

На правах рукописи



КЛЕБАНОВ Дмитрий Алексеевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ПО СОЗДАНИЮ И ПРИМЕНЕНИЮ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ГРУ-
ЗОПЕРЕВОЗОК НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ**

Специальность 25.00.22 – «Геотехнология (подземная, открытая и строительная)»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА - 2015

Работа выполнена в Институте проблем комплексного освоения недр РАН, компании ОАО «ВИСТ Групп».

Научный руководитель: **Трубецкой Климент Николаевич**
академик РАН

Официальные оппоненты: **Гавришев Сергей Евгеньевич**
профессор, доктор технических наук, директор
Института горного дела и транспорта (ФГБОУ
ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

Пастихин Денис Валерьевич
профессор, кандидат технических наук,
заведующий кафедрой Московского Горного
Института (НИТУ МИСиС)

Ведущая организация: **ООО «НИИОГР», г. Челябинск**

Защита состоится «17» июня 2015 г. в 10 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 002.074.02 при Институте проблем комплексного освоения недр РАН по адресу: 111020, г. Москва, Крюковский тупик, 8-495-360-89-60

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института проблем комплексного освоения недр РАН

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

И.Ф.Жариков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Добыча полезных ископаемых с каждым годом ведется все в более сложных и опасных горно-геологических и климатических условиях. Разработка месторождений в условиях Крайнего Севера, пустынных и горных регионах с недостаточно развитой социальной инфраструктурой существенно осложняет участие человека в технологических процессах добычи полезных ископаемых, создает проблемы поиска высококвалифицированного персонала.

Этот факт отражен в долгосрочной программе развития угольной отрасли до 2030 года, где решающим фактором сохранения рентабельности и конкурентоспособности для подавляющего числа действующих угледобывающих предприятий остается проведение технической модернизации на основе новейших инновационных технологий, которая позволит также решить задачи снижения энергоемкости производства (сегодня она превышает в 2-3 раза показатели ведущих стран), экологической и промышленной безопасности, а также важнейшую проблему угольной отрасли – нехватку квалифицированных кадров, возможность добычи и разработку угольных месторождений в труднодоступных по природным и климатическим условиям местах.

Поэтому важнейшим направлением инновационного развития угольной промышленности является разработка технологий безлюдной выемки и транспортировки угля с применением современных программно-аппаратных комплексов, интегрированных в общую систему управления горнодобывающим предприятием. Справедливо утверждать, что указанные факторы сохранения рентабельности и конкурентоспособности имеют решающее значение и в целом для всей горнодобывающей промышленности. В этих условиях особую значимость приобретает проект «Интеллектуальный карьер», то есть создание системы автоматизированной и роботизированной добычи полезных ископаемых на открытых горных работах. При этом управление осуществляется как минимум дистанционно, а в общем случае – полностью автоматически. Реализация проекта «Интеллектуальный карьер» гарантирует повышение производительности и безопасности открытых горных работ за счет удаления человека из опасной зоны, эффективности открытых горных работ за счет устранения простоев, связанных с человеческими факторами и управления техникой в оптимальных режимах.

Межведомственная секция Научного совета РАН по проблемам горных наук «Интеллектуальное горное предприятие» определило указанный проект как одно из важнейших направлений инновационного развития горной отрасли, и этот проект был поддержан в 2013 году Грантовым комитетом фонда «Сколково».

В развитии направления роботизации скрыты наибольшие резервы повышения эффективности и безопасности горного производства. Внедрение безлюдных роботизированных технологий добычи полезных ископаемых кардинальным образом изменяет систему организации производства и труда на горнодобывающем предприятии и стимулирует появление новых современных технологий управления процессами разведки, добычи, транспортировки и переработки полезных ископаемых. Все это предопределяет актуальность научных работ в области разработки и применения **роботизированных систем грузоперевозок на открытых горных работах** - технологий транспортировки горной массы с использованием дистанционно-управляемой и роботизированной карьерной техники, как важнейшего этапа создания безлюдных геотехнологий освоения месторождений твердых полезных ископаемых.

Важно отметить, что создание безлюдных геотехнологий будет способствовать ускоренному развитию инновационных решений в области высокоточной спутниковой навигации ГЛОНАСС и программного обеспечения, а также робототехники и промышленной электроники, что, безусловно, приведет к укреплению научного и инженерного потенциала России.

Цель работы состоит в разработке и обосновании научно-технических и технологических решений по созданию и применению роботизированных систем грузоперевозок на открытых горных работах.

Основная идея диссертационной работы заключается в создании и применении роботизированных транспортных систем грузоперевозок для оптимизации движения автосамосвалов по маршруту в соответствии с горно-геологическими условиями, производственным заданием и требованиями безопасности.

Объектом исследования являются технологические процессы транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами при добыче полезных ископаемых открытым способом.

Предмет исследования – роботизированные системы грузоперевозок на открытых горных работах, взаимосвязь технологических параметров грузоперевозок и новых технических решений для их осуществления.

Методы исследований. В работе использованы методы системного, структурно-функционального и факторного анализа, научного обобщения, математической статистики, натурного эксперимента, математического моделирования технико-экономических показателей работы роботизированной системы грузоперевозок.

Для реализации поставленной цели проекта «Интеллектуальный карьер», а также разработки технико-технологических требований и решений для создания роботизиро-

ванной транспортной технологии грузоперевозок на открытых горных работах, в диссертации решаются **следующие задачи:**

- проведение анализа тенденций развития автоматизированных транспортных технологий грузоперевозок на горных предприятиях;
- обоснование научно-методических принципов и этапов реализации роботизированной системы грузоперевозок;
- разработка технических решений и требований для дистанционного и автономного управления карьерными автосамосвалами;
- разработка методики тестирования работы роботизированного карьерного автосамосвала в условиях полигона и горнодобывающего предприятия, проведение испытаний на полигоне завода ОАО «БЕЛАЗ»;
- разработка и обоснование технологических решений для организации роботизированных грузоперевозок на горном предприятии;
- проведение оценки экономической эффективности использования роботизированных систем грузоперевозок на открытых горных работах, разработка проектных решений по созданию и применению роботизированной системы грузоперевозок для условий ОАО «СУЭК-Хакасия».

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Научно-методические принципы создания роботизированных систем грузоперевозок на открытых горных работах, заключающиеся в обосновании направлений развития и модернизации основных программно-аппаратных компонентов (бортового оборудования, систем связи и навигации, программного обеспечения) автоматизированных систем управления горно-транспортными комплексами (АСУ ГТК) как основы для создания безлюдных геотехнологий добычи полезных ископаемых.
2. Комплекс научно-технических и технологических требований, решений для создания дистанционно управляемых и роботизированных карьерных автосамосвалов и систем грузоперевозок на открытых горных работах, включающих требования к бортовому оборудованию, программному обеспечению, безопасности и организации роботизированных грузоперевозок.
3. Математическая модель оптимизации и автоматической диспетчеризации работы роботизированных карьерных автосамосвалов, включенных в единую АСУ ГТК горного предприятия, позволяющая производить расчёт оптимальных маршрутов движения роботизированных автосамосвалов с учетом изменения внешних факторов движения, таких как перекрытие участка дороги, поломка одного из экскаваторов, корректировка плана грузоперевозок, изменение количества автосамосвалов на линии.

4. Методика тестирования роботизированных систем грузоперевозок на полигоне, включающая полный цикл ключевых технологических элементов работы роботизированного автосамосвала на открытых горных работах.

Научно-практическая новизна и личный вклад автора состоят в обосновании научно-методических принципов и этапов создания роботизированных систем грузоперевозок и разработке комплекса технико-технологических решений по их применению на открытых горных работах.

Обоснованность работы и достоверность положений, выводов и рекомендаций обусловлена представительным объемом исходных данных, экспериментальной проверкой разработанных технико-технологических решений в условиях заводского полигона ОАО «БелАЗ», а также использованием в работе широко апробированных методов математической статистики, моделирования процессов геотехнологий и робототехники.

Научное значение работы заключается в:

- обосновании научно-методических принципов и этапов создания роботизированных систем грузоперевозок на открытых горных работах и разработке архитектуры программного обеспечения, определяющего функциональность проектных решений;
- разработке математической модели оптимизации и автоматической диспетчеризации роботизированных карьерных автосамосвалов.
- разработке методики тестирования роботизированных транспортных систем грузоперевозок и проведении заводских испытаний дистанционно управляемого и автономного карьерного автосамосвала БелАЗ – 75131 с электромеханической трансмиссией на полигоне ОАО «Белорусский автомобильный завод»;

Практическое значение работы состоит в:

- разработке технико-технологических решений для дистанционного и автономного управления роботизированным карьерным автосамосвалом;
- проведении технико-экономического обоснования использования роботизированной транспортной системы грузоперевозок при открытой добыче полезных ископаемых;
- разработке метода автоматизированного контроля качества технологических дорог в условиях действующего карьера, базирующегося на анализе информации от инклинометров, датчиков давления в подвеске;
- разработке технического проекта роботизированных транспортных систем грузоперевозок на разрезе Черногорский ОАО «СУЭК-Хакассия».

Реализация выводов и рекомендаций работы

Основные результаты диссертационной работы нашли применение в плановых проектно-конструкторских разработках компании ОАО «ВИСТ Групп» на 2011-2015 гг. по разработке автоматизированных систем управления роботизированными комплексами для реализации проекта «Интеллектуальный карьер» и использованы в техническом проекте роботизированных технологий грузоперевозок в ОАО «СУЭК-Хакасия».

Апробация работы

Основные положения и результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались на Международных конференциях: «Российский рынок угля 2011» (Москва, 2011), «Энергетическая эффективность на предприятиях ГМК и промышленности» (Москва, 2012), «Рынок угля 2012: инфраструктура, экспорт, вызовы и перспективы» (Москва, 2012), а также на международных форумах «Роснанофорум» (Москва, 2011) и «Digital Mining SAP Conference» (ЮАР, Йоханнесбург, 2013), Советствии заместителя председателя правительства Республики Саха (Якутия) (Якутск 2013), международной научной конференции и форуме по спутниковой навигации Навитех-2014, научном симпозиуме «Неделя Горняка» (Москва, 2013, 2014, 2015), совещании у заместителя министра промышленности РФ на выставке «Иннопром 2014» (Екатеринбург 2014).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 научных статей, в том числе 8 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 106 наименований, изложена на 145 страницах и содержит 64 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований по созданию автоматизированных и роботизированных систем управления открытыми горными работами, их цель, идея, а также сформулированы задачи для достижения цели диссертации, приведены сведения о новизне научных положений, практической ценности, отмечен личный вклад автора.

В первой главе проведен анализ современного состояния и перспектив развития роботизированного технологического карьерного транспорта на горных предприятиях. Показано, что важнейшим и необходимым фактором организации производства и управления при ведении горных работ на современном этапе является применение ав-

томатизированных систем управления горно-транспортными комплексами (рисунок 1), позволяющих повысить производительность труда и безопасность открытых горных работ. Теоретические и практические аспекты организации производства и управления открытыми горными работами были подробно рассмотрены в работах российских и советских ученых: Н.В.Мельникова, В.В.Ржевского, К.Н.Трубецкого, М.Г.Потапова, В.Л.Яковлева, Ю.И.Анистратова, В.А.Галкина, П.Л.Мариева и многих других ученых и инженеров.

Бурное развитие навигационных и телекоммуникационных технологий, вычислительной техники и программного обеспечения, робототехники и промышленной электроники позволили вплотную подойти к возможности разработки и практической реализации безлюдных технологий ведения открытых горных работ на действующих горных предприятиях на основе дистанционно управляемой и роботизированной карьерной техники. Данные технологии должны быть включены в существующие процессы управления горно-транспортным комплексом.

Основные общие тенденции и направления развития современных отечественных и зарубежных АСУ ГТК заключаются в следующем:

- использование высокоскоростных надежных беспроводных средств радиосвязи, позволяющих передавать в диспетчерский центр большие объемы телеметрической и видеоинформации о состоянии оборудования и горных работах;

- использование средств высокоточной спутниковой навигации, позволяющих управлять и контролировать работу оборудования с сантиметровой точностью;

- широкое применение специализированного программного обеспечения для оптимизации работы и автоматической диспетчеризации горно-транспортного оборудования;

- использование многофункциональных систем удаленной диагностики, информационно-диагностических систем для контроля эксплуатационных и технических параметров горно-транспортного оборудования.

Все эти факторы определяют техническую и технологическую возможность перехода к безлюдным технологиям добычи полезных ископаемых на основе дистанционно управляемого горного оборудования и роботизированных карьерных автосамосвалов, обеспечивающих частичное или полное исключение человека из процессов непосредственного управления оборудованием в зоне ведения горных работ.

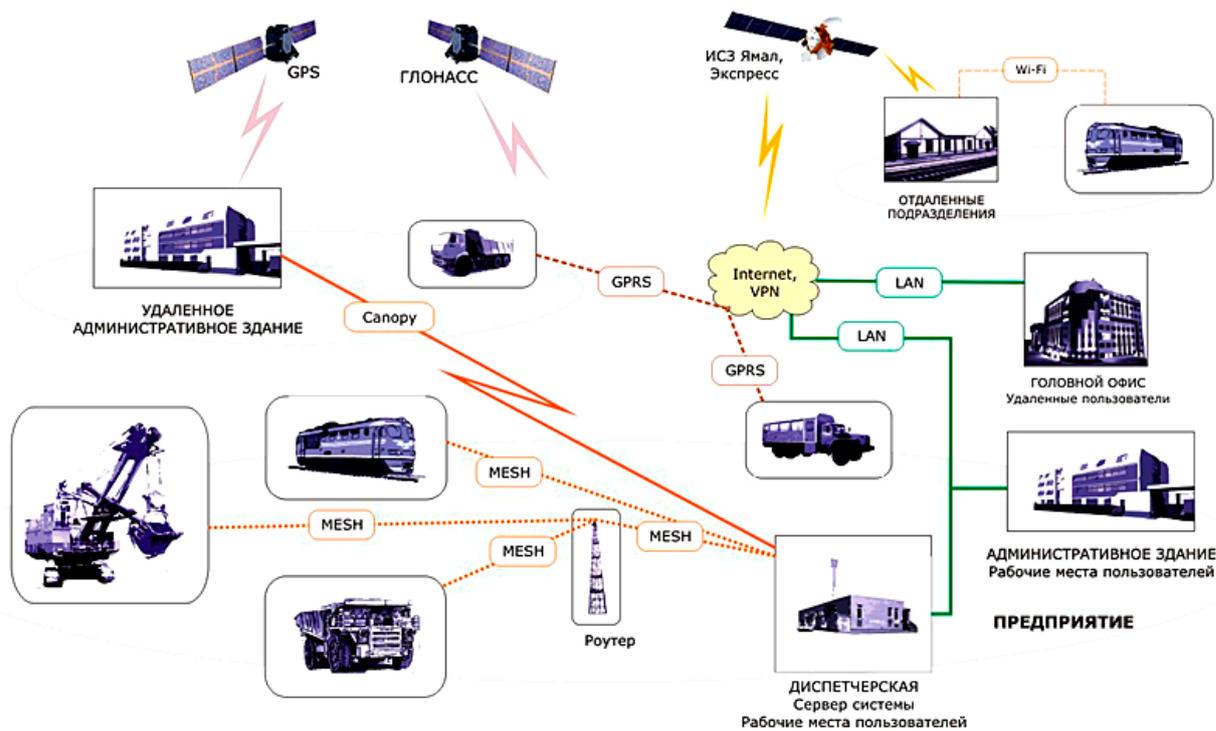


Рисунок 1 – Структурная схема АСУ ГТК

Во второй главе диссертации рассмотрены научно-методические основы создания и применения роботизированных систем грузоперевозок полезных ископаемых на открытых горных работах. Для реализации проекта «Интеллектуальный Карьер» и широкого применения безлюдных технологий на открытых горных работах сформулированы и обоснованы научно-методические принципы создания роботизированных систем грузоперевозок, заключающиеся в обосновании направлений и факторов развития основных программно-аппаратных компонентов АСУ ГТК, к которым относятся бортовое оборудование, система навигации, система беспроводной передачи данных и диспетчерский центр, где установлено серверное программное обеспечение, управляющее процессами грузоперевозок.

В случае роботизированной системы грузоперевозок *бортовое оборудование* автосамосвалов должно быть модернизировано. Необходимо предусмотреть несколько независимых бортовых компьютеров (контроллеров) с соответствующими группами сенсоров, отвечающих за решение отдельных задач автоматического управления: интеллектуальная система распознавания препятствий; бортовой комплекс для осуществления дистанционного управления техникой; центральный управляющий бортовой компьютер для решения задач управления техникой и согласования взаимодействия всех бортовых программных подсистем.

Навигационное оборудование модернизируется в соответствии со следующим принципом. На карьерную технику необходимо установить оборудование системы высокоточной навигации. На автосамосвалы и другую горную технику для более точного и надежного определения координат, даже при кратковременном отсутствии данных от дифференциальной станции или отсутствии видимости спутников, необходимо

установить системы инерциальной навигации, основанные на гироскопах. Совместное использование спутниковой и инерциальной систем навигации позволит обеспечить высокую точность и надежность определения местоположения и ориентации техники в пространстве.

В современных системах управления горно-транспортными комплексами используются системы *беспроводной передачи данных*, а также комбинации таких систем: УКВ – связь, транкинговые системы, широкополосные системы передачи данных, сотовые системы связи. Для построения роботизированных систем грузоперевозок необходимо применение широкополосных систем и технологий беспроводной передачи данных: WiFi, WiMax, MESH-системы и др., обеспечивающих высокую скорость, необходимую для передачи видеоизображений, диагностической информации и решения задач оперативного управления роботизированной горной техникой.

Один из основных принципов построения *программного обеспечения* роботизированной системы грузоперевозок заключается в следующем. Для достижения максимальной производительности системы необходимо, чтобы карьерная техника не останавливалась и не прекращала своей работы даже при кратковременном отсутствии связи или задержке в обработке данных на сервере. Для этого необходимо обеспечить максимальную автономность бортового программного обеспечения, которое позволит продолжать движение или работу техники даже при кратковременном отсутствии связи с сервером. Бортовое программное обеспечение помимо функций управления рабочими органами карьерной техники, контроля расстояний до препятствий, распознавания препятствий, определения местоположения и ориентации должно осуществлять безопасное движение по заранее заданному маршруту, а также обеспечить возможность разъезда с другими участниками движения без участия центрального сервера системы. За сервером диспетчерского центра необходимо оставить функции контроля за безопасностью движения, прогнозирования опасных ситуаций и оповещения оператора при возникновении нештатных ситуаций, когда требуется непосредственное удаленное управление автосамосвалами и другой техникой, решение оптимизационных задач и ведение цифровой модели карьера, а также общую функцию автоматической диспетчеризации и оптимизации работы ГТК.

Для последовательной отработки технологий применения роботизированных систем грузоперевозок на открытых горных работах необходимо выделить следующие этапы:

- 1) разработка роботизированной системы грузоперевозок горной массы автосамосвалами по фиксированному маршруту между стационарными пунктами погрузки-разгрузки;

2) создание роботизированной системы грузоперевозок горной массы автосамосвалами между экскаваторами и пунктами разгрузки без оснащения дистанционным управлением экскаваторов и другой техники;

3) создание роботизированной системы грузоперевозок горной массы автосамосвалами с использованием дистанционно-управляемой техники (экскаваторов, бульдозеров, погрузчиков и др.).

Создание роботизированной системы грузоперевозок является ключевым этапом реализации проекта “Интеллектуальный карьер”, для разработки такой системы необходимы технические и технологические решения по дистанционному и автономному управлению карьерным автосамосвалом и организации его движения по заданному маршруту на открытых горных работах.

В третьей главе разработаны технические требования и решения для создания технологии применения дистанционно-управляемого и автономного карьерного автосамосвала как основного элемента роботизированных систем грузоперевозок, а также архитектура программного обеспечения системы.

В обобщенную структуру системы дистанционного управления карьерным автосамосвалом должны быть включены бортовой программно-аппаратный комплекс и специально оборудованное рабочее место оператора.

Бортовой контроллер обеспечивает управление пневмостартерным пуском двигателя, рулевым механизмом, тормозной системой, оборотами дизельного двигателя, режимами работы тягового электропривода, опрокидывающим механизмом, системой освещения, световой и звуковой сигнализации по командам оператора, передаваемых по каналу беспроводной передачи данных от контроллера рабочего места оператора. Для сохранения ручного режима управления автосамосвалом входы/выходы контроллера подключаются параллельно соответствующим электрическим цепям задействованных органов управления, исполнительных механизмов и устройств автосамосвала.

Основным отличием автономного (роботизированного) автосамосвала от автосамосвала с дистанционным управлением является возможность его работы в автоматическом режиме под управлением бортового компьютера с использованием данных системы высокоточной спутниковой навигации (возможна интеграция с инерциальной навигационной системой для обеспечения надежности навигационных измерений), системы предотвращения столкновений на основе лазерного дальномера и радаров. Оператор, находящийся в удаленном рабочем месте (диспетчерском центре), может обеспечивать контроль работы автосамосвала и, при необходимости, задание маршрута движения и выключение автономного режима. Обобщенная структурная схема автономного автосамосвала представлена на рисунке 2.

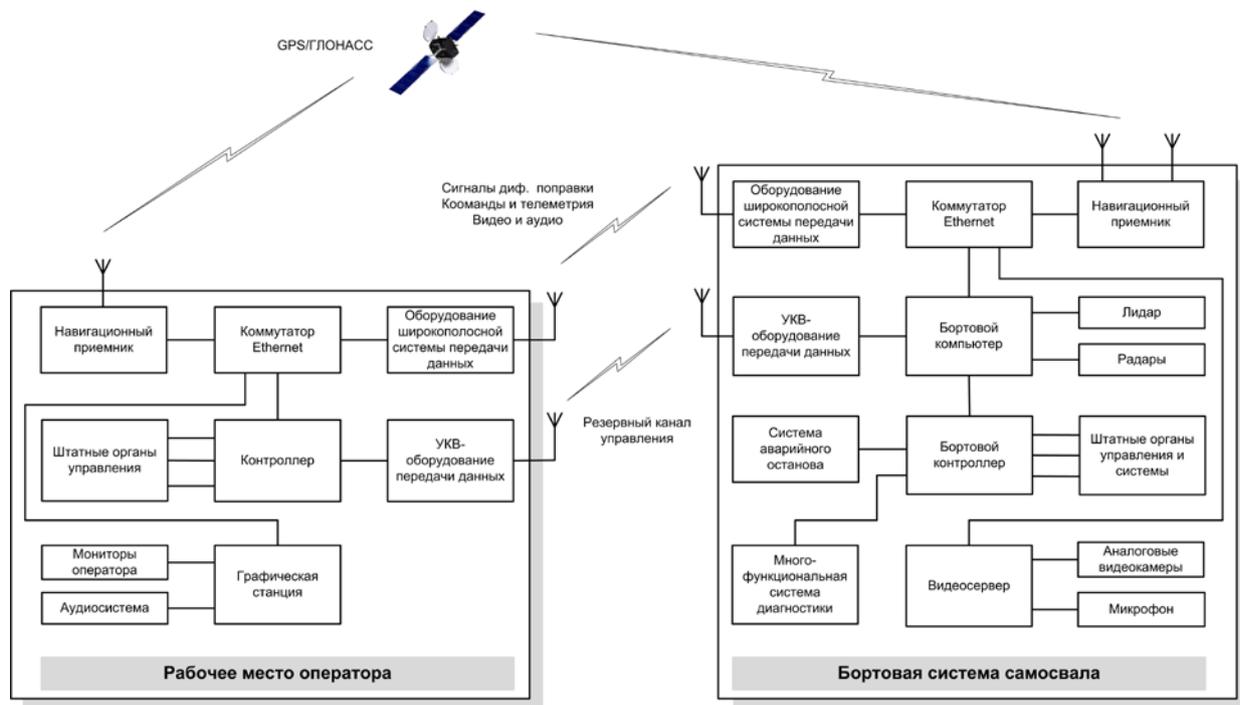


Рисунок 2 – Обобщенная структурная схема автономного автосамосвала

Система должна обеспечивать высший приоритет ручного управления перед автоматическим (дистанционным) режимом. Для обеспечения сантиметровой точности позиционирования и автономного движения по записанному маршруту с учетом ширины дороги для данного типа автосамосвала осуществляется дифференциальная коррекция сигналов спутниковых систем с помощью контрольного навигационного приемника ГЛОНАСС/GPS, называемого базовой станцией. Базовая станция устанавливается в точке с известными географическими координатами.

При применении безлюдных технологий ряд элементов конструкции автосамосвалов становятся избыточными. Такими элементами могут быть: кабина автосамосвала, фонари, другое оборудование, связанное с использованием автосамосвала водителем. Наши работы по созданию роботизированных систем грузоперевозок могут послужить катализатором создания новых концептуальных моделей карьерных автосамосвалов будущего. Данные автосамосвалы принципиально имеют другую конструкцию, причем за счет устранения кабины из конструкции автосамосвала может быть проработано увеличение грузоподъемности автосамосвала (объем кузова).

В четвертой главе разработаны технологические требования и решения для создания и применения технологии роботизированной системы грузоперевозок, а также рассмотрены общие требования к технологической инфраструктуре и безопасности ведения горных работ.

Роботизированный участок горных работ (рисунок 3) включает: выделенный маршрут движения автосамосвалов, автономные (роботизированные) автосамосвалы, бункер или экскаватор, пункт разгрузки: склад или отвал, грейдер для дорожных работ, бульдозер для работы на складе или отвале. Для управления технологическими

операциями роботизированной системы грузоперевозок развертывается центр управления в составе: рабочее место водителя (дистанционный пульт управления), рабочее место диспетчера, сервер, оборудование системы передачи данных, базовая станция дифференциальной поправки.

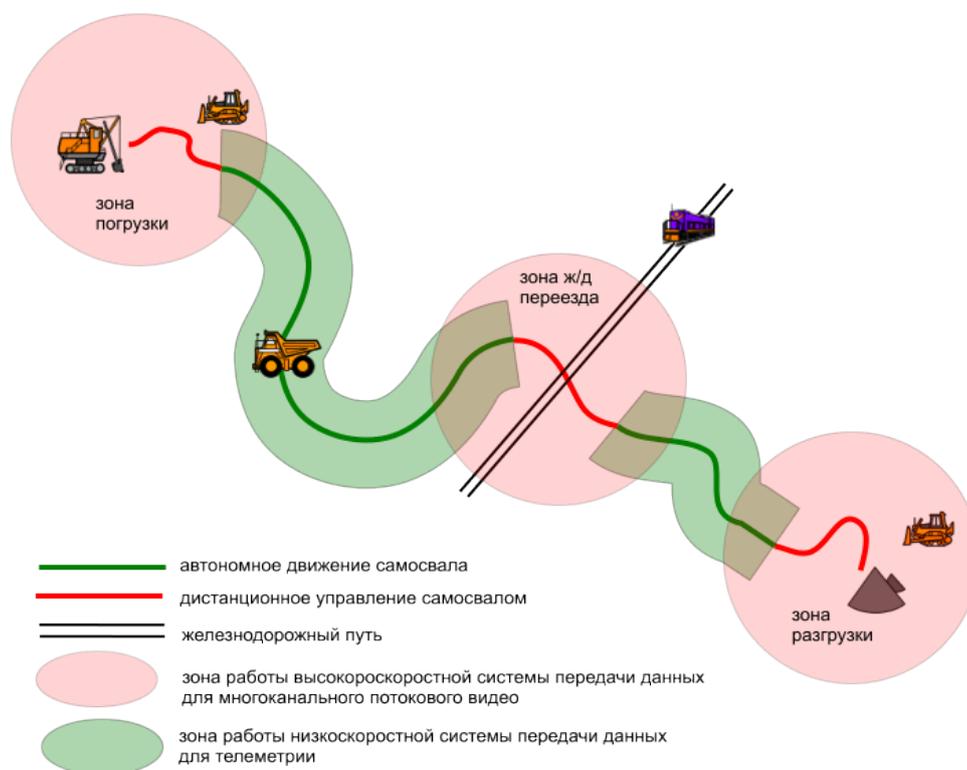


Рисунок 3 – Состав роботизированного участка грузоперевозок

Серверное программное обеспечение должно обеспечивать организацию цикла движения роботизированных карьерных автосамосвалов на линии, который включает следующие стадии: готовность автосамосвала к автономному движению из места технического обслуживания или заправки; расчет оптимального маршрута под загрузку; подготовка маршрута с атрибутами; контроль и управление движением; прибытие к экскаватору; получение сигнала об окончании загрузки; расчет оптимального места разгрузки; подготовка маршрута с атрибутами; контроль и управление движением; расчет нового маршрута или отправка на техническое обслуживание и ремонт или заправку. При постановке автономного автосамосвала под погрузку (рисунок 4) должны быть обеспечены: отсутствие коллизий между автосамосвалами на погрузке за счет выделения зоны погрузки и зоны ожидания погрузки, точное позиционирование автосамосвалов под погрузку. Пункт разгрузки карьерных автосамосвалов (рисунок 5) должен быть разделен на две зоны: зону разгрузки и зону работы бульдозера. В целях безопасности, должна быть выделена зона ожидания разгрузки роботизированного карьерного автосамосвала. В работе определены требования к обеспечению возможности разъездов встречных роботизированных автосамосвалов на маршруте, движения по-

путных роботизированных автосамосвалов, а также совместной работы (движения) роботизированных автосамосвалов и карьерной техники, управляемой операторами непосредственно из кабины.

Для обеспечения функционирования роботизированной системы грузоперевозок необходимо создание соответствующей инфраструктуры, в работе определены общие требования к ее организации на открытых горных работах.

В настоящее время основные требования к ведению горных работ, определены в Федеральных нормах и правилах в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Новая версия правил, изданная в 2014 году, допускает применение безлюдных технологий для ведения горных работ, что позволяет горнодобывающим компаниям организовывать опытные роботизированные участки горных работ и согласовывать технологию работ с местными органами РОСТЕХНАДЗОРа.

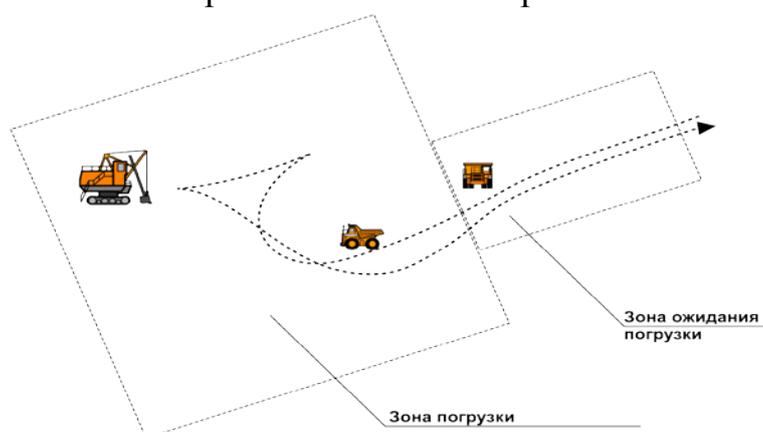


Рисунок 4 – Постановка роботизированного автосамосвала под погрузку

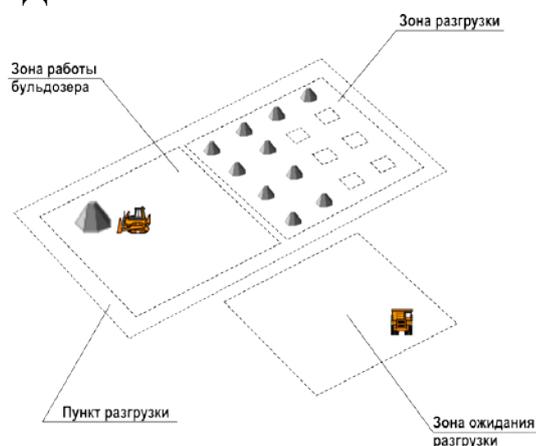


Рисунок 5 – Зоны пункта разгрузки

При использовании роботизированных систем грузоперевозок, такие параметры геотехнологии, как угол уклона дороги, угол откоса борта карьера, скорость движения роботизированных автосамосвалов на линии могут быть увеличены, а ширина технологических дорог - уменьшена, по сравнению с традиционной технологией отработки месторождений открытым способом. В диссертационной работе обосновывается необходимость учета технических параметров роботизированных систем грузоперевозок (скорость передачи данных, точность систем навигации и позиционирования роботизированного автосамосвала, распознавания препятствий и проч.) при выборе параметров открытой геотехнологии, наряду с технологическими факторами и горно-геологическими условиями. Экономический эффект от изменения параметров геотехнологии открытой разработки месторождений при использовании роботизированных систем грузоперевозок может быть весьма значительным и требуются дальнейшие детальные исследования и обоснования норм проектирования открытых горных работ в случае применения роботизированной карьерной техники.

Для функционирования роботизированной системы грузоперевозок и высокой производительности карьерных автосамосвалов, сохранения срока службы их основ-

ных узлов и агрегатов, снижения расхода топлива, и увеличения сроков эксплуатации шин должно быть обеспечено соответствующее качество технологических дорог. Контроль качества технологических дорог становится важнейшей задачей, в связи с отсутствием визуального контроля за участками дороги водителем автосамосвалов, а также требованиям к поддержанию курсовой устойчивости.

Программное обеспечение должно осуществлять автоматический контроль качества технологических дорог, выполнять количественную оценку параметров качества дороги, а также отображать на цифровой карте карьера информацию о местоположении проблемных участков дорожного полотна и оценивать типы «плохих» дорог, для включения их в оптимизационные алгоритмы распределения автосамосвалов между пунктами погрузки и разгрузки.

В общем случае, исходной информацией для расчета типов некачественного дорожного покрытия являются данные телеметрии, передаваемые от роботизированных автосамосвалов: давление в передних и задних подвесках, скорость движения автосамосвала, выбранная передача, показания инклинометра, а также показания лидаров. Методика автоматизированной оценки качества технологической дороги на основе контроля уклонов и давления в подвесках была апробирована на одном из угольных разрезов Кузбасса.

В случае если в состав роботизированной системы грузоперевозок включаются несколько автосамосвалов, пунктов погрузки и разгрузки, то возникает задача оптимизации работы такой системы за счет оптимального распределения роботизированных автосамосвалов на маршруте в соответствии с производственным планом. В работе разработана математическая модель оптимизации и автоматической диспетчеризации работы роботизированных карьерных автосамосвалов при транспортировке грузов на горном предприятии. Исходной информацией для математической модели являются данные о каждом автосамосвале, в которую входят: местоположение, масса и вид перевозимого груза, пункт разгрузки – положение и вид принимаемого груза, данные об экскаваторе – положение и вид груза, а также о графе дорог, описывающий дороги, где каждый участок соответствует ребру и характеризуется длиной, шириной, высотой подъёма и качеством. Математическая модель обеспечивает оптимальное распределение роботизированных карьерных автосамосвалов по маршрутам в соответствии с алгоритмом распределения техники на основании сменно-суточного планирования работы карьера и горнодобывающего предприятия, критериев оптимизации, характерных для данного участка горных работ. Модель не имеет ограничений на количество критериев оптимизации и может адаптироваться для конкретных горнотехнических, геологических и организационных условий предприятия. В общем виде математическая модель распределения роботизированных автосамосвалов на маршруте может быть представлена уравнением:

$$F = k1*M + k2*L + k3*H + k4*KR + \sum ki*Fi,$$

где M – перевезённая всеми автосамосвалами масса (т); L – пройденное расстояние, (м); H – высота (м); KR – суммарный показатель качества использованных дорог; $k1, k2, k3, k4$ – коэффициенты приоритетов оптимизации; ki, Fi – прочие коэффициенты оптимизации грузоперевозок.

По итогам расчета для каждой вершины дерева на последнем этапе получаем набор значений оценочной функции $F1, F2, \dots$ и выбираем ту ветвь, на которой оценочная функция получает наибольшее значение в соответствии с определенными заранее весами оптимизационных коэффициентов. Перерасчёт оптимальных маршрутов движения роботизированных автосамосвалов в алгоритме производится также в случае изменения внешних факторов, например, при перекрытии участка дороги, поломки одного из автосамосвалов, изменении оптимизационных коэффициентов и др.

В диссертации разработана методика тестирования основных технологических операций роботизированного автосамосвала и описан опыт проведенных испытаний на полигоне ОАО «БЕЛАЗ», на котором был смоделирован карьер площадью примерно 10 га. На полигоне был оборудован центр дистанционного управления, обозначены площадки технического обслуживания автосамосвала/заправки, погрузки и разгрузки, а в качестве технологической дороги использовалась испытательная трасса с переменным профилем и поворотами.

Для воспроизведения реального производственного цикла погрузочно-разгрузочных работ были использованы погрузчик на месте погрузки и бульдозер на месте разгрузки. Погрузчик и бульдозер управлялись операторами из кабины. При выполнении технологических операций использовался автономный и дистанционный режимы управления карьерным автосамосвалом.

Основными задачами тестирования роботизированной технологии грузоперевозок являются:

- оценка возможности и выявление технологических требований выполнения роботизированным автосамосвалом функций транспортировки груза по фиксированному маршруту между стационарными пунктами погрузки-разгрузки во взаимодействии с погрузчиком и бульдозером;

- проверка соответствия динамических характеристик автосамосвала заданным требованиям при движении по прямой с постоянной скоростью, с разгоном и торможением, маневрировании, а также движении задним ходом по прямой на соответствующем отрезке маршрута.

В разработанной методике тестирования роботизированной системы грузоперевозок отработаны все основные технологические этапы работы роботизированного автосамосвала на маршруте от пункта погрузки до пункта разгрузки, в связи с этим можно считать данную методику универсальной и в дальнейшем использовать при тестирова-

нии работы роботизированных автосамосвалов на участках горных работ. Приведенную методику тестирования роботизированного карьерного автосамосвала предполагается использовать на роботизированном участке грузоперевозок в ОАО «СУЭК- Хакасия».

В пятой главе разработано технико-экономическое обоснование применения роботизированных технологий грузоперевозок на открытых горных работах, определены факторы повышения производительности техники и эффективности выполняемых работ. Факторами повышения производительности при использовании роботизированных автосамосвалов являются:

- исключение нетехнологических простоев, связанных с человеческим фактором. К таким простоям относятся: перерыв на обед, пересменка, другие простои;

- снижение простоев, связанных с климатическими условиями, запыленностью после БВР, загазованностью участков горных работ;

- снижение списочной численности водителей автосамосвалов. Появляются операторы, которые контролируют движение автосамосвалов, способные в случае возникновения нештатных ситуаций перевести автосамосвал в режим дистанционного управления и провести его по маршруту. Соотношение операторов: 1 оператор контролирует движение 4 автономных автосамосвалов;

- снижение эксплуатационных затрат на содержание и обслуживание автосамосвалов (шины, дизельное топливо, фонд оплаты труда, расходные материалы и т.д.), связанных с некорректным управлением, усталостью водителей. Данный показатель сложно просчитать и пока роботизированный участок грузоперевозок не внедрен и не апробирован, нет возможности предоставить статистику по данному фактору;

- возможность сокращения капитальных затрат на строительство социальной инфраструктуры при освоении новых месторождений;

- возможность вести горные работы в условиях и на участках, где непосредственное нахождение людей запрещено или ограничено.

На основе перечисленных факторов возможно универсально рассчитывать обоснованность применения роботизированной системы грузоперевозок на открытых горных работах и оценивать целесообразность ее использования по сравнению с традиционной схемой автосамосвальных грузоперевозок. Для общего случая расчета обоснованности использования роботизированной системы грузоперевозок целесообразно ввести функцию $f(t)$, определяющую разницу экономии от использования роботизированной системы грузоперевозок и затрат на ее внедрение и эксплуатацию. Основные статьи экономии (затрат) при использовании роботизированных автосамосвалов: z_1 : затраты на персонал, включая операторов роботизированной техники; z_2 : затраты/экономия на сервис и обслуживание техники; z_3 : затраты/экономия на ДТ, потраченное на маршруте использованной техникой; z_4 : экономия за счет увеличения производительности работы автосамосвалов; z_5 : экономия за счет перевозки тех же объемов меньшим количеством автосамосвалов; z_6 : затраты/экономия на капитальное

строительство и инфраструктуру; z_7 : затраты на обслуживание роботизированной системы грузоперевозок; z_8 : затраты на бортовое оборудование и сервер роботизированной системы грузоперевозок.

$z(t)$ - затраты на внедрение и дальнейшее владение роботизированной системой грузоперевозок; $k(t)$ - экономия в год по сравнению со стандартной технологией автосамосвальных грузоперевозок.

$$K(t) = z_1(t) + z_2(t) + z_3(t) + z_4(t) + z_5(t) + z_6(t) + z_7(t) + z_8(t);$$

$$f(t) = \sum_{i=1}^t (k(t) - z(t)),$$

Руководству горного предприятия необходимо определить требования к окупаемости использования роботизированных систем грузоперевозок и оценить при каком количестве лет функция $f(t) > 0$ удовлетворяет их политике окупаемости инвестиций.

Данный подход к расчету окупаемости и экономической целесообразности роботизированной системы грузоперевозок применен для роботизированной системы грузоперевозок на участке «породный бункер - отвал» разреза «Черногорский» (ОАО «СУЭК-Хакассия»).

В рамках диссертационной работы разработаны проектные решения по созданию роботизированной системы грузоперевозок на участке «породный бункер-отвал» разреза «Черногорский» (ОАО «СУЭК-Хакассия»). Общая схема участка работы роботизированных автосамосвалов представлена на рисунке 6.

Роботизированная система грузоперевозок на разрезе «Черногорский» должна обеспечивать управление комплексом горного оборудования при работе роботизированных автосамосвалов на маршруте от пункта загрузки до пункта разгрузки (отвала). Цикл работы роботизированных автосамосвалов должен включать в себя поэтапную загрузку платформы в первой и во второй точках породного бункера обогатительной фабрики, движение до пункта разгрузки, заезд на площадку ожидания (при необходимости), разгрузку и обратно.

Пункт разгрузки автосамосвала будет разделен на две зоны:

1. Зона разгрузки автосамосвала. В зоне разгрузки определены точки разгрузки на которых последовательно разгружаются автосамосвалы. Текущая точка разгрузки определяется системой автоматически для каждого роботизированного автосамосвала.

2. Зона работы бульдозера;

Пункт загрузки находится на территории обогатительной фабрики (ОФ). На этапе *опытной* эксплуатации заезд роботизированного автосамосвала под погрузку производится в режиме дистанционного управления. Начало и окончание загрузки контролируется оператором бункера. На этапе *опытно-промышленной* эксплуатации заезд под

загрузку роботизированного автосамосвала производится в режиме автономного управления. Начало и окончание загрузки контролируется оператором через пульт дистанционного управления (ПДУ). На этапе *промышленной* эксплуатации заезд под загрузку роботизированного автосамосвала производится в режиме автономного управления. Начало и окончание загрузки контролируется автоматически.



Рисунок 6 – Схема маршрута роботизированных автосамосвалов на участке «породный бункер-отвал» разреза «Черногорский»

На этапе *промышленной* эксплуатации, на участке запускаются в работу несколько автосамосвалов БелАЗ-75137, работающих в режиме автономного управления, включая заезд под погрузку и разгрузку. Оператор пульта дистанционного управления (ПДУ) берет на себя управление автосамосвалом по команде технического специалиста в случае возникновения аварийных ситуаций и невозможности продолжения работы автосамосвала в режиме автономного управления. Для участка горных работ «породный бункер - отвал» разреза «Черногорский» был произведен расчет показателей эффективности внедрения и использования роботизированной системы грузоперевозок, который показывает, что при сохранении текущего количества автосамосвалов и при достижении плановых сроков внедрения системы 6-9 месяцев, затраты окупаются менее чем за 2 года. Данное значение свидетельствует об экономической обоснованности внедрения и применения роботизированных систем грузоперевозок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой дано решение актуальной научно-практической задачи разработки и обоснования технических и технологических решений по созданию и применению ро-

ботизированных систем грузоперевозок на открытых горных работах. Основные выводы и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведен анализ современного состояния, перспектив и общих тенденций развития автоматизированных систем управления горно-транспортным комплексом, обоснована техническая и технологическая возможность создания роботизированных систем грузоперевозок на основе модернизации основных программно-аппаратных компонентов АСУ ГТК.

2. Сформулированы и обоснованы научно-методические принципы создания и технологии применения роботизированных систем грузоперевозок на открытых горных работах, определяющие направления развития основных компонентов АСУ ГТК. Обосновано, что применение роботизированных систем грузоперевозок на открытых горных работах является основным (ключевым) этапом реализации проекта «Интеллектуальный карьер».

3. Разработаны технические требования, решения и архитектура программного обеспечения для создания и применения роботизированного и дистанционно-управляемого карьерного автосамосвала, как основного элемента безлюдных технологий грузоперевозок, а также определены перспективные направления по модернизации конструкции роботизированного карьерного автосамосвала.

4. Определены общие требования к организации инфраструктуры роботизированной системы грузоперевозок на открытых горных работах и обоснованы технологические условия работы роботизированных карьерных автосамосвалов: разъезд со встречной карьерной техникой; движение в колонне; пересечение технологических дорог; подъезд к экскаватору (бункеру); разгрузка; контроль качества технологических дорог. Определены условия и основные правила безопасности при применении дистанционно управляемых и автономных карьерных автосамосвалов на линии.

5. С использованием предложенной методики тестирования роботизированной системы грузоперевозок проведены испытания роботизированного карьерного автосамосвала БелАЗ-75137 в условиях полигона ОАО «БЕЛАЗ».

6. Разработана математическая модель оптимизации и автоматической диспетчеризации технологии применения роботизированных карьерных автосамосвалов, включенных в единую АСУ ГТК горного предприятия, позволяющая производить расчёт оптимальных маршрутов движения роботизированных автосамосвалов с учетом изменения внешних факторов движения, таких как перекрытие участка дороги, поломка одного из экскаваторов, корректировка плана грузоперевозок, изменение количества автосамосвалов на линии.

7. Установлены основные факторы повышения эффективности горных работ при использовании роботизированных систем грузоперевозок, предложена методика расчета их экономической целесообразности.

8. Разработан технический проект по использованию роботизированной системы грузоперевозок на участке «обогащительная фабрика-отвал» Черногорского угольного

разреза ОАО «СУЭК-Хакасия» и получена оценка экономической эффективности ее использования. Ожидаемый срок окупаемости всех затрат на ввод в действие роботизированной системы грузоперевозок составит не более 2 лет.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, В КОТОРЫХ ОПУБЛИКОВАНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Клебанов Д.А. Интеллектуальные системы управления горнотранспортными комплексами: современное состояние, задачи и механизмы решения / И.О.Темкин, Д.А.Клебанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Труды международного симпозиума “Неделя Горняка” (Москва, 27-31 января 2014 г.).– 2014 - Отдельный выпуск №1 – С. 257-266.
2. Клебанов Д.А. Резервы повышения операционной эффективности горнодобывающих компаний: ремонты оборудования / А.В.Батаев, Д.А.Клебанов // Горная промышленность – 2013 - №5 (111) –С. 47-49.
3. Клебанов Д.А. Принципы построения системы дистанционного и автономного управления карьерным самосвалом / Д.А.Клебанов, И.В.Кузнецов, Н.В.Бигель // Горная промышленность – 2013 - №4 (110) - С. 8-13.
4. Клебанов Д.А. Основы создания и научно-технические этапы реализации роботизированной системы грузоперевозок на действующих горных предприятиях / К.Н.Трубецкой, Д.А.Клебанов, С.В.Ясюченя // Горный журнал – 2013 - №10 - С. 67-73.
5. Клебанов Д.А. Комплексная система управления промышленной безопасностью и оценки рисков на горнодобывающих предприятиях / А.И.Перепелицин, Е.Е.Китляйн, Д.А.Клебанов // Горный журнал – 2012 - №6 - С. 82-85.
6. Клебанов Д.А. Современное состояние и перспективы развития систем управления горно-транспортными комплексами на горнодобывающих предприятиях Украины/ Д.А.Клебанов, М.А.Макеев // Горная промышленность – Специальный выпуск 2011 – С. 106-108.
7. Клебанов Д.А. К вопросу о техническом аудите АСУ транспортными комплексами на горных предприятиях / Д.А.Клебанов // Автоматизация в промышленности – 2010 - №1 – С. 53-56.
8. Клебанов Д.А. Контроль качества дорог на горнодобывающих предприятиях / Н.В.Одинцев, Д.А.Клебанов // Горная Промышленность – 2009 - №3 (85) - С. 24-26.

В прочих изданиях:

9. Клебанов Д.А. Применение технологий высокоточной спутниковой навигации в горнодобывающей отрасли / Д.А.Клебанов, М.А.Макеев // Недропользование XXI – 2010 - №5 – С. 34-36.