяется на гусеничном шасси, по большей части ввиду того, что эксплуатация происходит в условиях слабо структурированной среды. Стоит отметить, что принципиально применимы и другие виды шасси в частности (колесное, комбинированное) и принципы перемещения в общем (шагающие и летающие роботы, рельсовые направляющие). Эти аспекты определяются функционалом робота, условиями эксплуатации и рядом технических ограничений.

2. Условия угольной шахты и технические ограничения

Ограниченное пространство заставляет минимизировать габариты и радиус разворота, но уменьшение размеров взрывонепроницаемых оболочек ограничено тепловым режимом, объемом батареи и необходимыми зазорами. Напротив, чрезмерное использование массивных оболочек с видом взрывозащиты «взрывонепроницаемые оболочки «d» по ГОСТ IEC 60079-1-2013 (в дальнейшем - «d») повышает массу, энергопотребление ходовой части и требуемую емкость аккумулятора, что вновь увеличивает массу. Возникает замкнутый контур, в котором выбор вида взрывозащиты непосредственно влияет на энергетический баланс и мобильность.

Отсутствие GPS/ГЛОНАСС означает, что локализация должна строиться на бортовых измерениях и признаках окружающего пространства. Одометрия проста, но накапливает ошибку при проскальзывании; инерциальная система дрейфует; машинное зрение зависит от освещения и загрязнения смотровых окон; лидар чувствителен к аэрозолю и требует вычислительных ресурсов; ультразвуковые дальнометры имеют ограниченное разрешение. Следовательно, для шахтного робота предпочтительна сенсорная избыточность, а не ставка на один «универсальный» датчик.

3. Нормативное регулирование

Для подземных выработок шахт, опасных по рудничному газу и/или горючей пыли, оборудование относится к группе I. Требуемый уровень взрывозащиты должен определяться не названием робота, а условиями и сценарием его использования. Это принципиально для разграничения регулярной инспекции и аварийно-спасательного применения. Если по принятому сценарию устройство при достижении опасной концентрации метана должно отключаться и приводиться в безопасное состояние, одна архитектура защиты может быть допустимой; если робот обязан продолжать работу в сформировавшейся взрывоопасной среде, требования к уровню защиты становятся существенно жестче. Поэтому универсальное утверждение, что любой шахтный робот должен иметь один и тот же уровень Ma или Mb, методически некорректно: уровень задается оценкой риска, назначением и нормативной категорией конкретного изделия.

Особое значение имеет различие между сертифицированным Ех-компонентом и робототехническим комплексом. Сертификат двигателя, датчика или кабельного ввода не подтверждает автоматически безопасность всей системы после их объединения. Компоновка меняет тепловой режим, длину и параметры искробезопасных цепей, механические нагрузки, электромагнитные связи, способы зарядки и доступность обслуживания. Поэтому конечная оценка должна выполняться на уровне изделия в предусмотренной конфигурации и с учетом эксплуатационной документации. Нормативные документы, которыми следует руководствоваться при проектировании роботов для шахт, а также сферы их применимости, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные нормативные документы и их роль при проектировании

Документ	Предмет регулирования	Практическая роль для шахтного робота
ТР ТС 010/2011 [9]	Безопасность машин и оборудования в пределах области применения	Общие опасности машины, проектирование, защитные меры, документация и подтверждение соответствия
ТР ТС 012/2011 [10]	Оборудование для работы во взрывоопасных средах	Ключевой обязательный контур Ех-безопасности и маркировки оборудования группы I
ТР ТС 020/2011 [11]	Электромагнитная совместимость технических средств	Устойчивость к помехам и ограничение создаваемых помех
ГОСТ Р 60.0.2.1-2016	Общие требования безопасности робототехнических устройств	Робот-специфичные принципы безопасности и оценка опасностей
ГОСТ 31439-2011	Оборудование для потенциально взрывоопасных сред шахт и рудников	Специальные шахтные условия и требования к компонентам
ГОСТ 31438.2-2011	Взрывозащита и предотвращение взрыва в подземных выработках	Методология выявления и исключения источников воспламенения
Серия ГОСТ 31610 / IEC 60079	Общие и частные требования к видам взрывозащиты	Выбор и проверка конкретной защиты электрических и оптических узлов
Стандарты на неэлектрическое Ех-оборудование	Механические источники воспламенения	Оценка трения, удара, нагрева, электростатики, тормозов, передач и подшипников

4. Потенциальные источники воспламенения и виды взрывозащиты

Оптические приборы требуют отдельной оценки. Камера как пассивный приемник света не равнозначна лазерному дальномеру или лидару, который сам формирует оптическое излучение. Для активных источников оценивается необходимость применения вида взрывозащиты «защита оборудования и передающих систем, использующих оптическое излучение «ор» по ГОСТ 31610.28-2017 (в дальнейшем - «ор») и допустимая оптическая мощность. Электронная часть оптического датчика при этом может иметь иной вид защиты, например «d», вид взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь «i» по

ГОСТ 31610.11-2014 (в дальнейшем - «i») или вид взрывозащиты «герметизация компаундом «m» по ГОСТ 31610.18-2016 (в дальнейшем - «m»). Это наглядный пример комбинированной взрывозащиты одного функционального узла.

Для неэлектрических частей применимы виды взрывозащиты «конструкционная безопасность «с» (в дальнейшем - «с»), «контроль источника воспламенения «b» (в дальнейшем - «b») и, в специальных случаях, «погружение в жидкость «k» (в дальнейшем - «k») по ГОСТ ISO/DIS 80079-37-2013. В ходовой части необходимо исключить опасное сочетание материалов, фрикционное искрение, заклинивание и перегрев подшипников и тормозов; контролировать допустимые скорости и нагрузки; учитывать электростатические свойства неметаллических деталей. В отдельных электрических узлах могут рассматриваться также вид взрывозащиты «повышенная защита вида «е» по ГОСТ 31610.7-2017 (в дальнейшем - «е») или вид взрывозащиты «оболочки под избыточным давлением «р» по ГОСТ IEC 60079-2-2013 (в дальнейшем - «р»), но их выбор для компактного мобильного робота должен быть обоснован конструкцией, объемом оболочки, потреблением энергии и условиями обслуживания.

Таблица 2 – Предварительное распределение видов взрывозащиты по узлам робота

Узел / подсистема	Потенциальный источник воспламенения	Предпочтительные меры	Комментарий
Тяговый электродвигатель, силовой драйвер	Искрение, коммутация, нагрев, перегрузка	«d»; температурный контроль; защитное отключение	Для мощного привода «d» часто рациональнее попытки сделать весь силовой контур искробезопасным
Энкодеры, инерциальные измерительные модуль, концевые датчики	Энергия низковольтных цепей	«i» либо «m»	Оценивать совместно с кабелями, барьерами и интерфейсами
Бортовой вычислитель и силовая электроника	КЗ, горячие компоненты, разъемы	«d» или «m» по допустимости; локальный тепловой контроль	Минимизировать объем тяжелой оболочки и тепловую нагрузку
Аккумулятор, система управления аккумуляторной батареей	КЗ, перегрев, газовыделение, обратная зарядка	«d» либо «m» при допустимой химии; «i» для цепей контроля	Оценивается батарейная сборка, а не только отдельная ячейка
Камера, тепловизор	Электронные цепи, нагрев	«d»/«m»/«i» по электронике; защищенное окно	Для пассивной оптики отдельно оценивается электронная часть

Узел подсистема /	Потенциальный источник воспламенения	Предпочтительные меры	Комментарий
Лидар, лазерный дальномер, оптическая связь	Оптическое излучение + электроника	«ор» в требуемом варианте; дополнительно «d»/«i»/«m»	Нужна оценка мощности, длины волны, расходимости и аварийных режимов
Рама, редуктор, ступицы, тормоза, подшипники	Трение, удар, горячая поверхность	«с»; при необходимости «b»; контроль перегрева и заклинивания	Механическая Ех-безопасность требует отдельной оценки
Колеса, кожухи, окна из полимеров	Электростатический заряд, фрикционное искрение	Материалы с допустимыми электростатическими свойствами; ограничение площади/заряда	Выбор материала является частью взрывозащиты
Клеммные коробки и соединения	Ослабление контакта, нагрев, искрение	«е», «d» или «i» в зависимости от энергии и функции	Необходимо соблюдать совместимость вводов, кабелей и оболочек
Крупный герметичный электронный модуль	Внутреннее искрение	В отдельных случаях «р»	Для мобильного робота применимость ограничена массой, расходом защитного газа и инфраструктурой

5. Требования к основным функциональным подсистемам

5.1. Система перемещения

Для компактной колесной платформы рациональна дифференциальная схема с независимым приводом бортов и бесколлекторными двигателями с редукторами и энкодерами. Отсутствие щеточно-коллекторного узла снижает износ и один из источников искрения, но не отменяет требования к взрывозащите двигателя и силового преобразователя. Система должна контролировать ток, скорость, температуру и признаки заклинивания, обеспечивать управляемое торможение и исключать самопроизвольное движение после восстановления питания. Тормоз, редуктор, подшипниковые узлы и колеса должны оцениваться как неэлектрические потенциальные источники воспламенения.

5.2. Позиционирование и навигация

Навигационная архитектура должна строиться на принципе взаимного резервирования физических методов. Энкодеры дают непрерывную одометрию, инерциальный измерительный модуль – кратковременную оценку ориентации и динамики, ультразвуковые или иные дальномерные средства – независимый контроль препятствий, а камеры и лидары – геометрические и семантические признаки окружающей среды. Для повторяемого маршрута дополнительно могут применяться пассивные метки,

реперные точки или признаки стационарного оборудования. Такой подход позволяет снизить требования к одному датчику и обеспечить диагностирование деградации навигации.

5.3. Система управления, связь и функциональная безопасность

Систему управления целесообразно строить иерархически: центральный вычислитель выполняет маршрут и обработку данных, локальные контроллеры обеспечивают быстрое регулирование приводов и первичные защитные функции. Это уменьшает зависимость безопасности от одного программного процесса. Необходимы как минимум автоматический, наладочный/ручной, дистанционный и аварийный режимы с однозначными правилами приоритета. После аварийного отключения или восстановления питания движение не должно возобновляться автоматически без выполнения предусмотренной процедуры разрешения.

Для каждого отказа должно быть заранее определено безопасное состояние. Потеря внешней связи при штатной инспекции может приводить к остановке и ожиданию, возврату на базовую станцию либо продолжению только безопасного локального участка – выбор зависит от оценки риска. Потеря одного навигационного канала не обязательно требует немедленного отключения, если остаются независимые достоверные средства. Напротив, превышение температуры батареи, невозможность подтвердить отсутствие препятствия или нарушение взрывозащиты должны приводить к более жесткой реакции. Таким образом, «аварийная остановка» для автономного робота представляет собой набор сценариев, а не одну кнопку.

5.4. Автономный источник питания и зарядка

Аккумуляторная подсистема одновременно определяет продолжительность автономной работы, массу, центр тяжести и значительную часть теплового режима. Требуемая емкость должна вычисляться по энергетическому балансу с учетом тягового привода, вычислителей, освещения, связи, датчиков и резерва на возврат или безопасное завершение миссии. При выборе химической системы важны не только удельная энергия, но и допустимые токи, температурная стабильность, газовыделение, поведение при внутреннем коротком замыкании и возможность построения сертифицируемой батарейной сборки. Кроме того, для взрывозащищенного исполнения типы разрешенных электрохимических систем четко регламентированы и приведены в ГОСТ 31610.0-2019 и ГОСТ IEC 60079-1-2013.

Система управления аккумуляторной батареей должна контролировать напряжения элементов, ток, температуру, степень заряда и предельные режимы, однако наличие коммерческой системы не является само по себе мерой взрывозащиты. Необходима оценка ее отказов, выходных цепей и взаимодействия с элементами. Зарядка также должна рассматриваться как самостоятельный опасный режим: на ней возникают максимальные токи, тепловыделение, коммутация контактов и возможность газовыделения. Поэтому базовая станция робота должна проектироваться совместно с батареей и может выполнять не только заряд, но и диагностику, передачу накопленных данных и контроль готовности следующего цикла. Кроме того, зарядка батарей в шахте регламентируется «Правилами безопасности в угольных шахтах» [12], в частности – зарядка аккумуляторных батарей должна выполняться в зарядных камерах на зарядных столах. Однако герметичные аккумуляторные батареи с регулирующим клапаном и абсорбированным электролитом допускается заряжать вне зарядных камер, но только в выработках со свежей струей воздуха и при подключении через быстроразъемные взрывозащищенные соединители.

5.5. Измерительная система

Состав измерительной системы определяется назначением робота. К примеру, для инспекции конвейерных роlikоопор перспективно сочетание бесконтактного

температурного контроля, визуального канала и виброакустической информации. Для разведочного робота приоритет смещается к газоанализу, температуре и влажности атмосферы, тепловизионному поиску людей, трехмерному картографированию. Универсальная платформа может иметь сменный измерительный модуль, но разъемы, механическое крепление и программная конфигурация такого модуля также должны входить в подтвержденную безопасную конфигурацию.

6. Концепция проектирования взрывозащищенного шахтного робота

На основании выполненного анализа при проектировании шахтных роботов и роботизированных систем целесообразно использовать последовательность «назначение – опасности – архитектура – виды защиты – подтверждение», а не традиционный путь от выбранной мобильной платформы к последующему «добавлению взрывозащиты».

На первом этапе формализуется миссия: маршрут, зона, наличие людей, допустимость прекращения работы при появлении взрывоопасной среды, продолжительность цикла, полезная нагрузка и требования к связи. Именно эта информация определяет категорию оборудования и требуемый уровень защиты. На втором этапе робот декомпозируется на функции и физические источники энергии. Для каждого узла составляется перечень источников воспламенения в нормальном режиме, при ожидаемых неисправностях и при внешних воздействиях. На третьем этапе выбирается не один «главный» вид взрывозащиты, а минимально достаточное сочетание: мощные искроопасные узлы локализуются в «d», низкоэнергетические периферийные цепи выполняются «i», отдельные сборки герметизируются «m», активная оптика оценивается по «ор», а механика – по принципам «с» и, при необходимости, «b». Такая распределенная архитектура позволяет уменьшить массу и избежать чрезмерного помещения всей аппаратуры в одну тяжелую оболочку.

7. Перспективные направления и нерешенные вопросы

Регуляторным пробелом практического характера остается отсутствие единого документа, связывающего особенности автономного мобильного робота с требованиями оборудования группы I. Существующие технические регламенты и стандарты позволяют сформировать необходимый набор требований, но разработчик вынужден самостоятельно согласовывать робототехнические, электрические, механические, программные и другие аспекты. Поэтому перспективной задачей является разработка методических рекомендаций или профильного стандарта, задающего классификацию шахтных робототехнических систем, типовые опасности, требования к безопасным состояниям и правила применения существующих видов взрывозащиты к функциональным узлам. Недостаточно определенными остаются также вопросы автономной стыковки робота с базовой/зарядной станцией, если такая применяется.

Заключение

Применение роботов в угольных шахтах является технически обоснованным направлением повышения безопасности и регулярности производственного контроля, однако шахтная робототехника не может развиваться путем прямой адаптации общепромышленных мобильных платформ без системной переработки конструкции. Определяющими факторами являются взрывоопасная газовая и пылевая среда, загрязнение, ограниченные габариты, отсутствие спутниковой навигации, нестабильность связи, механические нагрузки и необходимость автономного питания.

Предлагаемая концепция основана на распределении способов взрывозащиты по функциональным узлам. Взрывонепроницаемая оболочка «d» целесообразна для мощных искроопасных узлов; «i» – для низкоэнергетических датчиков и интерфейсов; «m» – для отдельных электронных сборок и допустимых аккумуляторных решений; «ор» – для потенциально опасных оптических источников; принципы «с» и «b» – для механической

части. Такая комбинированная архитектура должна формироваться после анализа источников воспламенения и согласовываться с тепловым, энергетическим и механическим расчетом.

Список литературы:

1. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года : указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309. – Текст : электронный // Официальное опубликование правовых актов : [сайт]. – URL: <https://publication.pravo.gov.ru/document/0001202405070015> (дата обращения: 17.09.2026).
2. Певзнер, Л. Д. Робототехника в горном деле / Л. Д. Певзнер, М. Л. Ким // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 1. – С. 240–251.
3. Концепция создания беспилотного самоходного аппарата для работы в угольных шахтах. Ч. 1 / А. М. Липанов, В. Б. Артемьев, С. А. Петрушин [и др.] // Горная промышленность. – 2022. – № 5. – С. 52–63 ; Ч. 2 // Горная промышленность. – 2022. – № 6. – С. 36–44.
4. Шахрамьян, М. А. Универсальный роботизированный горноспасательный комплекс: сценарии применения в угольных шахтах / М. А. Шахрамьян // Уголь. – 2025. – № 4. – С. 86–88. – DOI 10.18796/0041-5790-2025-4-86-88.
5. Robots in mine search and rescue operations: a review of platforms and design requirements / R. Bakzadeh, V. Androulakis, H. Khaniani [et al.] // Frontiers in Robotics and AI. – 2026. – Vol. 13. – Art. 1857704. – DOI 10.3389/frobt.2026.1857704.
6. Wang, Y. The Encountered Problems and Solutions in the Development of Coal Mine Rescue Robot / Y. Wang // Journal of Robotics. – 2018. – Vol. 2018. – Art. 8471503. – DOI 10.1155/2018/8471503.
7. Development and applications of rescue robots for explosion accidents in coal mines / Y. Li, M. Li, H. Zhu [et al.] // Journal of Field Robotics. – 2020. – Vol. 37. – P. 466–489. – DOI 10.1002/rob.21920.
8. Guan, S. Design and engineering practice of explosion proof inspection robot of fully mechanized mining face / S. Guan // Coal Science and Technology. – 2025. – Vol. 53, No. 2. – P. 363–373. – DOI 10.12438/cst.2024-0287.
9. О безопасности машин и оборудования : Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 010/2011 : принят Решением Комиссии Таможенного союза от 18 октября 2011 г. № 823. – Текст : электронный // Евразийская экономическая комиссия : [сайт]. – URL: https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/203/P_823_1.pdf (дата обращения: 17.09.2026).
10. О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах : Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 012/2011 : принят Решением Комиссии Таможенного союза от 18 октября 2011 г. № 825. – Текст : электронный // Евразийская экономическая комиссия : [сайт]. – URL: https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/889/P_825_1.pdf (дата обращения: 17.09.2026).
11. Электромагнитная совместимость технических средств : Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 020/2011 : принят Решением Комиссии Таможенного союза

от 9 декабря 2011 г. № 879. – Текст : электронный // Евразийская экономическая комиссия : [сайт]. – URL: <https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/1ab/TehReg-TS-EMS.pdf> (дата обращения: 17.09.2026).

12. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» : приказ Ростехнадзора от 8 декабря 2020 г. № 507 : ред. от 20 февраля 2026 г. – Текст : электронный // КонсультантПлюс : [сайт]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372172/ (дата обращения: 17.09.2026).

References:

1. On the National Development Goals of the Russian Federation for the Period up to 2030 and for the Perspective up to 2036 : Decree of the President of the Russian Federation No. 309 of May 7, 2024. – Electronic text // Official Publication of Legal Acts : [website]. – URL: <https://publication.pravo.gov.ru/document/0001202405070015> (accessed: 17.09.2026).
2. Pevzner L.D., Kim M.L. Robotics in mining. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2014; 1:240-251.
3. Lipanov A.M., Artemyev V.B., Petrushin S.A. et al. Concept for an unmanned self-propelled vehicle for coal mines. Mining Industry. 2022; No 5. P. 52–63; No 6. P. 36–44.
4. Shakhramanyan M.A. Universal robotic mine rescue complex: application scenarios in coal mines. Ugol'. 2025;(4):86–88. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-4-86-88.
5. Bakzadeh R., Androulakis V., Khaniani H., Shao S., Hassanalian M., Roghanchi P. Robots in mine search and rescue operations: a review of platforms and design requirements // Frontiers in Robotics and AI. 2026. Vol. 13. Art. 1857704. DOI: 10.3389/frobt.2026.1857704.
6. Wang Y. The Encountered Problems and Solutions in the Development of Coal Mine Rescue Robot // Journal of Robotics. 2018. Vol. 2018. Art. 8471503. DOI: 10.1155/2018/8471503.
7. Li Y., Li M., Zhu H. et al. Development and applications of rescue robots for explosion accidents in coal mines // Journal of Field Robotics. 2020. Vol. 37. P. 466–489. DOI: 10.1002/rob.21920.
8. Guan S. Design and engineering practice of explosion proof inspection robot of fully mechanized mining face // Coal Science and Technology. 2025. Vol. 53, No. 2. P. 363–373. DOI: 10.12438/cst.2024-0287.
9. On Safety of Machinery and Equipment : Technical Regulation of the Customs Union TR CU 010/2011 : adopted by Decision No. 823 of the Customs Union Commission of October 18, 2011. – Electronic text // Eurasian Economic Commission : [website]. – URL: https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/203/P_823_1.pdf (accessed: 17.09.2026).
10. On Safety of Equipment for Operation in Explosive Atmospheres : Technical Regulation of the Customs Union TR CU 012/2011 : adopted by Decision No. 825 of the Customs Union Commission of October 18, 2011. – Electronic text // Eurasian Economic Commission : [website]. – URL: https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/889/P_825_1.pdf (accessed: 17.09.2026).
11. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment : Technical Regulation of the Customs Union TR CU 020/2011 : adopted by Decision No. 879 of the Customs Union

Commission of December 9, 2011. – Electronic text // Eurasian Economic Commission : [website]. – URL: <https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/1ab/TehReg-TS-EMS.pdf> (accessed: 17.09.2026).

12. On Approval of the Federal Norms and Rules in the Field of Industrial Safety “Safety Rules in Coal Mines” : Order of Rostekhnadzor No. 507 of December 8, 2020 : as amended on February 20, 2026. – Electronic text // ConsultantPlus : [website]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372172/ (accessed: 17.09.2026).