

Николаев Пётр Игоревич

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ
КОМПЛЕКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ
ТЕХНОЛОГИЙ ПРОВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК
ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТИЗАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Кемерово 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ УУХ СО РАН)

Научный руководитель: Зиновьев Василий Валентинович
кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук»

Официальные оппоненты: Ордин Александр Александрович
доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории подземной разработки угольных месторождений Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук»

Степанов Юрий Александрович
доктор технических наук, профессор кафедры ЮНЕСКО по информационным вычислительным технологиям Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кемеровский государственный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Защита состоится _____ 2021 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28. Тел.: (3842) 39-63-36. E-mail: rector@kuzstu.ru
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте <http://science.kuzstu.ru/activities/gos-attestation/soresearchers/>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

М.А. Тюленев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В Российской Федерации при добыче угля подземным способом проходят более 430 км горизонтальных и наклонных подготовительных выработок в год, в основном комбайновым и буровзрывным способами, с тенденциями повышения скорости проходки и усложнения горно-геологических условий. При этом, от общешахтных показателей при проходческих работах трудоемкость составляет более 25%, доля занятых горнорабочих с нахождением в опасной призабойной зоне – около 20%, удельный вес травмированных работников достигает 40%.

Концепция передового развития угольных шахт направлена на освоение технологий без постоянного присутствия людей в забоях за счет внедрения автоматизации и роботизации, которое влечёт за собой существенное повышение не только безопасности и скорости, но и себестоимости проходческих работ. Из-за отсутствия нормативных методик по рациональному назначению элементов автоматизации и роботизации в технологии проведения горных выработок прецеденты их внедрения без должного научного обоснования единичны и зачастую ограничиваются дистанционным управлением горными машинами. В то же время автоматизация и роботизация технологических процессов оказывает комплексное влияние на показатели эффективности проходческих работ, делая задачу дискретной оптимизации их основных параметров многофакторной и не поддающейся классическому аналитическому решению.

Необходимый для достаточной точности учёт динамики и вероятностной природы технологических процессов влечёт за собой кратное увеличение вычислительной сложности выбора оптимальных параметров технологий проведения горных выработок. Современные методы решения задач дискретной оптимизации параметров сложных технических систем включают методы имитационного моделирования и эволюционной оптимизации, включающие полный перебор вариантов при приемлемом расчётном времени. Однако, разработка и реализация актуальной методики в условиях применения типовых технологий проведения горных выработок комбайновым и буровзрывным способами невозможны без комплексного подхода, задающего потенциальный уровень автоматизации и роботизации технологических процессов, критерии оптимизации основных параметров, параметры интеграции имитационного моделирования в эволюционный алгоритм.

Таким образом, актуально решение научно-технической задачи комплексной оптимизации параметров технологий проведения основных горизонтальных и наклонных горных выработок комбайновым и буровзрывным способами при автоматизации и роботизации технологических процессов.

Диссертация выполнена в рамках тем государственных заданий на научные исследования и разработки ФАНО России №007-01169-16 (2016 г.), №007-01581-17-02 (2017 г.), №007-00411-18-00 (2018 г.), Минобрнауки России №0352-2019-0007 (2019 г.), при поддержке РФФИ проект №13-07-98023 «Разработка и моделирование безлюдных технологий подземной добычи твердых полезных ископаемых» (2013-2015 гг.), №16-47-420490 «Моделирование и обоснование технологий разработки угольных месторождений подземным и открыто-подземным способами без постоянного присутствия людей в забоях» (2016-2017 гг.).

Цель работы: обоснование и разработка методики комплексной оптимизации параметров технологий проведения горных выработок при автоматизации и роботизации технологических процессов для повышения безопасности и эффективности ведения горных работ в угольных шахтах.

Основная идея работы заключается в интеграции методов имитационного моделирования в эволюционный алгоритм оптимизации основных параметров автоматизируемых и роботизируемых технологий проведения горных выработок при комплексном учёте влияния динамики и вероятностной природы технологических процессов, с разрешением противоречий между условиями безопасности и эффективности ведения горных работ.

Объект исследования: параметры технологий проведения основных горизонтальных и наклонных горных выработок комбайновым и буровзрывным способами при подготовке и отработке угольных пластов.

Предмет исследования: процесс комплексной оптимизации параметров типовых технологий проведения горизонтальных и наклонных горных выработок комбайновым и буровзрывным способами при автоматизации и роботизации технологических процессов.

Задачи исследований:

1. Установить зависимость числа возможных вариантов функционального назначения элементов автоматизации и роботизации технологических процессов в комбайновые и буровзрывные технологии проведения горных выработок от многообразия типовых моделей горных машин;

2. Выявить комплексный критерий оптимизации параметров типовых комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок, учитывающий влияние автоматизации и роботизации на безопасность и эффективность работ, а также динамику и вероятностную природу технологических процессов;

3. Разработать методику комплексной эволюционной оптимизации параметров типовых комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок с элементами автоматизации и роботизации на разных уровнях, при учёте динамики и вероятностной природы технологических процессов.

Методы исследований:

– системно-функциональный подход в рамках методологии системно-функционального моделирования IDEF0, теория множеств, комбинаторный анализ для решения первой задачи;

– теория оптимизации и системный анализ для решения второй задачи;

– имитационное моделирование, методы верификации и валидации имитационных моделей, эвристическая оптимизация эволюционным алгоритмом, теория вероятностей и математическая статистика, теория планирования эксперимента.

Научные положения, защищаемые автором:

1. Число возможных рациональных вариантов функционального назначения элементов автоматизации и роботизации в типовые комбайновые и буровзрывные технологии проведения горных выработок есть последовательное произведение числа типовых моделей горных машин, пригодных для работы в заданных горнотехнических условиях для каждого основного

технологического процесса, на пять уровней их автоматизации и роботизации.

2. Комплексный критерий оптимизации параметров типовых комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок при их автоматизации и роботизации, стремящийся к минимуму при $0 < K < 2\sqrt{3}$, необходимо и достаточно разрешает противоречие между показателями среднего хронологического числа горнорабочих в забое, удельных времени и стоимости работ, значения которых определяют методом имитационного моделирования для учёта динамики и вероятностной природы технологических процессов.

3. Разработанная методика, основанная на интеграции метода имитационного моделирования в качестве функции полезности в адаптированный эволюционный алгоритм оптимизации, необходимо и достаточно количественно определяет основные оптимальные (субоптимальные) параметры типовых комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок при автоматизации и роботизации технологических процессов.

Научная новизна работы заключается в:

1. Расширении области поиска более чем на 99% при оптимизации параметров комбайновой и буровзрывной технологий проведения горных выработок за счёт не рассматриваемых ранее вариантов частичной автоматизации и роботизации основных технологических процессов в заданных горнотехнических условиях, порождённых пятью уровнями автоматизации и роботизации основных технологических процессов.

2. Разработке комплексного критерия оптимизации параметров K , разрешающего противоречия между требованиями одновременного обеспечения безопасности и эффективности горных работ, отличающегося повышением точности поиска оптимальных (субоптимальных) параметров типовых комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок.

3. Разработке методики комплексной оптимизации параметров технологий проведения горных выработок, отличающейся комплексным учётом влияния динамики и вероятностной природы технологических процессов, уровней их автоматизации и роботизации, на безопасность, скорость и стоимость проходческих работ.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

– применением апробированных классических методов имитационного моделирования, теории вероятностей, математической статистики и оптимизации, планирования имитационных экспериментов;

– удовлетворительной сходимостью (расхождение не более 10%) результатов имитационного моделирования с результатами, полученными на реальных объектах – шахтах Кузбасса, и результатами аналитических расчетов в упрощенной детерминированной постановке задачи.

Личный вклад автора заключается в:

– анализе результатов известных исследований в области автоматизации и роботизации типовых технологий проведения горных выработок, методов рационального назначения элементов автоматизации и роботизации в технологии горного дела, а также в постановке и выполнении задач научного исследования, в разработке методик проведения имитационных экспериментов,

обработке и анализе полученных результатов, в обосновании, разработке и формулировке научных положений диссертационной работы и их научной новизны;

- разработке системно-функциональных моделей типовых комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок и обосновании пяти уровней автоматизации и роботизации основных технологических процессов;

- созданию реляционной базы данных основных параметров и моделей горных машин типовых комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок на языке Transact-SQL;

- установлении зависимости числа возможных вариантов функционального назначения элементов автоматизации и роботизации технологических процессов в комбайновые и буровзрывные технологии проведения горных выработок от многообразия типовых моделей горных машин;

- выявлении комплексного критерия оптимизации параметров комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок, учитывающего влияние факторов автоматизации и роботизации на безопасность и эффективность работ, динамику и вероятностную природу технологических процессов;

- адаптации имитационных моделей комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок под возможность автоматизации и роботизации основных технологических процессов с учётом их влияния на показатели эффективности технологий, верификации и валидации этих моделей;

- создании программного комплекса «Система имитационного моделирования технологий проходки» с проведением оптимизационных экспериментов по модернизации технологий проведения горных выработок шахт Кузбасса;

- обосновании и разработке методики комплексной оптимизации параметров типовых комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок с элементами автоматизации и роботизации, учитывающей динамику и вероятностную природу технологических процессов;

- составлении рекомендаций по оптимизации параметров комбайновой технологии проведения вентиляционного штрека №557 шахты «Чертинская-Коксовая» и буровзрывной технологии проведения трех наклонных стволов для условий шахты «Увальная».

Отличие от ранее выполненных работ заключается в учёте автоматизации и роботизации технологических процессов, их динамики и вероятностной природы при оптимизации параметров комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок, что позволяет учесть ранее не рассматриваемые варианты их частичной автоматизации и роботизации.

Научное значение работы заключается в развитии неклассических методов эволюционной оптимизации параметров типовых технологий проведения горных выработок комбайновым и буровзрывным способами при комплексном учёте влияния динамики и вероятностной природы технологических процессов, а также уровней их автоматизации и роботизации.

Практическое значение работы заключается в обосновании оптимального назначения автоматизации и роботизации в основные технологические процессы типовых технологий проведения горных выработок без постоянного присутствия людей в забоях, с целью повышения безопасности и эффективности горных работ.

Реализация работы.

– «Методика оптимизации параметров геотехнологий проведения горных выработок с элементами автоматизации и роботизации» утверждена АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», рекомендована Научно-исследовательским институтом горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ» к реализации на угледобывающих предприятиях и в проектных организациях;

– создан комплекс компьютерных программ «Система имитационного моделирования технологий проходки» (свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2020661781 от 01.10.2020);

– полученные на основе «Методики...» с использованием Системы имитационного моделирования рекомендации по оптимизации параметров технологий проведения горных выработок с элементами автоматизации и роботизации использованы ООО «ММК-УГОЛЬ» Шахта «Чертинская-Коксовая» при подготовке Паспорта на проведение вентиляционного штрека №557. Применение рекомендаций снижает трудоемкость работ на 23% и повышает безопасность их ведения за счет сокращения среднего хронологического числа горнорабочих в опасной зоне забоя на 44%;

– научные и практические результаты диссертационной работы используются в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» при обучении студентов направления 21.05.04 «Горное дело», профиля 05 «Шахтное и подземное строительство».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на Ежегодной региональной конференции молодых учёных ФИЦ УУХ СО РАН «Развитие» (2016-2019 гг.), Всероссийской конференции с международным участием «Индустриальные информационные системы – 2015», Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых учёных «Горняцкая смена» (2017, 2019 гг.), Международной научно-практической конференции «Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов», Девятой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2019).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 2 – в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 3 – в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных публикаций Web of Science и Scopus, 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из 125 страниц, включая введение, 4 главы, заключение, список литературы из 129 наименований, приложение; содержит 43 рисунка, 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведено состояние вопроса по изученной проблеме.

Автоматизация и роботизация процессов проходческого цикла позволяют передать машинам функционал, выполняемый горнорабочими в забое, и уменьшить вероятность травм. Для уменьшения инвестиционных рисков при автоматизации и роботизации необходима оценка результата, что требует разработки методик рационального выбора параметров горнотехнических систем.

Работы в направлении рационального обоснования параметров горнотехнических систем вели В. И. Клишин, В. А. Хмяляйнен, О. В. Тайлаков, А. А. Ордин, В. В. Першин, А. И. Копытов, Ю. А. Степанов, П. В. Егоров, В. А. Федорин, А. Е. Майоров, В. В. Гетман, В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов, В. В. Окольнишников, В. Ф. Демин, А. А. Мешков, С. В. Рудометов, Р. Димитракопулос, Ю. А. Хохолов, А. А. Ботвинник, А. А. Антонов и др.

Рациональное внедрение машин и механизмов в горное производство исследовали Э. О. Миндели, Н. М. Покровский, Ю. А. Дмитрак, М. В. Корнеев, Е. И. Рогов, В. Л. Конюх, О. В. Тайлаков, А. А. Ордин, Г. К. Клюкин, В. А. Соловьёв, Г. А. Стрельцова, А. М. Ткаченко, А. С. Оганесян и др. В систематизацию информации о средствах автоматизации и роботизации горного производства внесли значительный вклад П. А. Лыхин, Н. А. Глебов, А. Г. Журавлёв, П. И. Тарасов, В. Н. Опарин, В. Л. Конюх, В. Н. Фрянов, Л. Д. Павлова, Е. П. Русин, А. П. Тапсиев, А. М. Фрейдин, А. С. Ваганов, Л. В. Урусов, М. Ройтер и др.

Применение современных информационных технологий для оптимизации параметров сложных производственно-экономических систем исследовали А. А. Емельянов, М. А. Хивинцев, А. С. Окопов, И. М. Космачева, А. Т. Гурьев, Д. А. Петросов, П. В. Афонин, Г. Л. Бекларян, А. Л. Бекларян и др.

Исследованиями параметров технологий проведения горных выработок, вопросами автоматизации и безопасности подземных горных работ занимались такие организации, как ИУ СО РАН, КузНИИШахтострой, КузНИУИ, КузГТУ, СибГИУ, ИГД им. А.А. Скочинского, ИГД СО РАН, ИПКОН РАН, МИСиС, Санкт-Петербургский горный университет, ИГД УрО РАН, МГГУ, ТулГУ.

Литературный анализ показал, что современные методы принятия решений по выбору рациональных параметров проходческих работ при их автоматизации и роботизации не позволяют комплексно учитывать варианты сочетаний горнотехнических и экономических параметров, комплектацию горных машин, возможность их автоматизации и роботизации, динамику горных работ и их вероятностную природу, что делает задачу оптимизации параметров технологий проведения горных выработок трудноформализуемой. Прецеденты автоматизации и роботизации технологий проведения горных выработок единичны и зачастую ограничиваются дистанционным управлением горными машинами.

По результатам первой главы обоснована актуальность работы, сформулированы цель, идея, задачи исследования.

Во второй главе приведено решение первой задачи.

Для поиска множества нетрадиционных вариантов модернизации типовых технологий проведения горных выработок посредством автоматизации и роботизации применен системно-функциональный подход (методология IDEF0 – ГОСТ Р 50.1.028-2001). Каждый технологический процесс проходческого цикла представлен в виде взаимосвязанных моделей «чёрного ящика» (рис. 1). Процессы технологии проведения горных выработок объединены в множество P . Для каждого технологического процесса выделены операции, участвующие в его информационном обеспечении: «сканирование поверхности горной выработки», «распознавание объектов в выработке», «позиционирование горной машины», «управление перемещением горной машины», «наведение исполнительных органов горной машины». Исследована совместимость различных вариантов автоматизации и роботизации технологических операций, позволяющая корректно их комбинировать. Выделены пять возможных и достаточных уровней автоматизации и роботизации процессов проходческого цикла.



Рисунок 1. Системно-функциональный анализ на примере технологического процесса «погрузка горной массы»

Уровень 1. Отсутствие автоматизации. Все интеллектуальные технологические операции выполняются горнорабочими. Показатели эффективности уровня стандартные.

Уровень 2. Дистанционное управление. Все интеллектуальные технологические операции осуществляются горнорабочими, но визуальный обзор выработки производится посредством видеокамер. Уровень характеризуется меньшим присутствием горнорабочих в забое, низкими затратами на реализацию и замедлением исполнения технологических операций.

Уровень 3. Реализация «технического зрения». Сканирование горной выработки производится средствами «технического зрения» – лазерными сканерами или эхолотами. Горнорабочий дистанционно управляет горной

машиной по 3D-модели выработки. Преимущество данного способа состоит в том, что «техническое зрение» даёт более точное изображение по сравнению с видеокамерой, это позволяет рабочему точнее выполнять технологические операции. Внедрение данного уровня значительно дороже предыдущих.

Уровень 4. Реализация «технического зрения» и автоматического перемещения горных машин. Посредством «технического зрения» производится автоматическое сканирование горной выработки. Распознавание полученной 3D-модели выработки и объектов, находящихся в ней, а также управление перемещением горных машин по выработке осуществляется при помощи нейронных сетей. Горнорабочий контролирует перемещение горных машин, а основные технологические операции выполняет дистанционно. Уровень обладает еще более высокой стоимостью исполнения по сравнению с предыдущим.

Уровень 5. Полная роботизация. Горные машины автоматически выполняют все интеллектуальные технологические операции: с помощью «технического зрения» сканируют горные выработки, с помощью нейросетей распознают объекты, автономно выполняют перемещение по выработкам и манипуляции рабочими органами. Горнорабочий выполняет роль контролёра нескольких горных машин. Данный вариант является самым затратным из-за использования дорогих комплектующих и подразумевает почти полное исключение нахождения горнорабочих в забое, а также высокую скорость исполнения технологических операций за счёт оптимизации режимов работы роботизированного оборудования.

Для поиска исходного множества параметров технологии проведения горных выработок элементы множества P многозначно отображаются в множество исполнителей технологических процессов M (формула 1), состоящее из столько подмножеств, сколько технологических процессов в данной технологии проведения горных выработок (формула 2).

$$f: P \rightarrow M; \quad (1)$$

$$M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}, \text{ где } n = |P|. \quad (2)$$

Для нахождения множества вариантов автоматизации и роботизации проходческих работ R элементы подмножеств M_1, M_2, \dots, M_n размещаются на технологические процессы P_1, P_2, \dots, P_n с учётом пяти возможных уровней роботизации. Каждый вариант описывается как размещение длиной n из подмножеств M_1, M_2, \dots, M_n предложений по исполнению технологических процессов $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$, где $x_i \in M_i$ для $1 \leq i \leq n$. Примером такого размещения может служить *«проходческий комбайн Joy 12HM46 с максимальным уровнем роботизации, самоходные вагоны 5BC15M с максимальным уровнем роботизации, анкероустановочная машина Sandvik DS411 с дистанционным управлением»*.

Множество параметров технологии проведения горных выработок при автоматизации и роботизации основных процессов определяется как полное произведение пятикратной мощности каждого из подмножеств исполнителей технологических процессов (формула 3).

$$|R| = \prod_{i=1}^n 5 \cdot |M_i|. \quad (3)$$

В третьей главе приведено решение второй задачи.

При использовании классических методов при оценке эффективности технологий проведения горных выработок не учитывают время нахождения горнорабочих в опасной зоне забоя, варианты частичной автоматизации технологических процессов. Также ввиду сложности задачи не учитывается многовариантность ведения проходческих работ, динамика взаимодействия горных машин, вероятностный характер выполнения технологических операций. Это затрудняет нахождение оптимальных параметров проходческих работ.

Для учёта безопасности горнорабочих при ведении проходческих работ предложен комплексный критерий оптимизации с показателями в формате международной системы единиц: удельное время ведения проходческих работ T [с/м³], удельная стоимость ведения проходческих работ C [руб./м³], среднее хронологическое число горнорабочих в забое N [чел.]. Доказано, что для сведения данных скалярных показателей в один критерий достаточно использовать квадратичную нелинейную свёртку по Парето, а оптимизацию свести к минимизации значения критерия. Для возможности использования в одном критерии показателей, имеющих различные размерности и масштабы, предложено нормирование – деление значений показателей на нормирующий делитель – среднее значение между минимальным и максимальным значением каждого показателя при заданных горнотехнических условиях. После нормирования комплексный квадратичный критерий оптимизации принимает вид:

$$K = 2 \sqrt{\frac{T^2}{(T_{max} + T_{min})^2} + \frac{N^2}{(N_{max} + N_{min})^2} + \frac{C^2}{(C_{max} + C_{min})^2}}, K \rightarrow \min, \quad (4)$$

где T – удельное время ведения проходческих работ, N – среднее хронологическое число горнорабочих в забое, C – удельная стоимость проходки, C_{max} , C_{min} , T_{max} , T_{min} , N_{max} , N_{min} – максимальные и минимальные значения показателей проходческих работ – удельной стоимости, удельного времени ведения проходческих работ и среднего хронологического числа горнорабочих в забое соответственно – при заданных горнотехнических условиях. На составляющие критерия оптимизации накладываются следующие ограничения: $C_{max} > 0$, $C_{min} \geq 0$, $N_{max} > 0$, $N_{min} \geq 0$, $T_{max} > 0$, $T_{min} \geq 0$. Отсюда следует, что значения комплексного критерия оптимизации варьируются в области $K \in (0; 2\sqrt{3}]$.

Выделены параметры, влияющие на показатели эффективности технологий проведения горных выработок. Для удобства представления параметры сгруппированы в следующие группы: 1. Физико-механические свойства горных пород F_G ; 2. Горнотехнические параметры F_T ; 3. Параметры горных машин (факторы оптимизации): производственные параметры F_O ; скоростные параметры F_V ; параметры нахождения горнорабочих в забое F_N ; 4. Экономические параметры F_C (факторы оптимизации); 5. Прочие параметры F_O .

Оптимум находится по критерию, сводящему воедино три зависимости, в которых удельное время ведения горнопроходческих работ, среднее хронологическое число горнорабочих в забое и удельная стоимость ведения горнопроходческих работ определяются по функциям (5), (6) и (7) соответственно:

$$T = f1(F_G, F_T, F_O, F_V, F_O) \rightarrow \min; \quad (5)$$

$$N = f2(F_G, F_T, F_O, F_V, F_O, F_N) \rightarrow \min; \quad (6)$$

$$C = f3(F_G, F_T, F_O, F_V, F_O, F_C) \rightarrow \min. \quad (7)$$

В результате решаемая математическая задача принимает вид условной многокритериальной (три целевых функции в комплексном критерии) многофакторной оптимизации (36 факторов для буровзрывной и 19 факторов для комбайновой технологий). Совокупность всех комбинаций факторов представляет собой множество параметров технологии проведения горных выработок R .

Для исследования влияния автоматизации и роботизации технологий проведения горных выработок на их показатели эффективности проведено исследование поставленной задачи в упрощённой постановке для условий буровзрывной (проведение наклонных стволов сечением 32-34 м² под углом 12-18° по породе крепостью 8-12 по шкале проф. М. М. Протодяконова) и комбайновой (проведение вентиляционного штрека сечением вчерне 14,7 м² под углом 4-6° с присечкой породы крепостью 3-4 по шкале проф. М. М. Протодяконова) технологий. В обоих экспериментах были получены области решений задачи оптимизации с Парето-сферой, указывающей на оптимальный вариант (рис. 2).

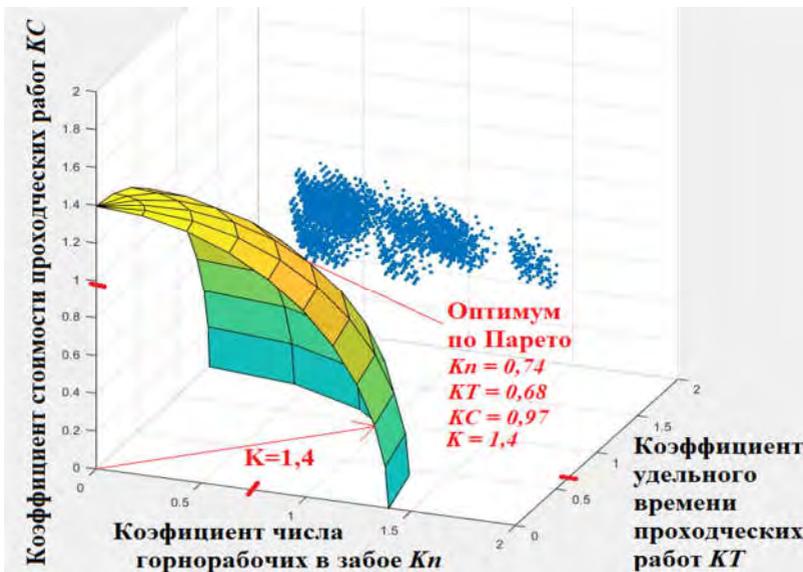


Рисунок 2. Задача многокритериальной оптимизации параметров проходческих работ в упрощённой постановке на примере буровзрывной технологии

Доказано, что оптимальные параметры технологии проведения горных выработок получаются при частичной автоматизации и роботизации, позволяющей рационально уменьшить среднее хронологическое число горнорабочих в забое без значительного удорожания проходческих работ. Также доказано, что при использовании комплексного критерия оптимизации K учёт динамики и вероятностной природы технологических процессов проходческого цикла при их автоматизации и роботизации позволил повысить точность оптимизации основных параметров технологии на 6,2% для буровзрывной технологии и на 4,7% для комбайновой технологии (табл. 1 и 2).

Таблица 1. Результаты оптимизации для комбайновой технологии проведения вентиляционного штрека в условиях ш. «Чертинская-Коксовая»

Параметры критерия K	Оптимизация без учёта динамики и вероятностной природы технологических процессов	Оптимизация с учётом динамики и вероятностной природы технологических процессов	Отклонение, %
Среднее число горнорабочих в забое, чел	1,53	1,63	6,5
Удельное время проходческих работ, мин/м ²	14,00	14,77	5,5
Удельная стоимость проходческих работ, руб./м ³	2 080	2 183	4,9
Значение критерия K	1,04	1,09	4,7

Таблица 2. Результаты оптимизации для буровзрывной технологии проведения наклонных стволов в условиях ш. «Увальная»

Параметры критерия K	Оптимизация без учёта динамики и вероятностной природы технологических процессов	Оптимизация с учётом динамики и вероятностной природы технологических процессов	Отклонение, %
Среднее число горнорабочих в забое, чел	0,98	1,11	13,3
Удельное время проходческих работ, мин/м ³	17,84	19,08	6,9
Удельная стоимость проходческих работ, руб./м ³	1 610	1 652	2,6
Значение критерия K	1,32	1,4	6,2

В четвертой главе приведено решение третьей задачи.

Современные аналитические методы позволяют рассчитывать параметры технологий проведения горных выработок с известными погрешностями, так как не учитывают динамику взаимодействия горных машин во времени и пространстве и вероятностную природу технологических процессов. Созданные в Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН имитационные модели проходческих работ модернизированы сегментами, учитывающими различные варианты автоматизации и роботизации процессов проходческого цикла.

Обоснованная многовариантность ведения проходческих работ требует применения методов оптимизации, исключающих полный перебор возможных вариантов. Аналитические методы оптимизации требуют явно заданной математической зависимости, которую при решении многомерных оптимизационных задач с множеством локальных оптимумов получить трудозатратно, а зачастую невозможно. При использовании генетического алгоритма оптимизации достаточно определить функцию полезности системы с помощью

имитационного моделирования. Исходя из этого, для решения задачи оптимизации параметров технологий проведения горных выработок при автоматизации и роботизации их основных технологических процессов разработана методика, состоящая из шести этапов.

На первом этапе методики случайно формируется множество комплектов горных машин с различными уровнями их автоматизации и роботизации.

На втором этапе обозначенные комплекты горных машин связываются попарно, и для каждой пары создаётся дополнительная пара комплектов, параметры которых являются случайной комбинацией ранее существующих.

На третьем этапе каждый комплект горных машин с элементами автоматизации и роботизации оценивается по критерию оптимизации (4) с помощью имитационной модели. Имитационное моделирование позволяет найти значения оптимизируемых параметров (5), (6), (7) для заданных физико-механических свойств горных пород и горнотехнических условий, с учётом динамики и вероятностной природы технологических процессов.

На четвёртом этапе комплекты горных машин с элементами автоматизации и роботизации сортируются по уменьшению значения критерия оптимизации (4). Половина с наибольшими значениями критерия удаляются из расчётов, а остаются комплекты, в которых значения критерия (4) минимальны.

На пятом этапе комплекты горных машин случайным образом меняют параметры во избежание «застывания» алгоритма в локальных оптимумах.

На шестом этапе идёт проверка, уменьшилось ли среднее значение критерия оптимизации (4) множества по сравнению с предыдущим. Если оно не уменьшалось несколько циклов подряд, алгоритм завершает работу и представляет результат в виде оптимальных либо субоптимальных параметров для заданных физико-механических свойств горных пород и горнотехнических условий. Иначе алгоритм возвращается ко второму шагу.

Методика программно реализована как «Система имитационного моделирования технологий проходки» (СИМТП) (рис. 3).

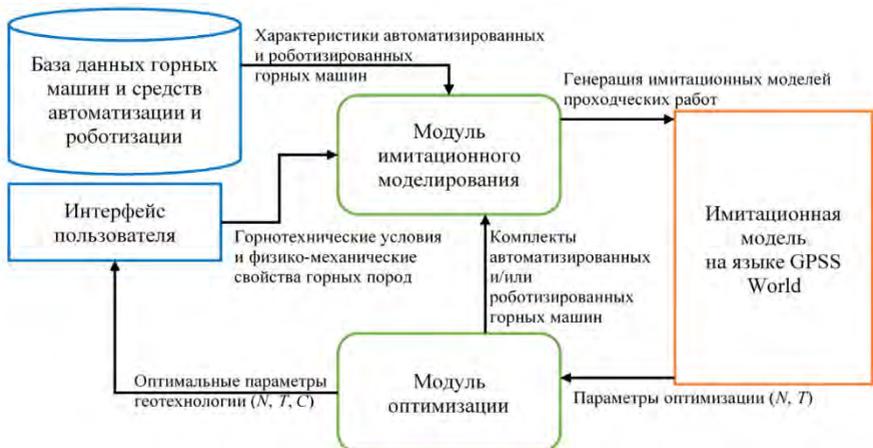


Рисунок 3. Структура «Система имитационного моделирования технологий проходки» (СИМТП)

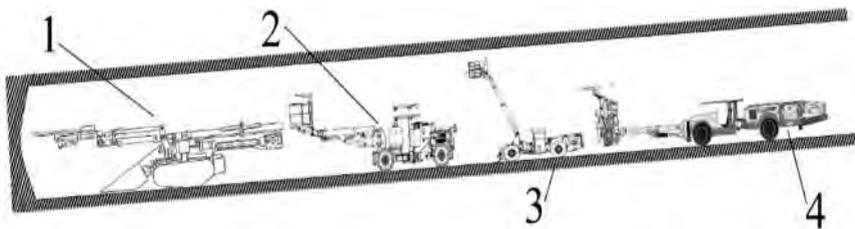
Пользователь через интерфейс вводит физико-механические свойства горных пород и горнотехнические условия, на основании которых алгоритмы базы данных комбинируют комплекты из подходящих горных машин и средств их автоматизации и роботизации. Затем Модуль имитационного моделирования генерирует модель ведения проходческих работ на основе скомбинированного комплекта.

После запуска модели посредством интерпретатора GPSS World формируется отчет с результатами моделирования, которые передаются в Модуль оптимизации для последующей обработки. Подобным образом создается следующая модель с другим комплектом горных машин. Так происходит до тех пор, пока не будут найдены оптимальные или субоптимальные параметры технологии проведения горных выработок по критерию K (4). Результат оптимизации выводится на Интерфейс пользователя.

Проверка работы СИМТП проводилась для условий проведения трёх наклонных стволов длиной 1,53 км буровзрывным способом на шахте «Увальная» (Кузбасс). Оптимизация параметров производилась для условий крепости пород $f = 8 \dots 12$ по шкале проф. М. М. Протодьяконова, с сечением стволов $S = 32 \dots 34 \text{ м}^2$ и углом наклона $\alpha = 12^\circ \dots 18^\circ$, креплением выработок металлической аркой и анкерами длиной 2 и 5 м.

На производстве использовали бурильную машину УБШ210А, погружную машину 2ПНБ2У, анкероустановщики типа Rambot или Wombat. Проведенные проходческие работы, выполненные без роботизации, прошли со следующими параметрами: среднее хронологическое число горнорабочих в забое – 2,88, удельное время ведения проходческих работ – 17,85 мин/м³, удельная стоимость проходческих работ – 1 423 руб/м³.

При помощи СИМТП для одних и тех же условий определены параметры, обеспечивающие среднее хронологическое число горнорабочих в забое – 1,07, удельное время ведения проходческих работ – 12,76 мин/м³, удельную стоимость проходки – 1 788 руб/м³. На рис. 4 представлена схема модернизированной технологии проведения горных выработок с оптимальными параметрами (табл. 3).



1 – роботизированная буропогружная машина 2ПНБ2Б, 2 – зарядная машина Charmec RM 125 с дистанционным управлением, 3 – оборочная машина Scapec 2000 с дистанционным управлением, 4 – анкероустановочная машина Atlas Copco Cabletec LC с дистанционным управлением

Рисунок 4. Комплект горных машин для обеспечения оптимальных параметров технологии проведения наклонных стволов для условий ш. Увальная

Таблица 3. Оптимальные (субоптимальные) параметры буровзрывной технологии проведения наклонных стволов для условий ш. Увальная

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
1. A – энергия одного удара бурильной установки, Дж	400	13. R_3 – число стрел зарядной машины, шт.	2	25. N_{II} – число горнорабочих в забое, требующихся для погрузки горной массы, чел.	0
2. n – частота ударов бурильной установки, Гц	250	14. Q_{O_2} – производительность оборочной машины забоя, м ³ /мин.	0,15	26. N_O – число горнорабочих в забое, требующихся для крепления забоя, чел.	0
3. R_B – число одновременно работающих бурильных установок, шт.	2	15. $Q_{погр.}$ – производительность погрузочной машины, м ³ /мин.	1,25	27. C_B – стоимость бурильной машины, млн. руб.	14
4. K_O – коэффициент одновременности работы бурильных установок	0,9	16. T_A – время установки анкера анкероустановочной машины, мин.	4,5	28. C_{PB} – стоимость роботизации бурильной машины, млн. руб.	12
5. $V_{ХВ}$ – скорость хода бурильной установки, м/мин.	20	17. V_B – средняя скорость перемещения бурильной машины по выработке, км/ч	0,5	29. C_3 – стоимость зарядной машины, млн. руб.	20
6. $T_{ЗМ}$ – время замены бурильной коронки, мин.	2	18. V_3 – средняя скорость перемещения зарядной машины по выработке, км/ч	8	30. C_{P3} – стоимость роботизации зарядной машины, млн. руб.	1
7. V – стойкость коронки на одну заточку, м	30	19. V_{II} – средняя скорость перемещения погрузочной машины по выработке, км/ч	0,5	31. C_O – стоимость оборочной машины, млн. руб.	15
8. T_H – время наведения бурильной установки на место шпура, мин.	0,17	20. V_O – средняя скорость перемещения оборочной машины по выработке, км/ч	9	32. C_{PO} – стоимость роботизации оборочной машины, млн. руб.	1
9. $T_{ЗБ}$ – время забуривания бурильной установки, мин.	0,5	21. V_A – средняя скорость перемещения анкероустановочной машины по выработке, км/ч	15	33. C_{II} – стоимость погрузочной машины, млн. руб.	0
10. Q_M – производительность зарядной машины, кг/мин.	4	22. N_B – число горнорабочих в забое, требующихся для бурения шпуров, чел.	0	34. C_{PII} – стоимость роботизации погрузочной машины, млн. руб.	0
11. $Q_{ХЗМ}$ – скорость хода шланга подачи зарядной машины, м/мин	15	23. N_3 – число горнорабочих в забое, требующихся для зарядки шпуров, чел.	0	35. C_A – стоимость анкероустановочной машины, млн. руб.	35
12. $T_{НАВ}$ – длительность наведения зарядной машины на очередной шпур, мин.	0,33	24. N_O – число горнорабочих в забое, требующихся для оборки забоя, чел.	0	36. C_{PA} – стоимость роботизации анкероустановочной машины, млн. руб.	1

В табл. 4 показано сравнение полученной технологии проведения наклонных стволов для условий ш. «Увальная» с традиционным вариантом, исполнованным на производстве, а также вариантом максимально возможной автоматизации и роботизации (табл. 4).

Таблица 4. Показатели эффективности буровзрывных технологий проведения трёх наклонных стволов шахты «Увальная»

Вариант ведения проходческих работ	Среднее хронологическое число людей в забое, N	Удельное время ведения проходческих работ, T , мин/м ³	Удельная стоимость ведения проходческих работ, C , руб./м ³	Критерий оптимизации, K
Оптимальные параметры	1,07	12,76	1788	1,37
Отсутствие автоматизации	2,88	17,85	1423	2,25
Максимальная автоматизация и роботизация	1,08	11,76	2257	1,55

На графиках организации работ, построенных по результатам компьютерных экспериментов, показано, что выбранная технология с частичной роботизацией позволит сократить процесс бурения шпуров на 48,18%, практически исключить проветривание забоя, уменьшить продолжительность процесса погрузки горной массы на 20%, а крепления выработанного пространства анкерами на 63,83%. В конечном итоге, всё это позволит сократить продолжительность проходческого цикла на 63,83% по сравнению с традиционной технологией (рис. 5).

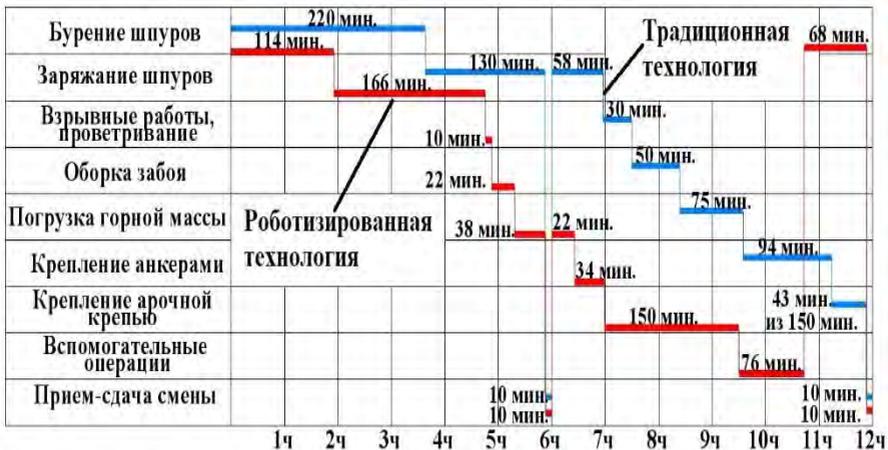


Рисунок 5. Графики организации работ проведения наклонных стволов с применением традиционной и роботизированной технологий

График динамики ведения проходческих работ показывает, что роботизированная технология позволит за месяц пройти на 21 м выработки больше, чем традиционная (рис. 6).

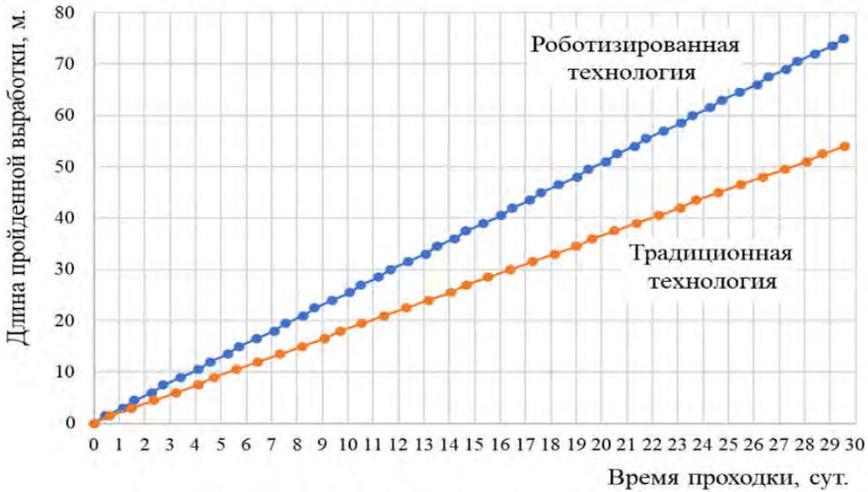


Рисунок 6. Динамика ведения проходческих работ с использованием традиционной и роботизированной технологий

Полученный вариант с частичной роботизацией технологических процессов позволит уменьшить среднее хронологическое число горнорабочих в забое на 63%, уменьшить удельное время ведения проходческих работ на 28,5% при удорожании удельной стоимости проведения наклонных стволов на 25,6% по сравнению с использованием традиционной неавтоматизированной технологии. Также он имеет удельную стоимость на 20,78% меньше, чем максимально автоматизированный вариант, при аналогичных показателях удельного времени ведения проходческих работ и среднего хронологического числа людей в забое.

Аналогично по методике проведена оптимизация параметров для условий проведения комбайновым способом вентиляционного штрека №557 на шахте «Чертинская-Коксовая». Для выработки сечением вчерне 14,7 м², проводимой по пласту с коэффициентом присечки 0,33 пород средней крепости, обоснованы оптимальные параметры технологии, которые достигаются использованием проходческого комбайна КП-21Д с дистанционным управлением и забойного скребкового конвейера СР-70-05 с установкой анкеров переносным анкероустановщиком МQT-120 «Рамбор».

Показатели эффективности полученной технологии: среднее хронологическое число горнорабочих в забое – 1,28, скорость проходки – 540 м/мес., стоимость проходческих работ – 1 908 руб./м³. Внедрение данного варианта на производство позволит по сравнению с традиционной комбайновой технологией увеличить безопасность горнорабочих путём уменьшения среднего хронологического их числа на 44% и уменьшить трудоёмкость работ на 23% при сохранении удельного времени ведения и стоимости проходческих работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение научно-технической задачи выбора оптимальных параметров типовых комбайновых и буровзрывных технологий проведения горизонтальных и наклонных горных выработок с частичной и полной автоматизацией и роботизацией технологических процессов, разрешающее противоречия между требованиями одновременного обеспечения безопасности и эффективности горных работ, что имеет существенное значение для развития угольной отрасли страны.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации работы:

1. Концепция передового развития угольных шахт направлена на уменьшение времени присутствия людей в забоях за счёт применения средств автоматизации и роботизации. Существенное повышение безопасности и скорости проходческих работ за счёт внедрения автоматизации и роботизации на различных уровнях влечёт увеличение их себестоимости, а определение оптимальных параметров технологий проведения горных выработок с учётом динамики и вероятностной природы технологических процессов не однозначно. Выявление оптимальных параметров технологий проведения горных выработок при их автоматизации и роботизации сдерживается ввиду невозможности решить данную задачу традиционными аналитическими методами.

2. Разработаны новые системно-функциональные модели типовых комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок. Анализ моделей по признакам выполнения интеллектуальных технологических операций горнорабочими или горными машинами (сканирование поверхности выработки, распознавание объектов выработки, позиционирование горных машин, позиционирование рабочих органов горных машин) позволил выявить 5 уровней автоматизации и роботизации основных технологических процессов, учитывающих все возможные варианты модернизации типовых технологий проведения горных выработок.

3. Создана реляционная база данных SQL основных моделей горнопроходческих машин (153 модели) и основных горнотехнических параметров технологий проведения горных выработок с учетом уровней автоматизации и роботизации технологических процессов (96 параметров), позволяющая формировать исходное множество параметров для последующей оптимизации.

4. Определена зависимость числа возможных вариантов функционального назначения автоматизации и роботизации в комбайновые и буровзрывные технологии проведения горных выработок от многообразия моделей горных машин, учитывающая все возможные варианты частичной автоматизации и роботизации основных технологических процессов. Это увеличивает их число в 125 раз для комбайновой и в 3125 раз для буровзрывной технологий.

Показано, что на примере условий буровзрывной технологии проведения наклонных стволов сечением 32-34 м² под углом 12-18° по породе крепостью 8-12 по шкале проф. М. М. Протодьяконова, количество потенциально возможных к использованию моделей горных машин составляет: 7 моделей бурильных машин, 3 модели зарядных машин, 3 модели оборочных машин забоя, 12 моделей погрузочных машин и 5 моделей анкероустановочных машин. В данных условиях возможны 11 812 500 вариантов модернизации технологии, из них 11 808 720 с частичной автоматизацией и роботизацией.

Показано, что на примере условий комбайновой технологии проведения

вентиляционного штрека сечением вчерне $14,7 \text{ м}^2$ под углом $4-6^\circ$ с присечкой породы, количество потенциально возможных к использованию моделей горных машин составляет: 9 моделей проходческих комбайнов, 5 моделей самоходных вагонов, 4 модели анкероустановочных машин. В данных условиях возможны 22 500 вариантов модернизации типовой технологии, из них 22 320 с частичной автоматизацией и роботизацией.

5. Обоснован комплексный критерий K оптимизации параметров типовых комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок с элементами автоматизации и роботизации, представляющий собой аддитивную нормированную квадратичную свёртку по Парето показателей эффективности проходческих работ: среднего хронологического числа горнорабочих в забое, удельных времени и стоимости проходки. Его использование для условий шахт Кузбасса при комбайновой и буровзрывной проходке позволило увеличить точность оптимизации на 4,7% и 6,2% соответственно.

6. Задача дискретной оптимизации параметров типовых комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок с элементами автоматизации и роботизации, с учётом динамики и вероятностной природы технологических процессов не поддаётся аналитическому решению из-за многофазной и многоканальной структуры системы, а также невозможности аналитической свёртки законов распределения времени выполнения технологических операций.

7. Известные имитационные модели комбайновых и буровзрывных технологий проведения горизонтальных и наклонных горных выработок уточнены путём добавления дополнительных сегментов, учитывающих влияние автоматизации и роботизации на время выполнения процессов проходческого цикла и число горнорабочих в забое. Противоречия между составляющими комплексного критерия оптимизации K необходимо и достаточно разрешаются на уточнённых имитационных моделях с учётом динамики и вероятностной природы технологических процессов. Показано, что при использовании указанного критерия:

- для оптимизации параметров буровзрывных технологий точность поиска оптимальных параметров увеличивается на 6,2%, на примере условий проведения наклонных стволов сечением $32-34 \text{ м}^2$ под углом $12-18^\circ$ по породе крепостью 8-12 по шкале проф. М. М. Протодяконова;

- для оптимизации параметров комбайновых технологий точность поиска оптимальных параметров увеличивается на 4,7%, на примере условий проведения вентиляционного штрека сечением вчерне $14,7 \text{ м}^2$ под углом $4-6^\circ$ с присечкой породы крепостью 3-4 по шкале проф. М. М. Протодяконова.

8. Обоснована методика комплексной оптимизации параметров типовых комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок, основанная на интеграции метода имитационного моделирования в качестве функции полезности в эволюционный алгоритм оптимизации.

9. Определены оптимальные параметры комбайновой технологии проведения вентиляционного штрека №557 шахты «Чертинская-Коксовая» сечением вчерне $14,7 \text{ м}^2$ от сбойки №15.21 в сторону западных бремсбергов вверх по простиранию пласта 5 под углом $4-6^\circ$ с присечкой породы крепостью 3-4 по шкале проф. М. М. Протодяконова. Крепление кровли и боков выработки осуществляется анкерами А20В длиной 1,8 и 2,8 м. Даны рекомендации по

выбору дистанционно управляемого проходческого комбайна КП21Д, скребкового конвейера СР-70-05, анкероустановщика MQT-120, типа «Рамбор», которые использованы ООО «ММК-УГОЛЬ» Шахта «Чертинская-Коксовая» при подготовке Паспорта на проведение вентиляционного штрека №557. Их использование снижает трудоёмкость работ на 23%, повышает безопасность проходческих работ за счёт сокращения среднего хронологического числа горнорабочих в зоне забоя на 44%.

10. Определены оптимальные параметры буровзрывной технологии для условий проведения наклонных стволов шахты «Увальная» сечением 32-34 м² под углом 12-18° по породе крепостью 8-12 по шкале проф. М. М. Протодьяконова. Даны рекомендации по выбору роботизированной буропогрузочной машины 2ПНБ2Б и дистанционно управляемых горных машин: зарядной машины Charmec RM 125, оборочной машины Scames 2000, анкероустановочной машины Atlas Copco Cabletec LC. Их использование повышает безопасность работ за счёт сокращения среднего хронологического числа горнорабочих в забое на 63%, уменьшает удельное время ведения проходческих работ на 28,5% при увеличении удельной стоимости работ на 25,6%.

11. Разработана «Система имитационного моделирования технологий проходки» (СИМП), позволяющая проводить оптимизацию параметров технологии проведения горных выработок при их автоматизации и роботизации для повышения безопасности и скорости проходческих работ при минимизации капиталовложений в них. Механизм работы программы основан на совместной работе имитационного моделирования на языке GPSS World и эволюционного алгоритма оптимизации.

12. Дальнейшее повышение предсказуемости и точности модернизации типовых технологий проведения горных выработок при автоматизации и роботизации технологических процессов возможно при учёте следующих параметров в разработанной методике оптимизации: газоносность и нарушенность пласта, плановых и внеплановых простоев, геометрии горных выработок.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ

Научные периодические издания из перечня ВАК

1. Николаев П. И. Методика обоснования подземных роботизированных геотехнологий без постоянного присутствия людей в забоях / П. И. Николаев, В. В. Зиновьев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – №4. – с. 26-33.

2. Зиновьев В. В. Новый подход к обоснованию геотехнологий без постоянного присутствия людей в забое/ В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов, П. И. Николаев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. - №5. – с. 37-44.

В изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus

3. Sinoviev V. V., Mayorov A. E., Starodubov A. N. and Nikolaev P. I. System approach to automatization and robotization of drivage. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 134. No 012042.

4. Sinoviev V. V., Starodubov A. N., Nikolaev P. I., Kuznetsov I. S., Kravtsov V. P. Simulation system for optimizing technical and organizational variants in coalmining production. Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 157. pp. 579-583.

5. Zinoviev V. V., Starodubov A. N., Nikolaev P. I. Modular system of simulation modeling of conventional and robotic mining technologies. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Vol. 773. 2021. No 012067. Doi:10.1088/1755-1315/773/1/012067

Прочие научные издания, материалы конференций

6. Николаев П. И. Методы оптимизации в горном деле / Сборник материалов VII Всероссийской, научно-практической конференции молодых учёных с международным участием «Россия Молодая – 2015», Кемерово. – 2015 – с. 224.

7. Николаев П. И. Выбор подхода для обоснования роботизированных подземных геотехнологий / Сборник ежегодной конференции молодых ученых ФИЦ УУХ СО РАН «РАЗВИТИЕ – 2016», Кемерово, 11-13 мая 2016 г., с. 56-62.

8. Николаев П. И. Поиск вариантов автоматизации и роботизации операций буровзрывных подготовительных работ с помощью системного подхода / Сборник ежегодной конференции молодых ученых ФИЦ УУХ СО РАН «РАЗВИТИЕ – 2017», Кемерово, 16-18 мая 2017 г., с. 119-127.

9. Николаев П. И. Система имитационного моделирования для рациональной автоматизации горнопроходческих работ / Сборник материалов II Международной научно-практической конференции «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте». – 2018. – с. 113-115.

10. Николаев П. И. Обоснование критерия оптимизации параметров проходческих работ, исключающих постоянное присутствие людей в забоях / Материалы конвента «Кузбасс: образование, наука, инновации». – 2019. – с. 45-48.

11. Зиновьев В. В. Модульная система имитационного моделирования традиционных и роботизированных технологий проходки / В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов, П. И. Николаев // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – №3. – Т.6. – с. 46-51.

12. Николаев П.И. О подходе к многовариантному анализу роботизации технологий проходки / П.И. Николаев, В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2019. – №5. – с. 272-275.

13. Зиновьев В.В. Реализация модуля системы имитационного моделирования технологий проведения горных выработок для сравнения схем отработки заходов при проходке штреков / В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов, П.И. Николаев, И.С. Кузнецов // Труды конференции «ИММОД-2019», Екатеринбург: Урал. гос. пед. ун-т. – 2019. – с. 428-433.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

14. Система имитационного моделирования технологий проходки: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020661781 Российская Федерация / П. И. Николаев и др.; заявитель и правообладатель ФИЦ УУХ СО РАН (RU) – заявл. 06.08.2020; опублик. 01.10.2020.

Подписано в печать _____.2021 г. Формат 60×84/16.

Гарнитура Таймс. Печать лазер. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ _____. Отпечатано в типографии «Радуга»
650004, Россия, Кемерово, ул. Соборная, 6. (3842) 35-84-96