Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр угля и углехимии
Сибирского отделения Российской академии наук»

На правах рукописи

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)»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Зиновьев Василий Валентинович

Кемерово 2021

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 4

1 АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОДЗЕМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РАЗРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ПЕРСПЕКТИВ ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТИЗАЦИИ 12

1.1 Анализ подходов к рациональному выбору и оптимизации параметров подземных технологий разработки угольных месторождений 12

1.2 Анализ методов и средств принятия решений по автоматизации и роботизации технологий проведения горных выработок 29

1.3 Обзор средств автоматизации и роботизации основных процессов проходческих работ буровзрывным и комбайновым способами 37

1.4 Применение современных информационных технологий для оптимизации параметров сложных производственных систем 43

1.5 Актуальность, цель и задачи обоснования и разработки методики комплексной оптимизации параметров технологий проведения горных выработок при автоматизации и роботизации технологических процессов 46

ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЧИСЛА ВОЗМОЖНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОМБАЙНОВЫЕ И БУРОВЗРЫВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК 49

2.1 Анализ технологических процессов технологий проведения горных выработок с позиции автоматизации и роботизации 49

2.2 Обоснование уровней автоматизации и роботизации основных процессов технологий проведения горных выработок 57

2.3 Обоснование зависимости числа возможного функционального назначения элементов автоматизации и роботизации технологических процессов в технологии проведения горных выработок 60

2.4 Выводы по главе 62

3 ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 63

3.1 Комплексный критерий оптимизации технологий проведения горных выработок при автоматизации и роботизации технологических процессов 63

3.2 Постановка задачи оптимизации 65

3.3 Исследование влияния автоматизации и роботизации на параметры технологий проведения горных выработок 70

3.4 Выводы по главе 76

4 ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 78

4.1 Методические основы оптимизации параметров технологий проведения горных выработок при автоматизации и роботизации технологических процессов 78

4.2 Адаптация имитационной модели проходческих работ при автоматизации и роботизации основных технологических процессов..... 82

4.3 Создание системы имитационного моделирования технологий проходки 88

4.4 Оценка параметров технологий проведения горных выработок при автоматизации и роботизации технологических процессов 94

4.5 Выводы по главе 100

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 101

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 106

ПРИЛОЖЕНИЯ..... 121

Приложение А 121

Приложение Б 122

Приложение В 123

Приложение Г 124

Приложение Д 125

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В Российской Федерации при добыче угля подземным способом проходят более 430 км горизонтальных и наклонных подготовительных выработок в год [1], 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% [2-4].

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 [5, 6]. 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, исключающие полный перебор вариантов при приемлемом расчётном времени. Однако, разработка и реализация актуальной методики в условиях применения типовых технологий проведения горных выработок

ток 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;

– создании 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 «Наукоемкие 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.

1 АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОДЗЕМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РАЗРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ПЕРСПЕКТИВ ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТИЗАЦИИ

В настоящей главе приведен анализ литературных источников, посвящённых вопросам автоматизации и роботизации технологических процессов проходческого цикла, а также методам и средствам математического моделирования и оптимизации параметров технологий проведения горных выработок.

Автоматизация основных процессов проходческих работ позволяет передать машинам функционал, выполняемый горнорабочими в забое, уменьшая вероятность травм и смертей на производстве, но ей свойственны высокие затраты. Поэтому решение о внедрении автоматики и роботов в реальное производство требует предсказуемости конечного результата для уменьшения инвестиционных рисков. В этой связи в научных разработках для решения проблемы рациональной автоматизации и роботизации можно выделить четыре направления: рациональное обоснование параметров горнотехнических систем, создание передовых средств автоматизации и роботизации, современные методики принятия решений о рациональной и эффективной автоматизации, применение современных информационных технологий для автоматизации и роботизации технологических процессов.

1.1 Анализ подходов к рациональному выбору и оптимизации параметров подземных технологий разработки угольных месторождений

Рациональный подход к выбору параметров горных систем осуществлялся с помощью различных методик, таких, как натурный эксперимент, анализ и синтез горных систем, математическое моделирование, в том числе имитационное моделирование, классические и эвристические методы оптимизации.

В работе В. В. Першина [7] производился рациональный выбор скорости ведения проходческих работ путём подбора наиболее подходящего комплекта горного оборудования. Отмечены преимущества ряда моделей зарубежной техники, в том числе самоходной бурильной установки, погрузочно-доставочной машины с боковой разгрузкой, призабойной конвейерной системы и прочего горного оборудования. Практическое применение выбранного комплекта привело к повышению скорости проходки до 75 м/мес. В другой работе [8] коллектива ученых во главе с В. В. Першиным проводился анализ технологических процессов для уменьшения продолжительности каждого из них. Для исследования проведена видеосъемка реальных проходческих работ, выявлено, какие операции проходческого цикла можно производить более эффективно либо одновременно с другими. Выявлены технологические операции, усовершенствование которых позволит уменьшить трудоёмкость и продолжительность проходческого цикла в целом.

В монографии В. В. Першина [9] тема взаимодействия системы «горный массив – техника – человеческая психика» получила развитие в виде различных информационно-эргатических аспектов. Актуальность исследования заключалась во всё большей интенсификации и напряженности деятельности горнорабочих, в том числе работы их психики. На увеличение интенсивности труда работников горных предприятий влияет увеличение числа звеньев в информационном обмене от горнотехнической системы к горнорабочему посредством различных датчиков и измерителей, а также увеличение числа правил, норм, обязанностей, ограничений, накладываемых на деятельность горнорабочих. Это негативным образом сказывается не только на их здоровье, но и на точности составления проектов горных работ, из-за чего часты случаи отставания горных работ от плана.

Увеличить точность проектирования горных работ, а также рационализировать выбор параметров горных работ автор предлагает повышением уровня рациональности выполнения горнорабочим каждой технологической операции. Для этого методом видеосъёмки и последующего анализа зафиксированы все операции

проходческого цикла, на основе полученных данных построены диаграммы последовательности работ с выявлением критических цепей и построением планограмм с рациональной последовательностью и длительностью операций.

Также в вышеуказанной работе исследованы параметры эффективности горных работ в зависимости от напряженности выполняемого горнорабочими труда, а также даны рекомендации по комплектованию проходческих бригад в зависимости от физиологических и психологических параметров способностей горнорабочих.

В работе А. И. Копытова [10] осуществлялся подбор параметров буровзрывной технологии в рамках добычи руды подземным способом, а именно параметров взрывчатого вещества для лучшего управления габаритами получаемого после взрывных работ полезного ископаемого, вследствие этого уменьшения временных затрат на ведение проходческих работ. Другая работа А. И. Копытова [11] содержит рекомендации по рациональному выбору типа и параметров крепи горных выработок в условиях добычи руды. Рекомендации учитывают склонность участков месторождения к горным ударам, а также трещиноватость и устойчивость пород, сечение проводимой горной выработки. В итоге рассчитывается, какой тип крепи с какими параметрами и с каким отставанием необходимо устанавливать для повышения долговечности выработки и повышения прочностных параметров крепи.

В исследовании В. В. Першина [12] производился рациональный подбор параметров анкерных многослойных анкерных конструкций. В работе рассчитывались геометрические параметры многослойных анкеров для уменьшения затрат на создание таких анкеров без потери их прочностных качеств, а также повышения их несущей способности и способности удерживаться в шпуре за счёт увеличения внутренних напряжений изделия. Работа [13] содержит обоснование параметров новой технологии добычи руды с доставкой полезного ископаемого самоходными машинами. Применение подэтажного обрушения и торцевого выпуска руды позволяет избежать традиционной реализации технологии добычи, при которой существует множество трудоёмких технологических операций, которые выполняются человеком в силу трудности их механизации. Новая технология позволяет увеличить как параметры безопасности, так и производительности добычи руды.

Параметры очистных работ моделировались Ю. А. Степановым в исследовании [14-16]. Для обеспечения безопасности очистных работ предлагается прогнозирование динамических горных явлений (внезапных выбросов угля и газа, горных ударов и пр.) на основании работы геоинформационных систем, так как для аналитического расчета параметров очистных работ необходимо совмещение нескольких сложных математических моделей. Работа таких геоинформационных систем подразумевает наличие тематических геологических карт: карты геологоразведочных данных и карты имитационного моделирования геологического среза. Это позволяет создать геологическую модель угольного месторождения, позволяющую корректно прогнозировать динамические явления при движении очистного забоя вплоть до каждой передвижки крепи. Также при работе с такой моделью можно с учётом ожидаемых физических явлений рационально подобрать комплект горного оборудования и запланировать профилактические мероприятия, тем самым уменьшая риск человеческих травм и экономического ущерба.

Проблема подбора параметров цементации капитальных горных выработок рассматривается в работе В. А. Хямяляйнена [17]. В работе применяются методы классической оптимизации, максимизируются прочностные параметры цементования, минимизируются параметры стоимости и трудоёмкости цементации. В качестве управляющих параметров выбраны параметры нагнетания цементирующего раствора, его физические свойства, геометрия области фильтрации. На основании проведённого исследования обосновываются новые способы формирования цементационных завес, которые обеспечивают увеличение значений прочности и устойчивости упрочнённого горного массива. Управление параметрами состава тампонажного состава рассматривается в работах В. А. Хямяляйнена [18, 19]. Идея работы состоит в минимизации стоимости раствора путём добавления в него золы и жидкого стекла в пропорциях, необходимых для сохранения физико-механических свойств раствора. Оптимизация проводилась путём проведения натурных экспериментов и исследования полученных зависимостей. Преимуществом полученного раствора являются экономичность и экологичность, так как его использование уменьшает выбросы после сжигания топлива во время углеобогащения.

В работе П. В. Егорова [20] оптимизируется длина очистного высоконагруженного забоя в условиях добычи угля. Оптимизация проводится для уменьшения негативных последствий обрушения основной кровли после передвижки механизированных крепей. Также оценивается воздействие горного давления на секции механизированных крепей. В работе [21] предполагается учитывать степень влияния разрывных, складчатых нарушений и обводненности пласта на устойчивость подготовительных выработок с целью уменьшения затрат на их поддержание, что позволяет рассчитывать параметры крепления горных выработок.

Расчёт геометрических параметров угольных целиков при отработке угольного месторождения камерно-столбовой системой приведена в работе П. В. Егорова [22]. Исследования физико-механических свойств горных пород показывают, что классический расчёт геометрических параметров целиков, согласно которому на целик давит весь столб пород до поверхности, может давать избыточные значения, что приводит к удорожанию добычи и неполной выемке полезного ископаемого. Предлагается рассчитывать параметры целиков на основе гипотезы свода.

В исследовании В. А. Федорина [23] производится минимизация финансовых параметров комбинированной открыто-подземной технологии, при которой угольное предприятие на первом этапе разрабатывает месторождение угля разрезом, а на втором – совмещающем работу разреза и шахты. Целевым условием рационализации выступила прибыль предприятия (Рисунок 1).

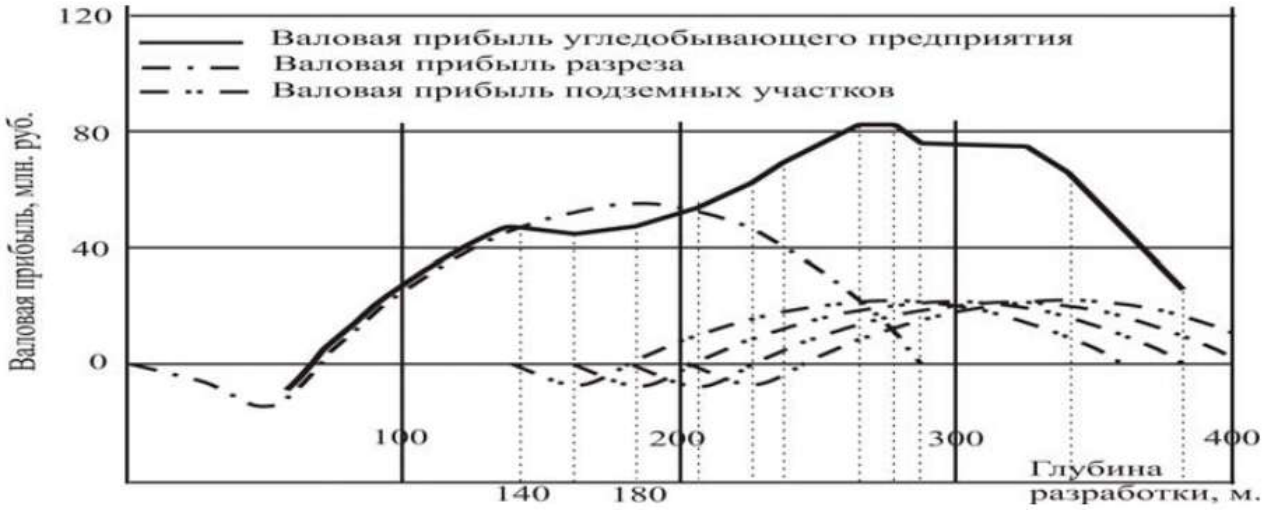


Рисунок 1 – Прибыль как показатель эффективности открыто-подземной горнотехнической системы

Повышение параметров безопасности при открыто-подземной разработке угольных месторождений рассматривается в работе [24]. Предлагается минимизация параметров загазованности и обводненности угольных разрезов путем отвода вредных веществ через инфраструктуру соседней шахты, тем самым повышая безопасность горнорабочих разреза.

Рациональные параметры отработки мощных угольных пластов рассматриваются в работе [25] под руководством В. А. Федорина. Обосновывается повышение производительности и полноты выемки мощных угольных путем раздельной выемки трёх их частей двумя комбайнами и двумя типами крепей – передвижных опор и механизированной крепи (Рисунок 2).

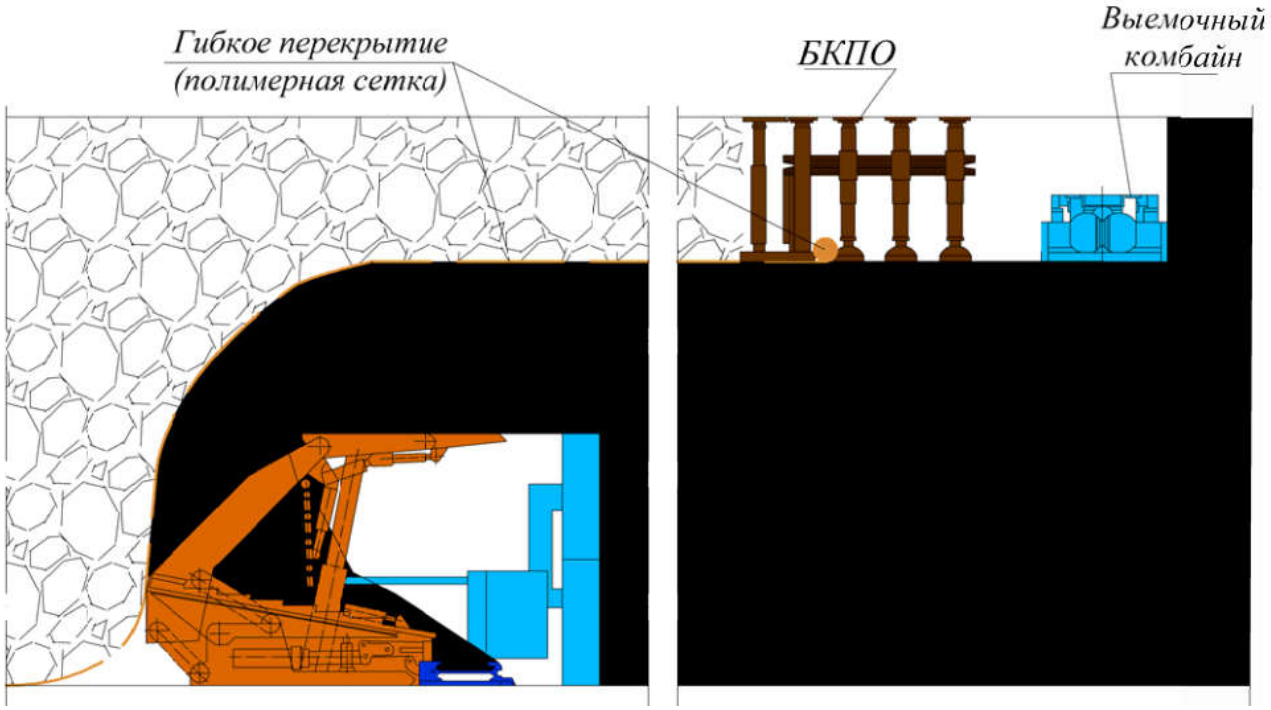


Рисунок 2 – Ведение очистных работ с помощью безразгрузочного комплекта передвижных опор и механизированных крепей

В работе А. Е. Майорова [26] рассматривается технология инъекционного упрочнения оконтуривающих выработку пород анкерами с цементирующим раствором. Исследуются параметры напряжения в горных породах и влияние их на деформацию горных пород. Методом исследования выступало натурное моделирование процесса закрепления анкера в шпуре на экспериментальной установке, а по-

лученные зависимости позволяют производить расчёт параметров анкеров на стадии проектирования. В работе [27] обоснованы параметры прочности породного массива и упрочнённых пород во взаимоувязке. Целью исследования ставилась уменьшение деформаций после инъекционного крепления горных пород и создания системы крепь – упрочненная приконтурная зона – массив. В работе [28] рассматривался рациональный выбор параметров цементации трещин в закрепляемых анкерами породах горных выработок. Обоснованы параметры установки, осуществляющей установку анкеров с заполнением сыпучим минеральным заполнителем, а также параметры её практического применения для повышения прочностных параметров закрепляемого массива. Разработана технология анкер-инъекционного крепления капитальных выработок на основе цементации трещиноватых горных пород и анкеров с сыпучим минеральным заполнителем (Рисунок 3).

Наименование операций	Объем работ		Число проходч. чел.	Время по графику, смены	Продолжительность работ, смены									
	ед.изм.	кол-во			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Бурение скважин ø 43 мм и установка в них анкеров АКМЗ с закреплением песком в скважине за контуром свода	м (шт)	35 (14)	3	1										
Бурение скважин ø 43 мм и установка в них анкеров АКМЗ с закреплением песком по всей длине скважины	м (шт)	30 (12)	3	1,2										
Установка пакеров	шт	14	2	0,15										
Нанесение набрызг-оболочки на контур	м.кв	40	3	1										
Установка подхватов (опорных плит) и предварительное нагружение анкеров АКМЗ	-	-	3	0,8										
Приготовление цементационного раствора	м.куб	10	1	3										
Нагнетание цементационного раствора	м.куб	10	2	3,4										
Бурение контрольных скважин ø 76 мм с отбором керна, диагностика	м	36	3	1,2										
Вспомогательные работы	-	-	1	0,85										

Рисунок 3 – Технология анкер-инъекционного крепления капитальных выработок

Рациональные параметры возведения изоляционных сооружений горных выработок в нарушенных горных породах рассмотрены Е. И. Нургалиевым в работе [29]. Для увеличения скорости установки таких сооружений и качества изоляции применяется комплексная технология, объединяющая возведение тампонажной завесы и укрепления приконтурной зоны горных пород. Оптимальный состав таких смесей рассматривался Е. И. Нургалиевым в статье [30], также рассмотрено их влияние на показатели эффективности комбинированной технологии закрепления горных выработок. Методы исследований в работах – натурное моделирование и анализ результатов внедрения технологии на практике в течение шести лет.

Идея применения имитационного моделирования и сетей Петри для исследования шахтных робототехнических систем (Рисунок 4) впервые предложена В. Л. Конюхом, О. В. Тайлаковым, Б. А. Анферовым в 1988 г. [31]. Указанный математический аппарат использовался для моделирования и выбора рациональных параметров технологии выемки гуля длинным забоем, технологии проведения выработки комбайном избирательного действия, работы внутришахтного транспорта, комбинированном управлении несколькими подземными погрузочно-транспортными машинами одним оператором [87, 88].

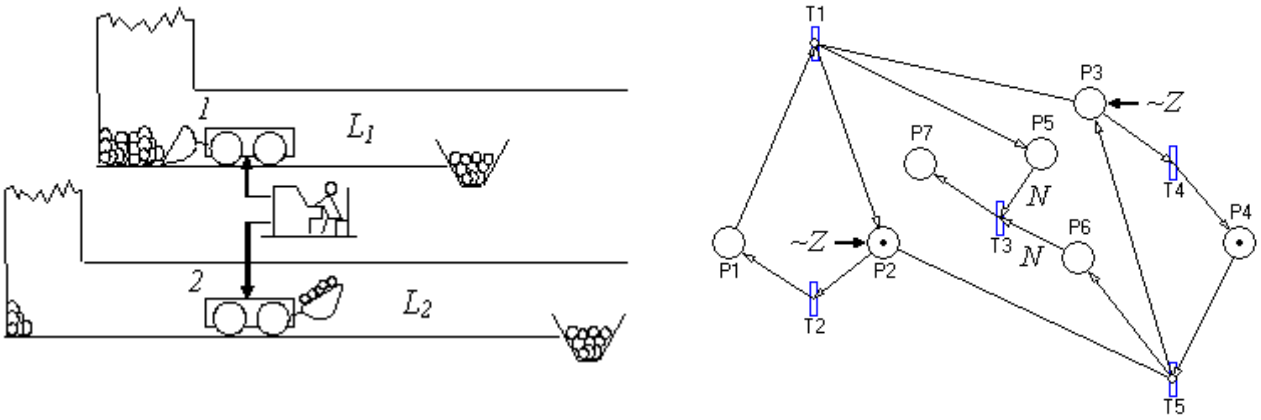


Рисунок 4 – Схема и модель на сетях Петри комбинированного управления двумя погрузочно-транспортными машинами одним оператором

В работе авторов под руководством В. В. Зиновьева [32, 33] описывается подход, согласно которому можно оценить внедрение отдельных элементов робото-

техники и автоматизации в проходческие работы с помощью имитационного моделирования в среде GPSS World. В работе анализировалось, какие технологические операции подготовлены с точки зрения их роботизации, а также какие могут быть резервы для повышения производительности горнотехнических систем посредством имитационного моделирования роботизированных проходческих работ.

В работе А. Н. Стародубова [34] описывается концепция рационального подбора параметров проходческих работ. При помощи созданной на основе имитационного моделирования компьютерной системе возможно редактирование основных параметров проходческих работ с последующим экспериментом и получении основной информации о проходческих работах.

В работе В. В. Окольнишникова [35] также применён имитационный подход к рациональному выбору параметров очистных работ. Созданное программное обеспечение (Рисунок 5) содержит библиотеки подсистем шахты: конвейерной, вентиляционной, энергетической, угольных пластов, горных машин и прочих. Пользователь, комбинируя различные варианты компоновки горнодобывающего предприятия, получает на выходе основные параметры его функционирования.

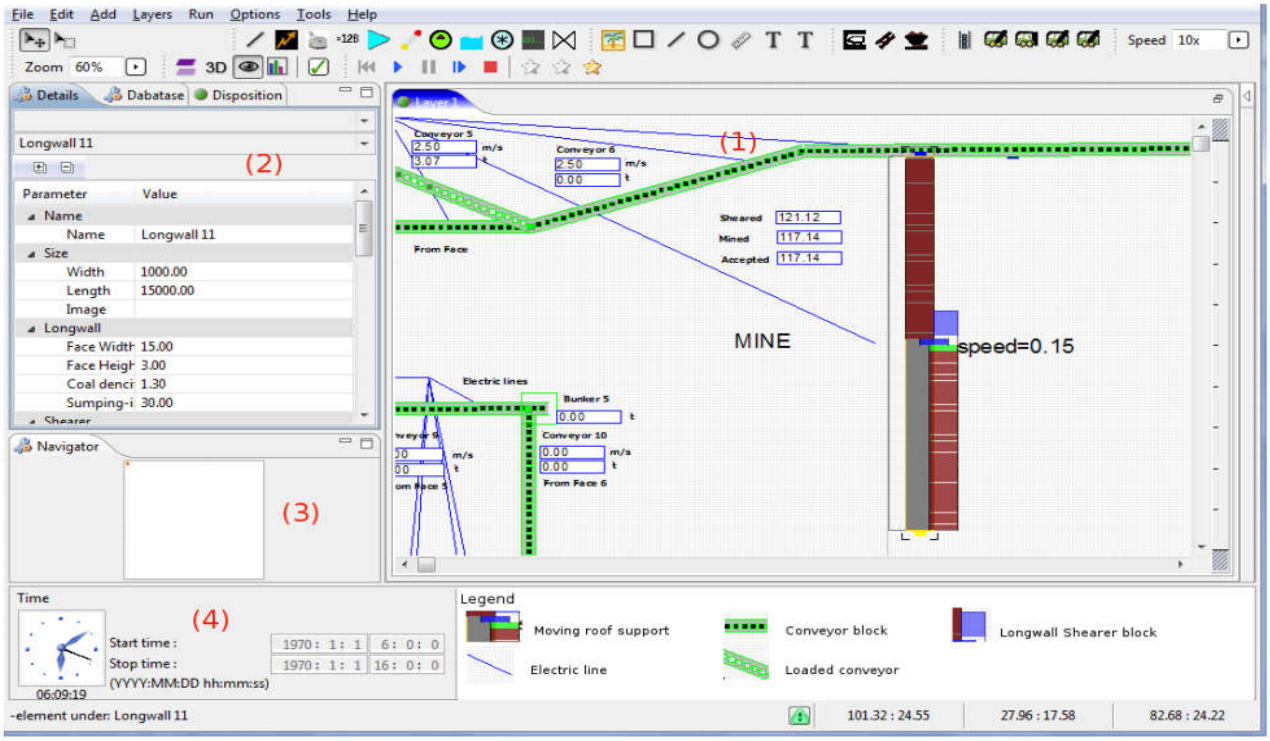


Рисунок 5 – Подбор параметров угледобывающего производства с помощью системы имитационного моделирования

Параметры ведения очистных работ на мощных пластах угля с выпуском угля подкровельной толщи рассматривались в работе В. И. Клишина, А. Н. Стародубова, В. В. Зиновьева [36]. Созданное специализированное программное обеспечение позволяет оценить различные варианты выпуска угля (волновой, групповой, индивидуальный, площадной) и оценить загрузку на завальном конвейере (Рисунок 6). Обоснование параметров выпуска позволит отрабатывать мощные угольные пласты с меньшими потерями угля за выпускным окном и большей производительностью.

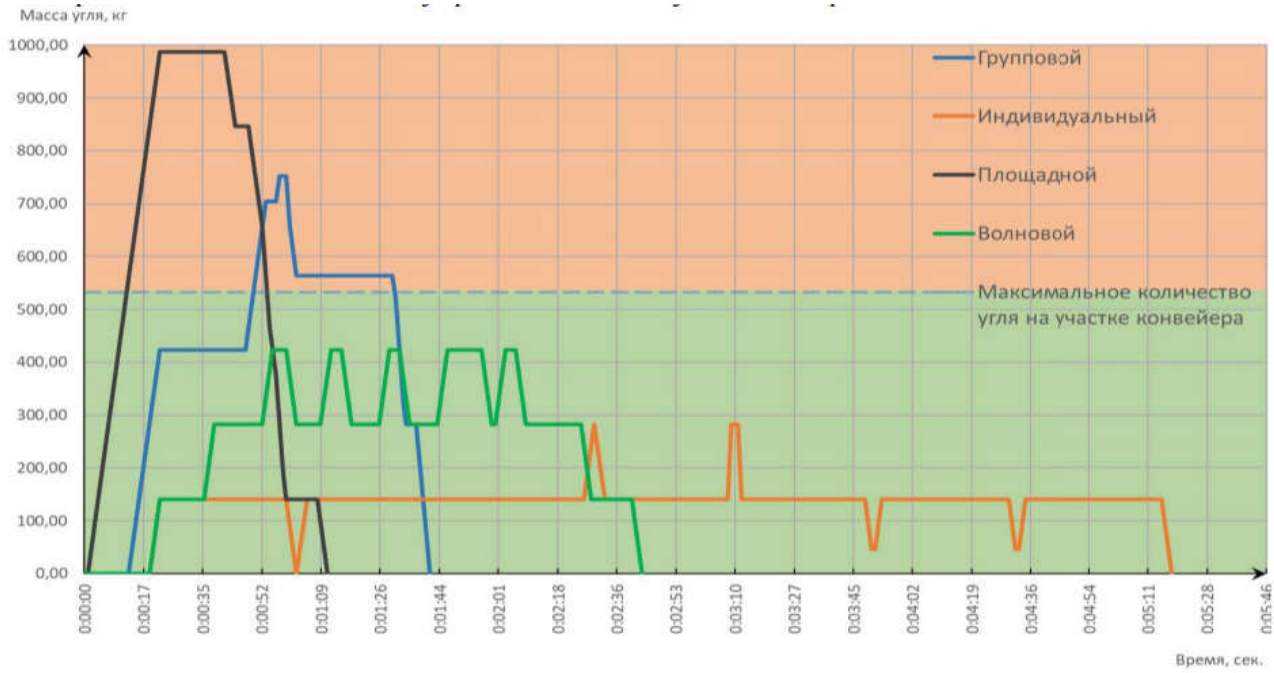


Рисунок 6 – Исследование параметров различных режимов выпуска угля подкровельной толщи с помощью имитационной среды GPSS World

Параметры добычи угля открытым способом также исследовались с помощью имитационного моделирования. В работах И. С. Кузнецова [37, 38] были показаны имитационное модели открытых и открыто-подземных горных работ на угледобывающих предприятиях. Эксперименты над данными моделями позволяют рассчитать производительность вскрышных и добычных работ, загрузку горного оборудования, а также составить комплекты горной техники для ведения открытых горных работ.

В работах О. В. Тайлакова [39, 40] анализировались процессы оценки объёма угля на угольных складах разрезов. Традиционные методы оценки предлагается заменить аэрофотосъёмкой, для чего проанализированы параметры этой технологии. Найдены зависимости точности оценки объёмов угля на складах от высоты полётов беспилотных летательных устройств с фотокамерами на борту. Доказано, что точность оценки объёма угля на складах с помощью аэрофотосъёмки значительно возрастает, если установить рациональные параметры полётного задания.

Параметры газоотдачи при ведении горнопроходческих работ рассматриваются О. В. Тайлаковым в работе [41]. Анализируются зависимости газоотдачи из горизонтальных скважин от параметров гидроразрыва отрабатываемого пласта. Эффективность разработанной технологии подтверждается натурными экспериментами на горнодобывающем предприятии Кузбасса, которые привели к меньшей концентрации метана в допустимых для ведения проходческих и очистных работ пределах.

В работе В. Ф. Демина [42] рассматривается оптимизация параметров технологической схемы очистных работ в шахтах путем работы в экспертной системе. Программный комплекс последовательно задаёт пользователю вопросы о проектируемой системе и на выходе даёт технологическую схему с оптимальными параметрами. Основой оптимизации являются синтез различных технологических схем.

Методы классической оптимизации представлены в работах А. А. Ордина и А. А. Мешкова [43-45]. Рассматривается оптимизация длины очистного забоя для максимизации прибыли предприятия (Рисунок 7). Находится аналитическая зависимость изменения прибыли от изменения длины забоя и проводится разрешение дифференциальной задачи с нахождением экстремума. Одно из основных ограничений в заданной оптимизации является критический объём выделения метана.

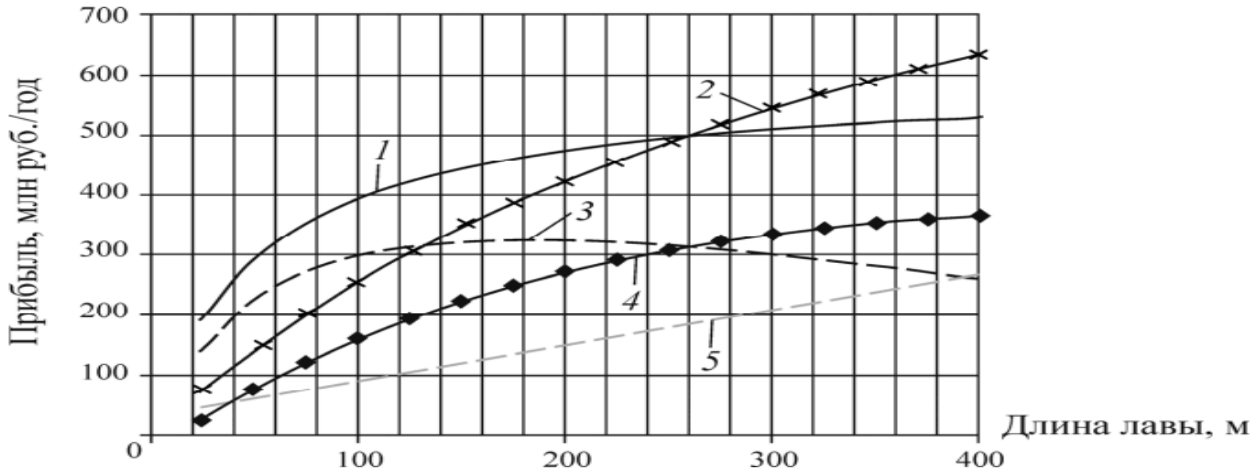


Рисунок 7 – Применение аналитической оптимизации для максимизации прибыли ведения очистных работ в зависимости от длины очистного забоя

В работе С. В. Рудометова [46] оптимизация параметров очистного забоя осуществляется специализированным программным обеспечением за счёт перебора моделей различных горных машин в имитационной модели, а также изменения размера лавы и технологических схем добычи, размещённых в специализированных библиотеках.

В работе А. А. Ордина [47] показано лаговое влияние в зависимости проектной мощности рудодобывающего предприятия от объёмов руды в рудном тел. Задача рассматривалась в динамической постановке.

Р. Димитракопулосом в работе [48] рассматривалась оптимизация прибыли горного предприятия, учитывающая вероятностную природу размещения полезных ископаемых во вмещающих породах. Применяя случайное построение не одного, а множества рудных тел, в итоге множественная выборка усредняется. На экспериментах доказано, что прогнозирование по вероятностно построенным рудным телам дает менее оптимистичный, но более точный прогноз, что позволяет повысить точность инвестирования в горные предприятия.

В работе Ю. А. Хохолова [49] оптимизировались параметры формирования льдопородного массива в горных выработках. Оптимизируемыми параметрами являлись прочностные свойства массива и время его формирования, а управляемыми – влажность, толщина слоя и начальная температура слоя. Расчет проводился на специализированных созданных программах для ЭВМ.

Параметры качества угля, выдаваемого на-гора, рассматривались в работе А. А. Ботвинника [50]. Главный оптимизируемый параметр – дисперсия показателей качества выдаваемого на-гора угля на примере отработки открытым способом Эльгинского месторождения каменных углей. Оптимизируются порядок отработки пласта и резервация потока углей в специализированных хранилищах в зависимости от их качества.

А. А. Антоновым в исследовании [51] проводился многокритериальный анализ оптимальности работы шахты, где оптимизируемые показатели были разделены на экономические и технологические, каждый из которых рассчитывался как интегральный критерий от множества других показателей эффективности работы горных предприятий.

Параметры процесса выпуска угля из подкровельной толщи при очистных работах рассматривались в работе В. И. Клишина и С. В. Клишина [52-54]. Первоначально было выполнено физическое моделирование технологии подэтажного обрушения (Рисунок 8), на основе результатов которого обоснована математическая модель в рамках теории дискретных элементов, позволяющая производить эксперименты на ЭВМ с помощью численных методов и обосновывать эффективные технологии добычи угля из мощных пластов.

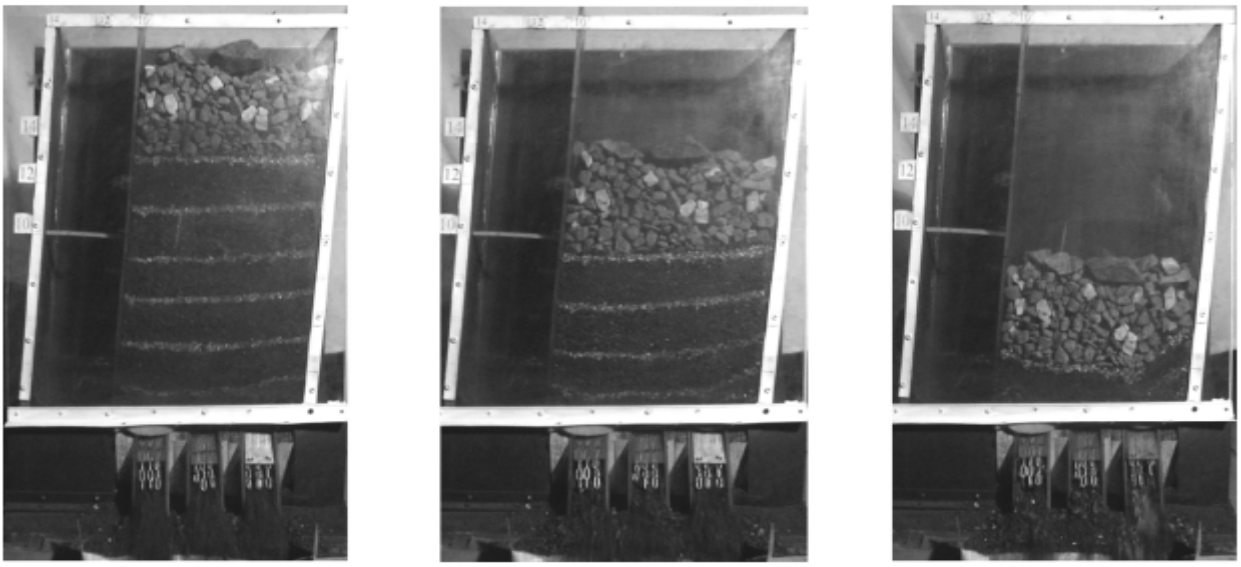


Рисунок 8 – Физическое моделирование параметров процесса выпуска угля из подкровельной толщи на экспериментальной установке

В работах А. И. Копытова [55, 56] предложены методические основы для повышения эффективности и безопасности горноподготовительных работ на базе анализа технологии подготовки и нарезки очистных блоков, при разработке месторождений системой этажного принудительного обрушения с вибровыпуском руды. Также предложено описание технологии крепления горных выработок с их применением в удароопасных условиях. Технология крепления основана на применении трубчатых анкеров фрикционного действия.

В исследовании А. В. Адамкова [57] разработаны и обоснованы параметры технологии врубоблочного разрушения угольного массива при проведении подготовительных выработок. По данной технологии разрушение осуществляется путем выполнения двух основных процессов при проведении подготовительной выработки механическим способом – разрушение забоя и удаление разрушенного массива с помощью погрузочного устройства. На первом этапе с применением барового исполнительного органа проводятся вертикальные врубы. Далее на втором этапе этим же исполнительным органом производят горизонтальные врубы. После на третьем этапе клиновидным исполнительным органом разрушают блоки. На последнем четвертом этапе осуществляется погрузка разрушенного угля нагребающими лапами погрузочного устройства. Особенностью врубоблочного способа разрушения является совмещение операций по образованию врубов и разрушению блоков. Автором установлено, что при применении предлагаемого способа проведения подготовительных выработок эффективность разрушения угольного массива определяется соотношением высоты блока и глубины вруба, а также формой скалывающего исполнительного органа. Также определены оптимальные параметры разрушения угольного массива предлагаемым способом при проведении выработок по угольному пласту с присечкой пород с крепостью менее 4 по шкале профессора М. М. Протодьяконова: глубина вруба 1000 мм, ширина блока 800 мм, высота блока 500 мм, высота вруба 50 мм. При этом более 75% от общего объема массива разрушается сколом блоков. Снижение пылеобразования при разрушении массива значительно повышает безопасность и комфортность работ.

В статье А. В. Адамкова [58] на основе проведенных шахтных исследований установлено, что на величину пылевыделения при работе комбайнов влияют в основном следующие факторы: влажность, крепость, мощность и структура угольного пласта, скорость воздуха в забое, режим разрушения горного массива органом комбайна, конструкция исполнительного органа и тип комбайна. Для снижения уровня запыленности в забоях подготовительных выработок необходимо совершенствование исполнительных рабочих органов проходческих комбайнов, либо разрабатывать новые методы разрушения массива, одним из которых является метод - крупного скола врубоблочный способ.

В статье А. С. Позолотина [59] представлен метод расчета параметров анкерной крепи выработок, проводимых на различной глубине в горно-геологических и горнотехнических условиях угольных шахт. Предложенный метод позволяет выполнять расчеты анкерной крепи по двухуровневой схеме без использования стоечной крепи для: выработок и сопряжений шириной до 12 м; предварительно пройденных и формируемых демонтажных камер; усиления крепи штреков с целью их повторного использования и бесцеликовой отработки запасов угля; усиления крепи штреков с целью работы очистного забоя без применения механизированных крепей сопряжения усиления крепи выработок с целью их сохранения для газоуправления, дренажа, обеспечения запасных выходов; усиления крепи штреков в зоне опережающего горного давления; обеспечения устойчивости приконтурного массива пород горных выработок на малых глубинах, в неустойчивых породах, в зонах геологических нарушений и т.д.

В исследовании В. Е. Ануфриева [60] предложен опыт доупрочнения канатными анкерами кровли выработок, сохраняемых на границе с выработанным пространством, геомеханическая оценка способа закрепления канатных анкеров за границей углов полных сдвижений пород и предложена технология доупрочнения приконтурного массива демонтажных камер основанная на закреплении канатных анкеров за контуром неустойчивой части массива, определяемой поверхностями наклоненными под углами полными сдвижений. Разработанная технология обес-

печивает безопасное устойчивое состояние кровли, характеризующееся существенно меньшим расслоением кровли по сравнению со стандартным креплением и нагрузкам, не превышающим несущую способность канатного анкера.

В работе Е. Г. Кассихиной [61, 62] рассмотрен новый подход по повышению промышленной безопасности эксплуатации стальных нашахтных копров на базе рациональных конструктивных решений. Разработаны конструктивные решения подшкивного устройства и бескаркасного станка копра многофункционального назначения, обеспечивающие их высокую герметичность. Изложена идея независимо работающих конструктивных блоков, снижающая риск отказа аварийного торможения в случае экстренного нагружения, даже при разрушении основной несущей конструкции. Также разработан метод расчета стальных укосных копров многофункционального назначения, обеспечивающих улучшение технико-экономических показателей комплекса работ по сооружению ствола в 1,3-1,6 раза. Для математического расчёта параметров стальных нашахтных копров была создана специализированная программа для ЭВМ [63], позволяющая получить чертёж изделия, параметры обслуживающего его горного оборудования и величину разрывного усилия копра. Метод основан на пространственной расчетной модели копра многофункционального назначения. Исследование проведено при помощи компьютерного моделирования с использованием программ "РЕКОН", "Лира", "Гамма" на основе методов строительной механики и теории упругости. Реализация модели осуществляется путем нахождения по графу решений позволяющий увидеть возможные варианты схем оснащения для заданных условий проектирования, при этом выбора оптимального лежит в области эффективных Парето множеств и осуществляется путем сравнения глобальных векторных оценок с учетом ранжирования выбранных целевых функций по степени предпочтительности.

В работе В. Н. Хомченко [64] представлена методика расчета допустимых размеров целиков в системах разработки короткими столбами, камерных и камерно-столбовых и их зависимость от глубины работ. В результате теоретических исследований было выявлено, что с увеличением глубины отработки пологих

угольных пластов системами разработки с короткими очистными забоями допустимая ширина между камерными и барьерными целиками увеличивается, при этом наблюдается сходимость расчетных результатов с практической работой на шахте «Распадская».

В исследовании Д. В. Зоркова [65] разработаны и обоснованы технологические параметры безопасного въезда очистного механизированного комплекса в предварительно подготовленную демонтажную выработку у по глубине ведения горных работ при различных типах кровли. Установлены закономерности напряженно-деформированного состояния угольного и породного массивов при въезде очистного механизированного комплекса в подготовленную предварительно демонтажную выработку с учетом механизма обрушения кровли, потерю несущей способности ограждающего целика, ширину демонтажной выработки, конфигурацию стационарной крепи, скорость движения очистного забоя. Д. В. Зорков в работе [66] представлен обобщённый опыт въезда в предварительно подготовленную демонтажную выработку. Приведены исследования характерных параметров поведения кровли при аварийных въездах. Обрушения кровли при въезде очистного механизированного комплекса в предварительно подготовленную демонтажную выработку типизированы. На примере выемочного столба 5а-10-18 ш. «Распадская» автором рассмотрен процесс формирования напряженно-деформированного состояния в окрестности предварительно подготовленной демонтажной выработки и представлен смоделированный процесс въезда в условиях тяжёлой кровли. А также определены ожидаемые нагрузки на анкерную и стационарную крепь, установленные в демонтажной выработке.

В исследовании Ю. А. Масаева [67] изложены результаты по разработке и внедрению бетонных крепей для подземных горных выработок любого назначения. Применение данного вида крепей позволяет улучшить качество закрепления породных обнажений, повысить производительность и безопасность труда рабочих, обеспечить экономический эффект от представленных рекомендаций, в том числе в зонах влияния интенсивного обрушения и сдвижения подработанных пород очистными работами.

В работе А. Н. Супруненко [68] дан анализ категориям неопределенности и риска в принятии решений. Применительно к условиям угольной шахты разработана классификация производственных рисков, которая позволяет четко определить индивидуальную значимость риска в общей системе рисков шахты. Это облегчает поиск эффективных методов и приемов управления при реализации принимаемых решений.

К. А. Филимоновым в работе [69] исследовано влияние скорости подвигания очистного забоя на размер блоков обрушения кровли. Показан наиболее вероятный характер разрушения кровли в различных условиях разработки.

1.2 Анализ методов и средств принятия решений по автоматизации и роботизации технологий проведения горных выработок

Внедрение машин и механизмов в подземные проходческие работы началось с механизации основных процессов. Отечественные учёные в 1930-ых годах при расчёте основных параметров проходческих работ использовали нормы выработки. В работе [70] Э. О. Миндели использует трудоёмкость ведения горных работ в качестве основного оптимизируемого параметра проходческих работ, однако не учитывает параметры горных машин при расчёте.

Н. М. Покровский в материале [71] предлагает взаимоувязывть параметры бурильной каретки и погрузочной машины с глубиной бурения шпура для сокращения времени проходческого цикла.

Ю. А. Дмитрак в работе [72] в качестве основного оптимизируемого параметра использует скорость проходки, учитывая в расчётах завяленные параметры горных машин, но не учитывая горно-геологические условия их эксплуатации.

Комплексный подход к выбору горнопроходческого оборудования показан в работе М. В. Корнеева [73]. Оптимизация параметров горнопроходческих работ ведётся по комплексному критерию, состоящему из трёх параметров: скорость и стоимость проведения единичного объёма выработки, а также производительность труда горнорабочего.

Впервые выдвигается идея, что комбинация различных моделей горнопроходческой техники в итоге даёт тысячи вариантов комплектов горнопроходческого оборудования, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками для производственного процесса. Также рассматривается возможность подбора горнорабочих с оптимальными параметрами, такими, как стаж работы в проходческих работах, коэффициент специализации. Важным параметром для расчёта числа горнорабочих, которые должны обслуживать горные машины, должна быть площадь проходческого забоя на одного горнорабочего.

В итоге работы автор получает комплект горной техники для проходческих работ в условиях Донбасского угольного месторождения. Доказано, что выбранный комплект позволяет оказать существенное влияние как на уменьшение стоимости горнопроходческих работ, а также значительно увеличить скорость подвигания забоя и производительность труда горнорабочего.

Е. И. Рогов в работе [74] рассматривал обоснование параметров проходческих выработок с точки зрения теории графов. В качестве исходных данных для рационального выбора проходческой технологии он предлагает брать параметры горных машин, которые располагаются на вершине графов. Однако, решение данной задачи полным перебором труднодостижимо из-за множества конечных вариантов и сложности расчётов для каждого из них.

Проект «шахты будущего», при которой все технологические процессы будут выполняться автоматами, а их будут контролировать рабочие с поверхности, был обоснован Н. А. Чинакалом в работах [75, 76]. Основные принципы такой модернизации: повсеместное внедрение механизации и автоматизации, создание поточных линий и революция в горном машиностроении на основании новейших достижений химии. Эти исследования породили создание новых типов горной техники – подземного пневмотранспорта, бурильных полуавтоматов и других видов горной техники, которые могли работать в агрессивных зонах, опасных для человека.

Проблемы автоматизации и роботизации процессов подземной добычи угля анализировали В. Л. Конюх и О. В. Тайлаков в работах [77, 78]. Предпосылками к

роботизации подземной добычи угля авторы назвали ухудшение условий труда шахтёров, неполную загрузку горного оборудования, движение научного прогресса и исчерпание возможностей механизации и традиционной автоматизации процессов горного дела. Была отмечена неготовность к роботизации всех процессов очистных и проходческих горных работ и выделена тенденция к постепенному внедрению роботизации от отдельных операций до комплексной роботизации с автономным взаимодействием горных машин друг с другом. Также авторами рассматривается трудоемкость ручных операций, среди которых выделяются самые перспективные для роботизации, на основе которых составляются функциональные модели шахтных роботов.

В монографии [79] В. Л. Конюх рассмотрел множество аспектов внедрения робототехники в шахты. Классифицировал шахтных роботов, состояния среды, в которой их эксплуатируют, рассмотрел источники эффективности роботизации процессов подземной добычи угля. В качестве инструмента для прогнозирования целесообразности роботизации процессов горного дела автор предложил использовать имитационное моделирование с помощью программного продукта NetStar, работающего на математическом аппарате сетей Петри. Данный инструмент позволяет рассмотреть взаимодействие горных машин друг с другом и со средой в динамике, что позволяет выявить узкие места системы, недоступные для выявления традиционным анализом статичных моделей. Для большей адекватности и наглядности имитационной модели В. Л. Конюх предложил использование компьютерной анимации, отображающей результат работы имитационной модели. Также рациональным он признал использование в исследовании эффективности внедрения шахтной робототехники таких технологий, как экспертные системы, нейронные сети, Фуззи-системы и нечёткую логику.

В работе В. Л. Конюха и В. В. Окольнишникова [80] рассматривается работа дистанционно управляемых горных машин на большой глубине. Исследуются их характеристики: предельное заполнение ковша погрузочных машин для завершения зачерпывания, параметры информационной сети шахты. Выдвигается необхо-

димость установки на такие машины систем автовождения и устройств взаимодействия с подвижными и стационарными объектами. Исследование проводится на математической теории сетей Петри (Рисунок 9).

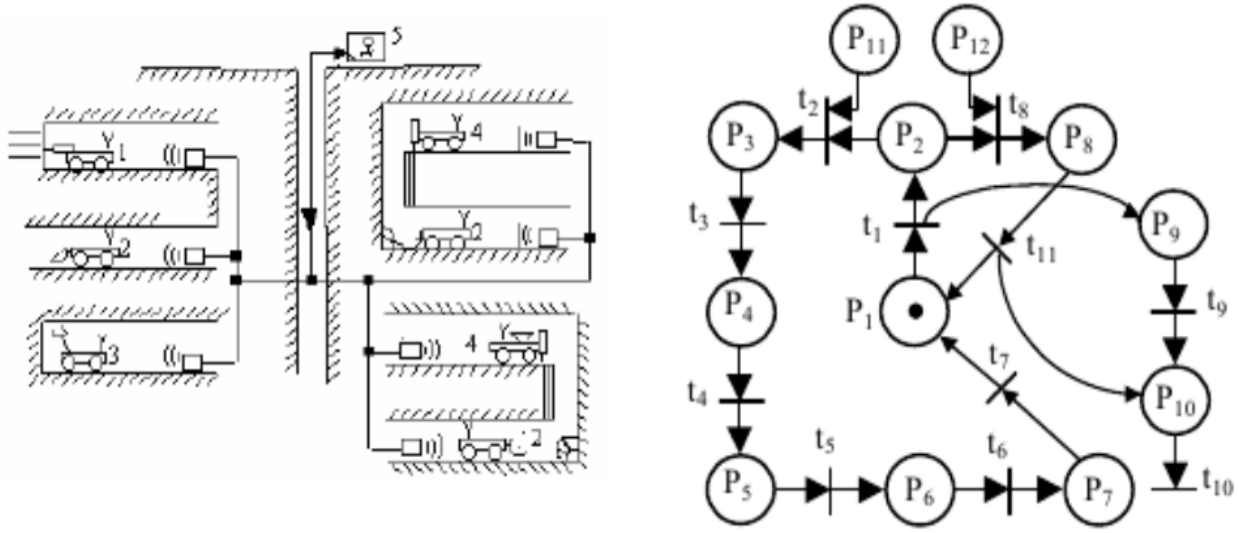


Рисунок 9 – Представление глубинной отработки полезных ископаемых дистанционно управляемыми горными машинами посредством сетей Петри

В исследовании [81] В. В. Зиновьевым было показаны преимущества имитационного моделирования горных работ на специализированных языках по сравнению с аналитическим моделированием по причинам меньших сроков разработки моделей, удобства внесения изменений в готовые модели, отсутствия необходимости получать аналитические зависимости для улучшения параметров моделируемых систем. Автором было предложено моделировать процессы горных подготовительных работ с помощью математического аппарата систем массового обслуживания (СМО) в виде многофазных многоканальных замкнутых систем (Рисунок 10). Также В. В. Зиновьевым было предложено учитывать вероятностную природу процессов подготовительных работ при их моделировании, что позволяет повысить точность моделирования и избежать крупных ошибок при исследовании сложных горнотехнических систем.

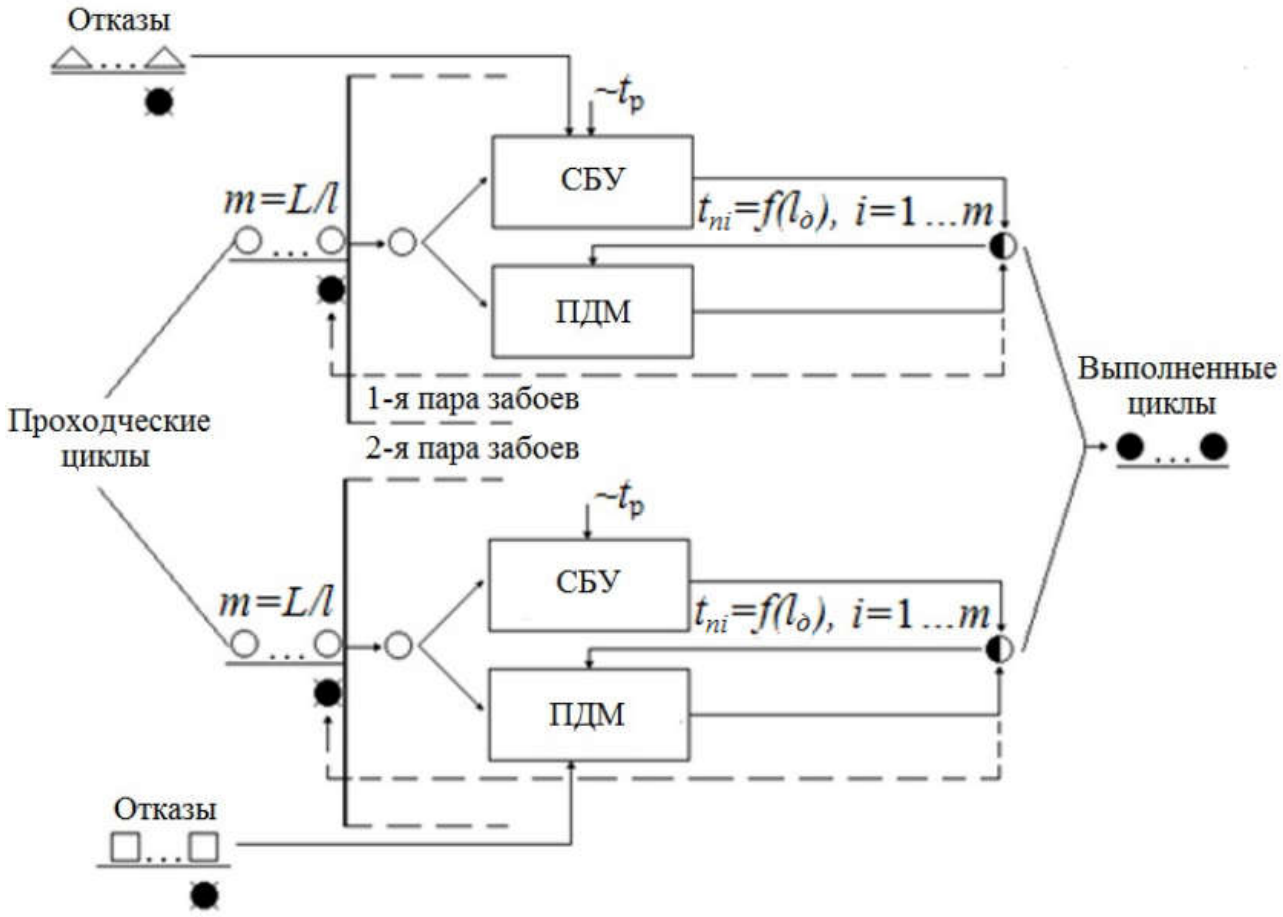


Рисунок 10 – Отображение горнопроходческих работ
в виде сети систем массового обслуживания

В статье [82] В. Л. Конюх и В. В. Зиновьев обобщили опыт применения имитационного моделирования для оптимизации параметров технологий транспортных, подготовительных и очистных работ для шахт Кузбасса. Оптимизируемой величиной стала прибыль, получаемая горными предприятиями при использовании различного оборудования. В работах [83-85] В. В. Зиновьев и соавторы развивают представление о моделях горных работ как о совокупности типовых имитационных модулей, в комбинациях отображающих различные технико-организационные варианты ведения горных работ. Использование таких модулей в специализированном программном обеспечении позволит обосновывать рациональные технико-организационные варианты горным инженерам, не владеющим навыками программирования и моделирования.

В работе [86] П. В. Гречишкиным разработана система имитационного моделирования работы очистного забоя, позволяющая осуществлять эффективный выбор оборудования, учитывая динамику ведения очистных работ. Система базировалась на проблемно-ориентированном имитаторе NetStar, использующем математический аппарат сетей Петри (Рисунок 11).

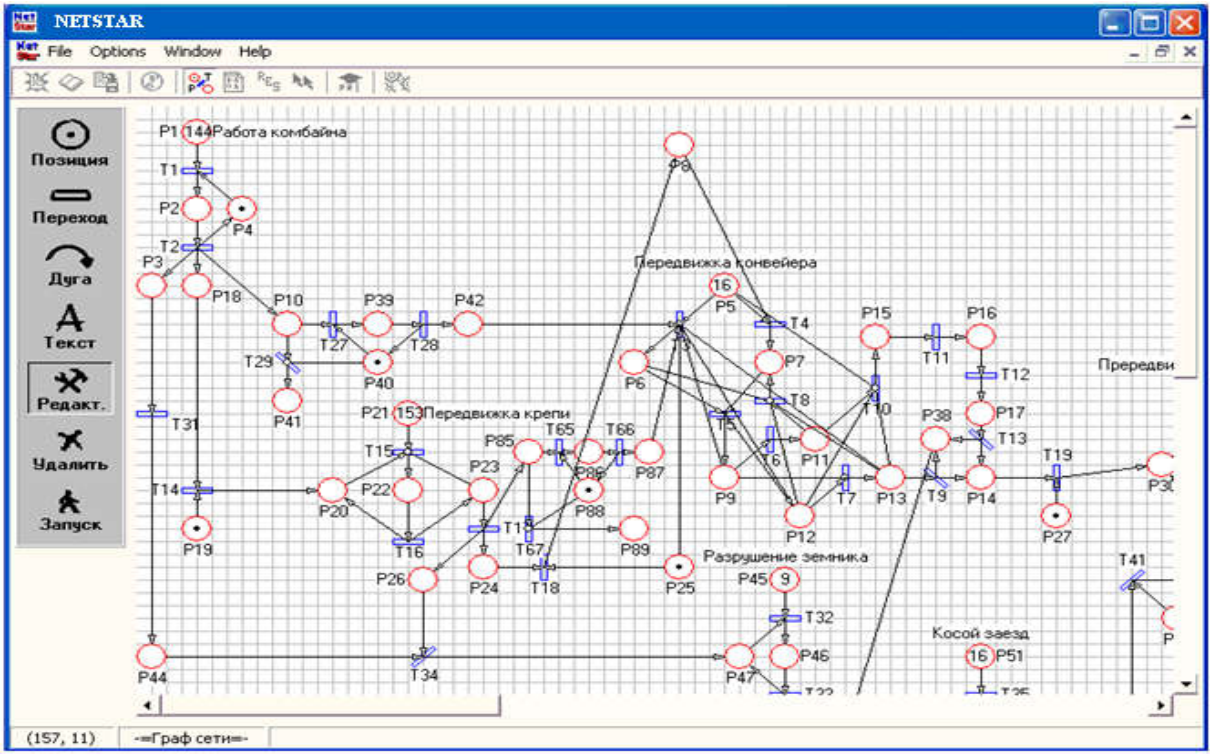


Рисунок 11 – Динамическое моделирование очистных работ на сетях Петри с использованием имитатора NETSTAR

Г. К. Клюкин в исследовании [87] рассматривал оптимизацию параметров проходческих технологий на этапе проектирования шахты. Проблема ограниченности и малого разнообразия альбомов технологических схем, используемых для проектирования шахт, приводит к использованию на практике неоптимальных технологий. Автор предлагает поиск оптимальной технологии проведения горных выработок методом полного перебора вариантов, параметры каждого из которых рассчитываются аналитически. Технически задачу предлагалось реализовывать с помощью специализированного программного обеспечения, хранящего техническую информацию в матричном виде и использующего удельную продолжительность процессов и цикла для расчёта выходных и технико-организационных параметров.

Модель процессов подготовительных работ, на основе которой создавалось программное обеспечение, являлась статичной и не учитывала их вероятностную природу.

В. А. Соловьёв в работе [88] указывает на необходимость оптимизировать показатели очистных и проходческих работ через увеличение коэффициента использования самоходного роботизированного оборудования. Для исследования использовались имитационные модели, основанные на математическом аппарате теории массового обслуживания и учитывающие вероятностную природу процессов проходческих буровзрывных работ. В результате было найдено рациональное соотношение числа рабочих забоев к числу единиц самоходной техники как 1:2.

Г. А. Стрельцова и А. М. Ткаченко в статьях [89, 90] предлагают использовать при проектировании «Интеллектуального рудника XXI века» системно-функциональный подход в рамках методологии IDEF (Рисунок 12). Исследованию подверглась информационная сеть горного предприятия и изменения её функционирования при комплексной автоматизации подготовительных, добычных, вспомогательных работ. Авторами построены структурно-функциональные модели системами управления РТК и их декомпозиционные диаграммы глубиной в два уровня.

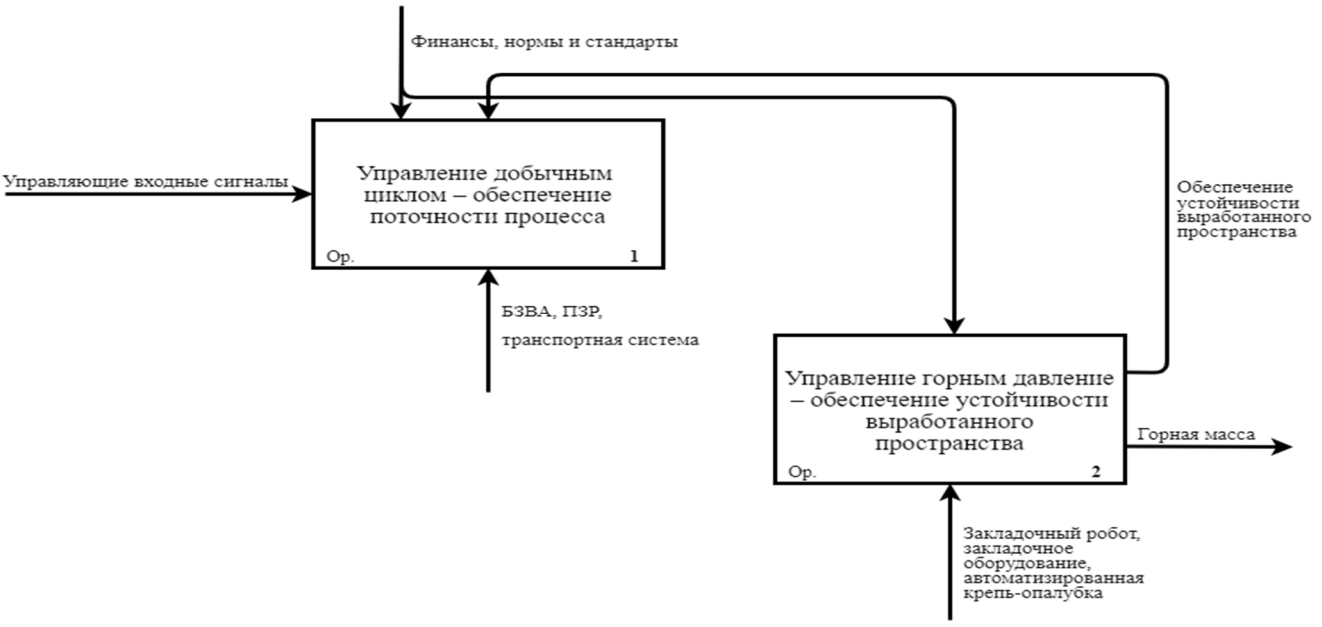


Рисунок 12 – Концепция «Интеллектуального рудника XXI века» с элементами автоматизации и роботизации через системно-функциональный подход в рамках методологии IDEF0

В работе А. С. Оганесян [91] для получения рационального варианта технологической схемы процессов на угольных предприятиях использует алгоритм, использующий эволюционный подход. На основе обобщённой классификационной структуры создаётся перечень всех возможных вариантов технологических схем, учитывающий ограничения на совместное использование отдельных элементов, горно-геологические и горнотехнические условия. Каждый вариант технологической схемы оценивается с помощью статистических данных угольных предприятий региона, из вариантов принимается имеющий наивысшие показатели.

А. Г. Журавлёв в исследованиях [92-95] отмечает необходимость создания систем мобильного краткосрочного и средне- и долгосрочного прогнозирования работы горных предприятий. Автор подтверждает сложность задачи выбора оптимальных параметров горных машин и транспортной инфраструктуры из-за множества факторов, воздействующих на систему, их взаимного влияния, постоянно изменяющихся параметров месторождения, а также быстрое усовершенствование горных машин, новые модели которых выпускаются регулярно. Также проблемой для проектировщиков горных предприятий становится актуализация стоимости горных машин.

Автор приходит к выводу, что при выборе варианта горного предприятия необходимо иметь соответствующую нормативно-техническую базу горных машин с их параметрами, а также инженерного инструмента, который мог бы предсказать рабочие характеристики нового оборудования в старых условиях, либо уже имеющихся горных машин в новых условиях.

В центре такого инструмента А. Г. Журавлёв видит имитационную модель функционирования всего горнодобывающего предприятия (Рисунок 13), отмечая, что расчёт параметров такой модели требует огромных вычислительных ресурсов и на данный момент времени трудно реализуем.

Рисунок 13 – Структурная схема функционирования модуля имитационного моделирования для краткосрочной оптимизации параметров горнодобывающих предприятий

Также одним из важнейших модулей такой системы автор видит модуль оптимизации, который для краткосрочных задач оптимизации будет использовать имитационное моделирование, а для средне- и долгосрочных задач будет использовать алгоритм верхнего уровня.

1.3 Обзор средств автоматизации и роботизации основных процессов проходческих работ буровзрывным и комбайновым способами

Основой современной робототехники в изменяющейся внешней среде является «техническое зрение» машин. Способы ориентации автоматики в пространстве рассматривал М. Магнуссон в работе [96]. Рассматриваются примеры использования различных видов сенсоров: сенсор-радар, лазерный сканер (лидар), и сонар

для получения данных о внешней среде, особенности алгоритмов обработки полученных данных и построения из них корректных 3D-моделей окружающего пространства (Рисунок 14). Также автором рассматриваются существующие модели роботов с «техническим зрением», использующиеся в промышленности и исследовательской деятельности, и опыт их применения.

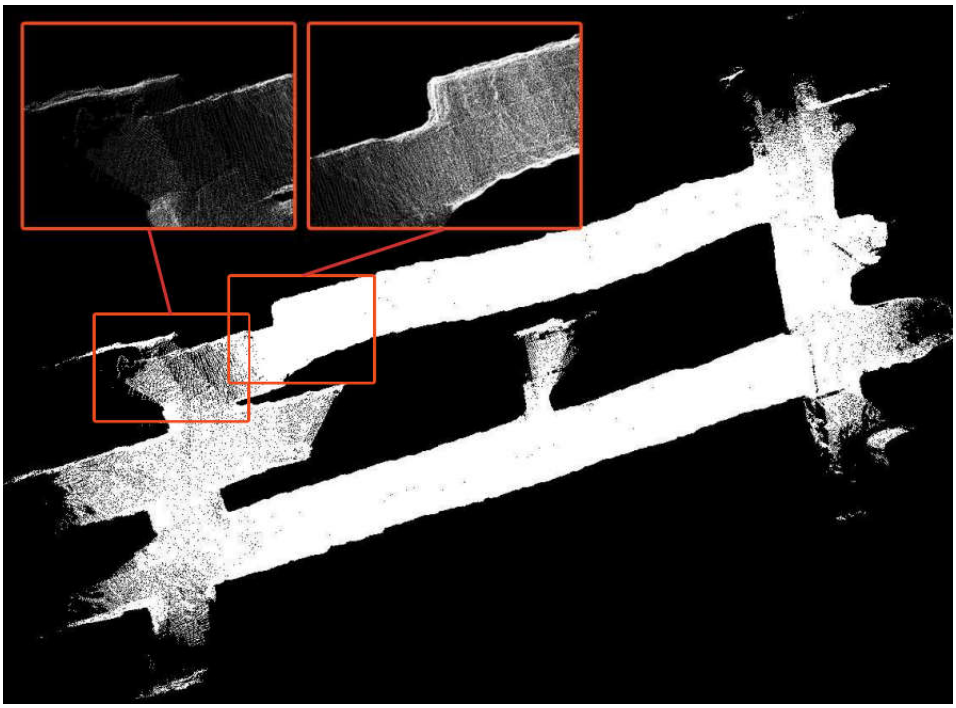


Рисунок 14 – Трёхмерное изображение горных выработок, полученное с помощью мобильного робота с лидаром на борту

Опыт применения «технического зрения» на очистных работах в шахте рассматривал М. Ройтер в работе [97]. В описываемом примере сенсорная система располагается на механизированной крепи и реализована на основе ультразвуковых и инфракрасных датчиков, а также инклинометра. Это позволяет системе «видеть» расстояние между секциями крепи и конвейером, положение очистного комбайна, а также отслеживать своё положение относительно горизонта.

В работе [98] описываются технологические преимущества автоматизации процесса бурения шпуров при ведении буровзрывных работ. При её внедрении улучшаются многие производственные показатели: на порядок ускоряется перестановка бура от шпура к шпуру, уменьшается время бурения одного шпура за счёт приспособления режима бурения к изменяющейся крепости буримой породы,

уменьшения числа шпуров и увеличения их длины. Также время таких операций, как уточнение направления проходческих работ и разметка шпуров, стремится к нулю. В итоге при использовании автоматизированных бурильных машин время цикла бурения сокращается в среднем на 20%.

Предложение использовать роботизированную буропогрузочную машину с нагребающими лапами для увеличения производительности проходческих работ внёс Н. А. Глебов [99] (Рисунок 15). Её функционал заключается в бурении шпуров, раскайловке крупных фракций породы и погрузке отбитой породы на конвейер. Ориентацию машины в пространстве предлагается осуществлять навигационной системой на основе лазерного сканера, а раскайловку породы – с помощью системы обеспечения гранулировки на основе фотографирования и системы распознавания фракций по полученной фотографии.

Предложения по автоматизации процесса заряжания шпуров представлены в работе [100]. Показаны модели для заряжания шпуров как гранулированными, так и эмульсионными ВВ, сенсибилизируемыми на месте ведения зарядных работ в течение нескольких минут. Также представлена технология автономного инициирования взрыва, базирующаяся на размещаемых в шпурах микроконтроллерах, отсчитывающих время независимо от состояния взрывной сети.

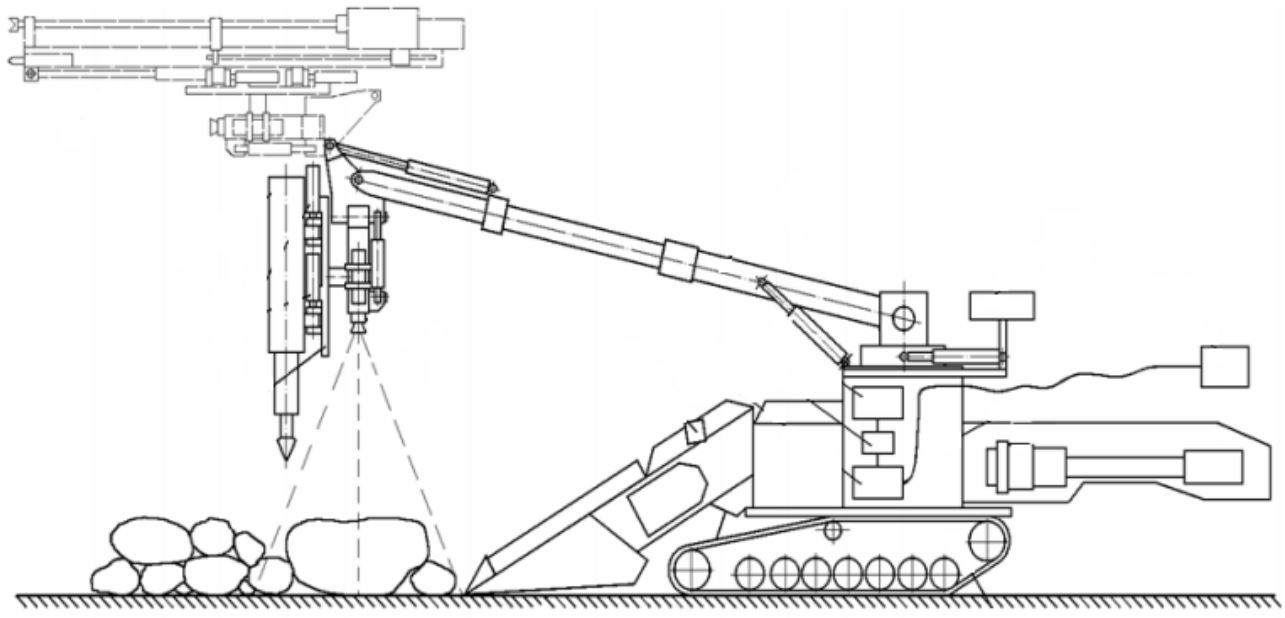


Рисунок 15 – Роботизированная буропогрузочная машина с нагребающими лапами и возможностью раскайловки породы

В работе [101] было произведено сравнение безлюдных технологий, предлагаемых фирмами Caterpillar, Sandvik, AthlasCopco, Komatsu и ОАО «БелАЗ» для открытой и подземной добычи полезных ископаемых (Рисунок 16). Было предложено уточнить терминологию управления горными машинами на основе анализа отечественной и зарубежной литературы, а именно: различать непосредственное (контроль человека над всеми операциями непосредственно на месте), дистанционное (контроль человека над всеми операциями из безопасного места), полуавтономное (контроль человека за всеми операциями, кроме рутинных) и автономное управление (человек выступает только наблюдателем за выполнением технологических операций). Автор выделил преимущества и недостатки каждого из видов контроля. Основной особенностью дистанционного управления автор указывает дешевизну и возможное снижение производительности горных машин. Соответственно, машины с автономным управлением имеют лучшие технологические показатели, но значительно увеличат капитальные затраты горного предприятия.

Рисунок 16 – Роботизированная погрузочно-доставочная машина компании Sandvik, осуществляющая автономное управление

Тенденции к роботизации рассматривались коллективом авторов во главе с П. И. Тарасовым в работе [102]. Исследователи провели сравнение различных типов управления горной техникой и выявили преимущество комбинированного (по-

луавтономного) способа управления по критериям увеличения производительности и уменьшения затрат использования безлюдных технологий. Развитие автоматизации горной техники авторы видят в совершенствовании программного обеспечения, управляющего производственными процессами, в том числе осуществляющего управление техникой, диспетчеризацию, оптимизацию технологических процессов непосредственно во время их выполнения и информационной интеграции отдельных управляющих программ в единую информационную сеть горного предприятия, принимающую решения по организации работ.

Вопросы позиционирования горного оборудования и персонала в подземных выработках рассматривали А. С. Ваганов и Л. В. Урусов [103]. Помимо позиционирования горного оборудования путём ориентирования в выработках авторы предлагают его позиционирование относительно информационных сетей, которые с течением времени должны обеспечивать связь с поверхностью в каждой точке шахты (Рисунок 17). Исследователи указывают, что организация такой сети, выполняющей все возложенные на неё функции, в том числе передача цифровой и голосовой информации и позиционирование в настоящее время возможны только с применением технологии WLAN с производительностью не менее 30 Мбит/с.

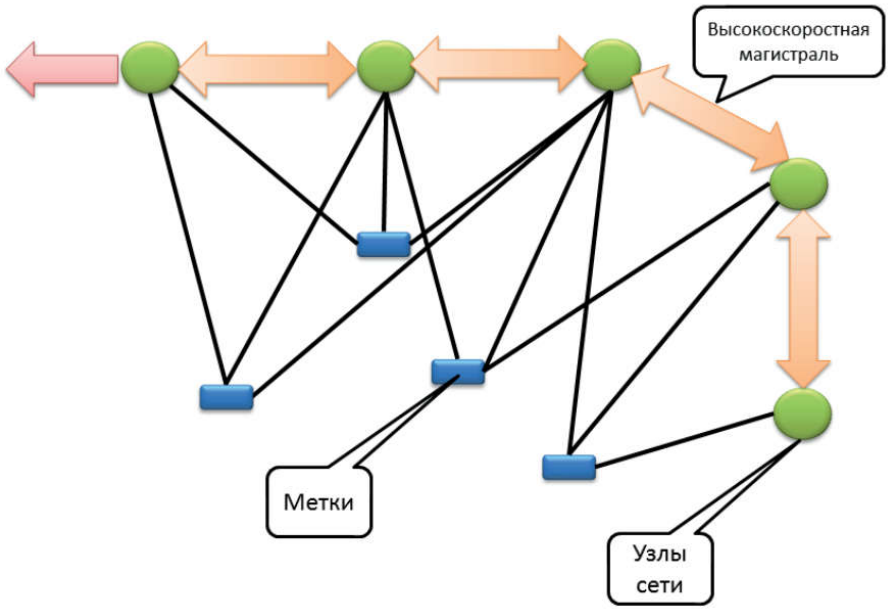


Рисунок 17 – Топология локальной сети связи шахты в горной выработке с минимальными потерями сигнала

Большой вклад в обобщение опыта автоматизации горнопроходческих работ внёс коллектив учёных в составе В. Н. Опарина, Е. П. Русина, А. П. Тапсиева, А. М. Фрейдина, Б. П. Бадтиева [104, 105]. Передовые технологии буровзрывных проходческих работ авторами были рассмотрены на примерах высокотехнологичных рудников Kiruna (Швеция) и Kemi (Финляндия). Исследователи описали предложения по роботизации множества процессов на рудниках: от бурения шпуров до автоматического контроля за состоянием шахтной атмосферы и процессом водоотлива. Также авторами были рассмотрены и классифицированы программные системы, используемые для обеспечения деятельности горного предприятия, по целевому назначению (программы общего назначения, специализированные, управления производством или регистрации производства) и по стоимости и доступности (общедоступные, средней доступности, интегрированные комплексы).

Группа исследователей СибГИУ во главе с В. Н. Фряновым в работах [106-112] описывает различные этапы внедрения роботизации в угледобывающую промышленность. В качестве первого этапа выделены внедрение роботизации в очистные забои, второго – в проходческие. При третьем этап внедрения роботизации подвергается управление стационарными объектами шахты, а при четвёртом – управление всеми вспомогательными операциями. Последний этап внедрения роботизации предполагает не только полное управление производством роботами, но и высокотехнологичные способы доставки полезного ископаемого на-гора, например, выдачу углеметановой массы после дезинтеграции угля.

Также в работах коллектива упоминается роботизированная проходка для технологии предварительного разрушения угля мощных угольных пластов в подкровельной толще. Предлагается проводить камеры впереди очистного забоя посредством роботизированных агрегатов, которые контролируют операторы из безопасных рабочих мест. Обосновываются технологические параметры роботизированного оборудования, которое позволяет проходить выработки короткими забоями без присутствия человека, а также параметры роботизации оборудования, осуществляющего транспортировку горной массы на поверхность и автоматическое управление потоками горной массы.

1.4 Применение современных информационных технологий для оптимизации параметров сложных производственных систем

Анализ методов и средств принятия решений о внедрении автоматизации и роботизации в технологии проведения горных выработок показал, что классическая оптимизация применяется лишь для класса задач с небольшим числом факторов (не более трёх). В противном случае автоматизация и роботизация рассматриваются на концептуальном уровне либо в рамках одного технологического процесса.

Комплексное рассмотрение автоматизации и роботизации всех основных процессов типовых буровзрывных и комбайновых технологий проведения горных выработок значительно повышает сложность решения оптимизационной задачи в классической постановке. Тем не менее, существует множество решений аналогичных задач многофакторной оптимизации на основании современных информационных технологий, а именно – интеграции эволюционного алгоритма и имитационного моделирования.

В работе [113] коллектива во главе с А. А. Емельяновым даётся определение решения задач оптимизации сложных производственных систем через интеграцию имитационного моделирования и эволюционного алгоритма. Получаемый алгоритмический комплекс обладает преимуществами обоих методов: он хорошо работает с многофакторными задачами оптимизации, позволяя за приемлемое машинное время получить результат, близкий к оптимальному, а учёт реальной природы производства и всех его временных характеристик позволяет надежно говорить о том, что результат оптимизации будет значительно приближен к результатам его реализации на практике. В работе даётся общая постановка задачи оптимизации, реализуемая с помощью интеграции двух методов, а также рассматриваются основные способы её реализации.

В работах М. А. Хивинцева и А. С. Акопова [114, 115] показана адаптация комплекса имитационного моделирования и эволюционного алгоритма к решению задачи оптимизации работы предприятия дистанционной торговли. Полученный

программный комплекс MAGAMO позволяет учитывать в задаче оптимизации множество факторов: качество исполнения заказов, доступность товаров на складах, маркетинговая активность в различных регионах, категориях товаров и сегментам клиентов, стоимость доставки и прочие. Оптимизация велась по комплексному критерию максимума прибыли, размера клиентской базы и минимума времени оборачиваемости запасов. Для решения задачи были исследованы различные типы эволюционного алгоритма, определен тип, позволяющий эффективно решить поставленную задачу.

Интеграция эволюционных алгоритмов с имитационным моделированием находит широкое применение. Так, в работе [116] она была использована в экологических целях. Программным продуктом на её основе было рассчитано расположение и состав рассадки деревьев в городе Ереван, комплексная целевая функция состояла из стоимости высадки деревьев и чистоты воздуха около социально-значимых объектов, таких, как детские сады. Была выбрана версия эволюционного алгоритма с несколькими изолированными расчётными поколениями, которые обмениваются наилучшими параметрами во избежание застревания алгоритма в локальных оптимумах.

В исследовании И. М. Космачевой и соавторов [117] интеграция эволюционного алгоритма и имитационного моделирования использовалась для проектирования информационных систем. Целевым показателем эволюции была установлена безопасность проектируемой системы от несанкционированного вмешательства, в том числе с использованием искусственного интеллекта. В качестве факторов оптимизации было выбрано включение или невключение в информационную систему тех или иных элементов, обеспечивающих её безопасность на нескольких уровнях. Преимущество имитационного моделирования в этой системе заключается в возможности проверки надёжности проектируемой системы на взлом без реальных рисков и больших затрат ресурсов и времени.

В работе [118] А. Т. Гурьев объединение эволюционного алгоритма и имитационного моделирования применялось для оптимизации лесозаготовительного производства с учётом вероятностной природы производства и производственных

потерь. В результате получены зависимости объёмы запаса деревьев на различных складах.

Д. А. Петросов и А. Г. Бажанов в работе [119] предложили интеграцию эволюционного алгоритма, имитационного моделирования на сетях Петри и методологии моделирования систем IDEF3. Структура системы, параметры которой поддаются оптимизации, представляется в виде стандартной модели логической последовательности действий на производстве IDEF3, включающей в себя перекрёстки «И», «ИЛИ» и «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ». Авторами разработаны сегменты сетей Петри, которые отображают данные перекрёстки, что позволяет отобразить в виде сети Петри всю IDEF3-модель (Рисунок 18). После этого с помощью эволюционного алгоритма подбираются параметры исследуемой системы, а функция полезности вычисляется с помощью математического аппарата сетей Петри. Данная интеграция методов была апробирована для определения параметров сельскохозяйственной системы взращивания озимой пшеницы, целевой функцией была прибыль предприятия, а факторами – способы исполнения технологических процессов и их стоимость.

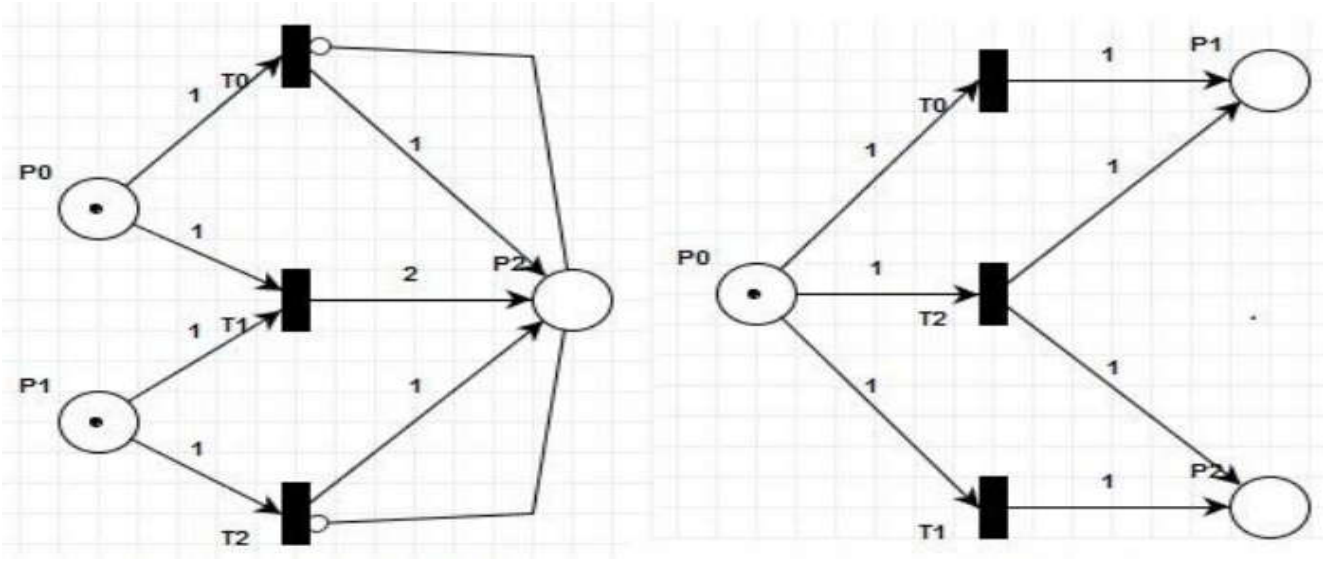


Рисунок 18 – Представление логических перекрёстков с IDEF3-модели в виде графа сетей Петри

В материале [120] П. В. Афонин и соавторы представили три примера применения комплекса из эволюционных алгоритмов и имитационных моделей для мо-

дернизации производства. В первом оптимизации подвергались параметры раскройки материалов для производства мебели, с учётом срока выполнения заказов, загруженности оборудования и рабочих. Во втором примере оптимизировались параметры системы поставок и управления складом, а в третьем примере программный комплекс составлял рабочее расписание с учётом привязанности рабочих к определённым станкам и маршруты их движения.

Масштаб задач, решаемых комплексным использованием эволюционных алгоритмов и имитационного моделирования, показывают исследования Г. Л. Бекларян [121, 122]. В первом исследовании моделируемой областью являются внешнеэкономические отношения Российской Федерации со странами Евросоюза, АТЭС, ЕАЭС и прочими. Они же являются агентами имитационного моделирования с заранее прописанными программами поведения, реализованными в системе AnyLogic. Эволюционный алгоритм определял оптимальные параметры импортных пошлин и квоты на импорт. Во втором исследовании моделируемой системой являлись основные источники выбросов в Республике Армения. С помощью системной динамики были проработаны оптимальные сценарии модернизации предприятий для снижения нагрузки на экологию с минимально возможными затратами и государственного участия в данной модернизации.

1.5 Актуальность, цель и задачи обоснования и разработки методики комплексной оптимизации параметров технологий проведения горных выработок при автоматизации и роботизации технологических процессов

На основании проанализированной литературы сделан вывод, что в большинстве случаев повышение эффективности горных работ производится в рамках стандартных технологических альбомов, при этом редко учитываются нестандартные, но эффективные варианты.

Математическая оптимизация применяется в случаях, когда существует один управляемый параметр или несколько факторов, объединённых в комплексный критерий оптимизации. При необходимости оптимизации значений нескольких

управляемых параметров применяют либо эвристическую оптимизацию, либо делают полный перебор всех вариантов с помощью специализированных программ для ЭВМ.

Автоматизация и роботизация рассматриваются в контексте перспективы их единичного внедрения, комплексный подход рассматривается в качестве рекомендаций, но не в качестве оптимального решения задачи. Приводятся идеи о построении «цифровой шахты будущего», но не указывается математический аппарат, который позволит обосновать её параметры.

В соответствие с выводами были выявлены объект и предмет исследования, на основании идеи исследования были поставлены его цель и задачи.

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.

Целью работы является 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.

Основные научные задачи и ожидаемые результаты их решения систематизированы в Таблице 1.

Таблица 1. Направления научных исследований по обоснованию и разработке методики оптимизации параметров технологий проведения горных выработок при автоматизации и роботизации технологических процессов

№	Направления и задачи исследований	Ожидаемые результаты 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	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	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	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	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	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

ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЧИСЛА ВОЗМОЖНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОМБАЙНОВЫЕ И БУРОВЗРЫВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

В настоящей главе обосновывается многовариантность параметров подземной технологии проведения горных выработок при автоматизации и роботизации её технологических процессов с применением системно-функционального анализа технологических процессов проходческого цикла, теории множеств и комбинаторного анализа.

2.1 Анализ технологических процессов технологий проведения горных выработок с позиции автоматизации и роботизации

Анализ литературных источников показал основные минусы современного принятия решений о выборе варианта технологий проведения горных выработок в шахтах с оптимальными параметрами. Параметры технологии обосновываются в основном исходя из технологических альбомов, а нестандартные и автоматизированные либо роботизированные зачастую упускаются из виду. Требования по безопасности горнорабочих косвенно влияют на проектирование шахт, выступая в роли ограничений.

Оптимальные параметры технологий проведения горных выработок могут быть получены с помощью выборочной автоматизации или роботизации отдельных технологических операций. Для поиска таких нестандартных вариантов использован системно-функциональный подход в рамках методологии IDEF0 [123]. Данная методология разработана в США в 1981 году и применялась в первую очередь при автоматизации военно-промышленного комплекса США, а затем стала успешно применяться во всех сферах американской промышленности.

Проблемой декомпозиции любой системы является человеческий фактор, влияющий на выбор её автором числа уровней декомпозиции, количества элементов декомпозиции на каждом её уровне и так далее. Точное следование алгоритму IDEF0, позволяет уменьшить субъективный фактор декомпозиции и точнее рассмотреть систему.

Рассматриваемый объект (процессы проходческих работ) является сложной системой, характеризующейся наличием множества технологических операций и различных исполнителей (горных машин и горнорабочих), случайно взаимодействующих друг с другом во внешней среде (пространстве горных выработок). Для поиска нетрадиционных вариантов автоматизации и роботизации проходческих работ необходимо выяснить, какую деятельность можно передать от горнорабочего к автоматике или роботу и какие существуют технические предложения для обеспечения автономной реализации переданной деятельности.

В рамках стандарта IDEF0 деятельность на производстве, ограниченная контекстом системы (подготовительные работы), представляется в виде функциональных блоков (Рисунок 19), преобразующих вход в выход, что соответствует системно-функциональному подходу. Также учитываются регулирующее правила и законы, по которой исполняется деятельность, и ресурсы, задействованные в процессе выполнения деятельности – расходные материалы, горные машины, человеческий ресурс.

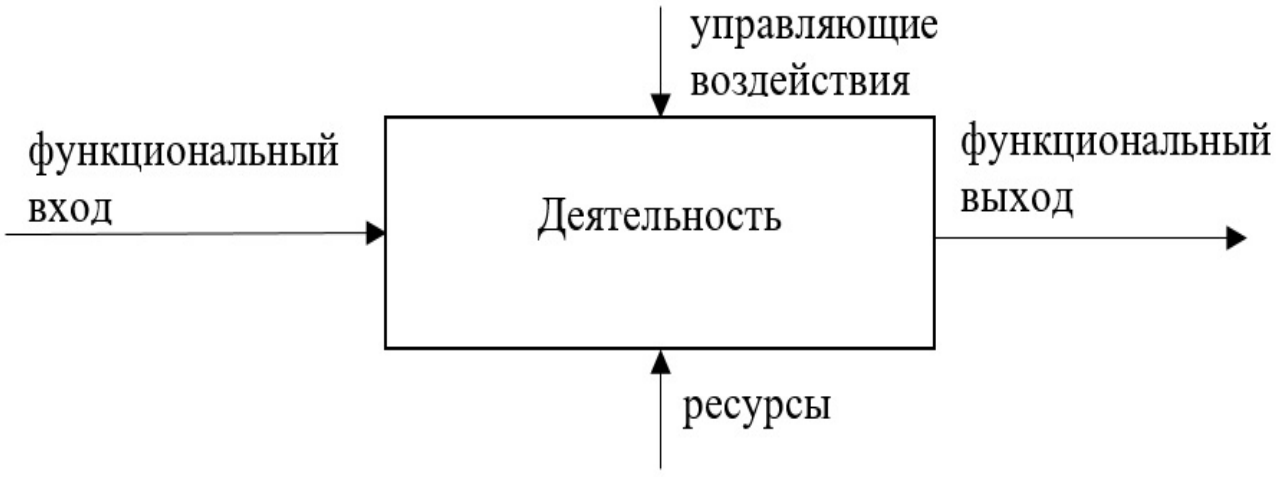


Рисунок 19 – Системно-функциональный подход в рамках методологии IDEF0

Первоначально вся технология проведения горных выработок рассматривается в виде одного функционального блока первого уровня, который в дальнейшем декомпозируется на несколько функциональных блоков второго уровня, в совокупности выполняющих функционал родительского блока. Все входы, выходы, ресурсные потоки и управляющие воздействия сохраняют своё положение на втором уровне декомпозиции. В дальнейшем происходит необходимое количество декомпозиций до появления технологических операций, то есть действий, управление которыми затруднено или невозможно. Например, трудно вмешаться в деятельность лазерного навигационного датчика, поэтому декомпозиция заканчивается на ней.

Системно-функциональный анализ технологий проведения горных выработок позволил рассмотреть технологические процессы (Рисунки 20 и 21) и технологические операции процессов бурения шпуров, заряжания шпуров, оборки забоя для буровзрывной технологии (Рисунки 22-24) и отбойки горной массы для комбайновой технологии (Рисунок 25). Также аналогичными для обеих технологий являются процессы погрузки отбитой горной массы и крепления выработки анкерами и металлической аркой (Рисунки 26 и 27).

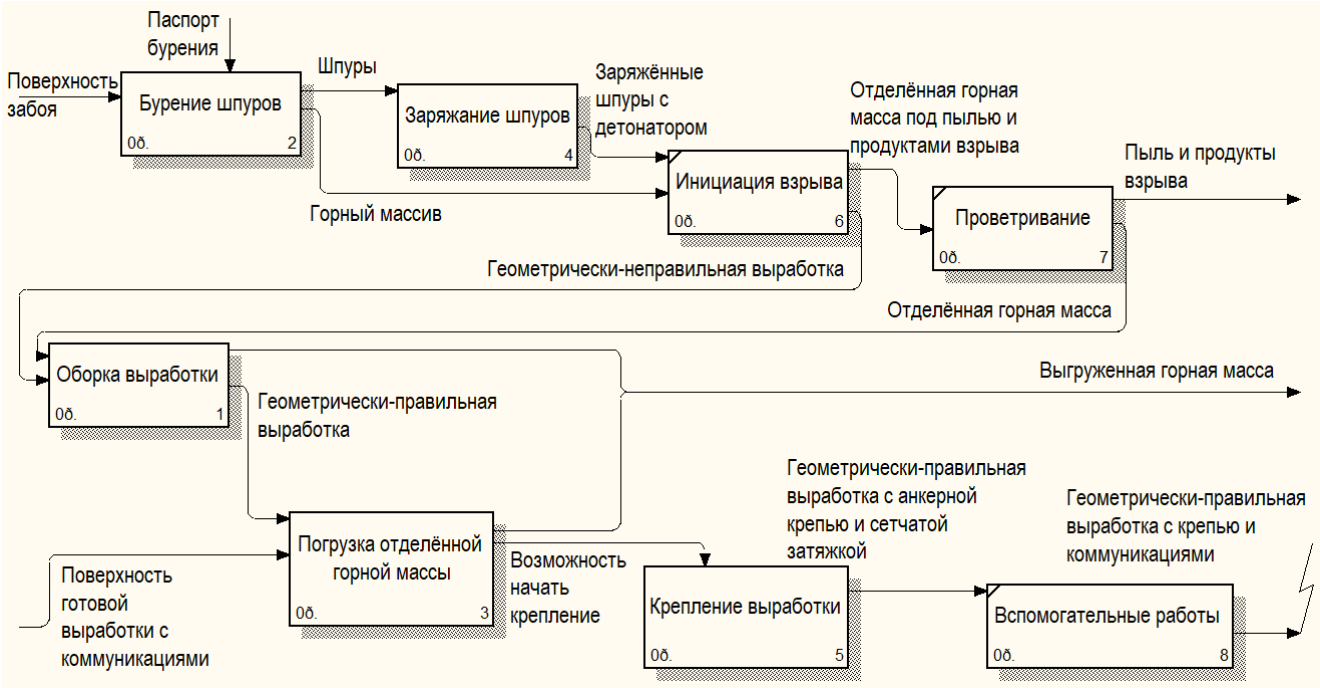


Рисунок 20 – Буровзрывная технология проведения горных выработок по стандарту системно-функционального моделирования IDEF0

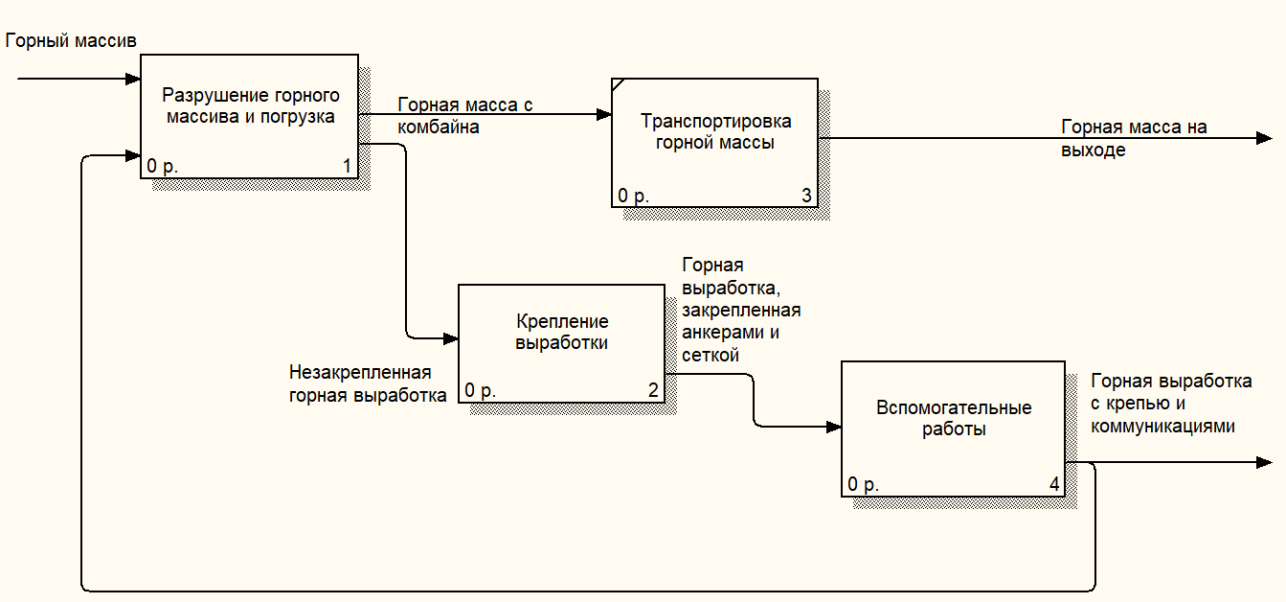


Рисунок 21 – Комбайновая технология проведения горных выработок по стандарту системно-функционального моделирования IDEF0

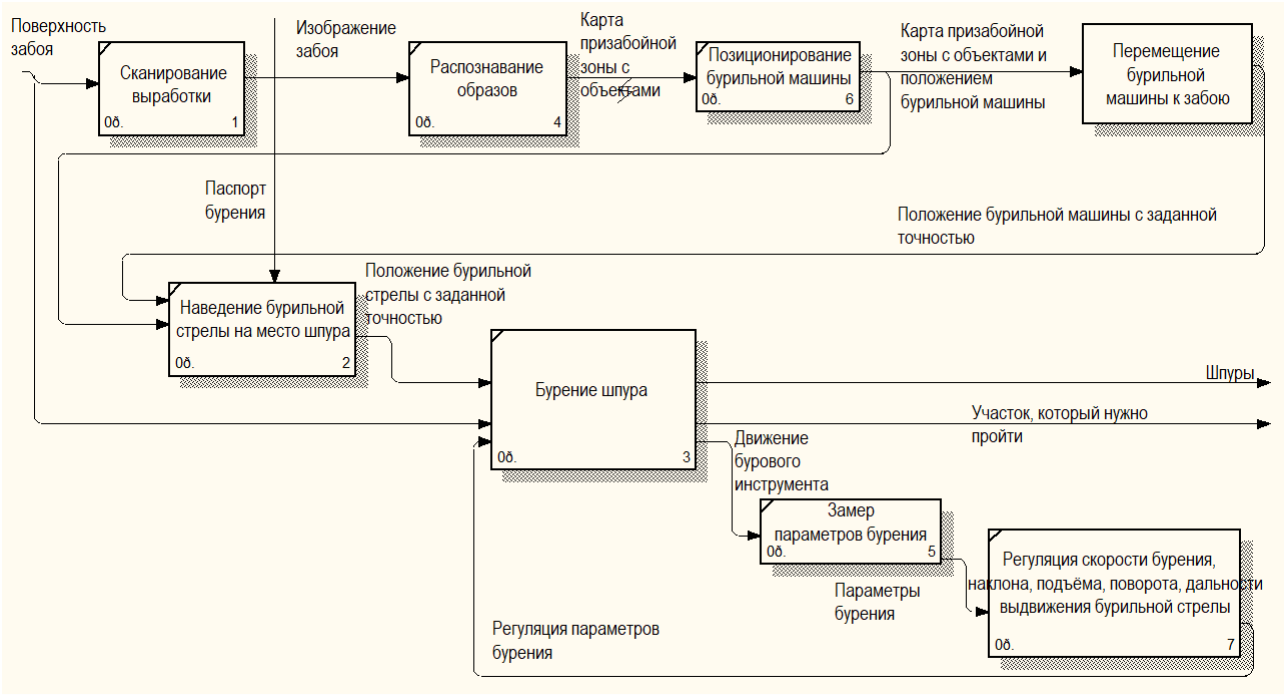


Рисунок 22 – Процесс бурения шпуров буровзрывной технологии проведения горных выработок по стандарту системно-функционального моделирования IDEF0

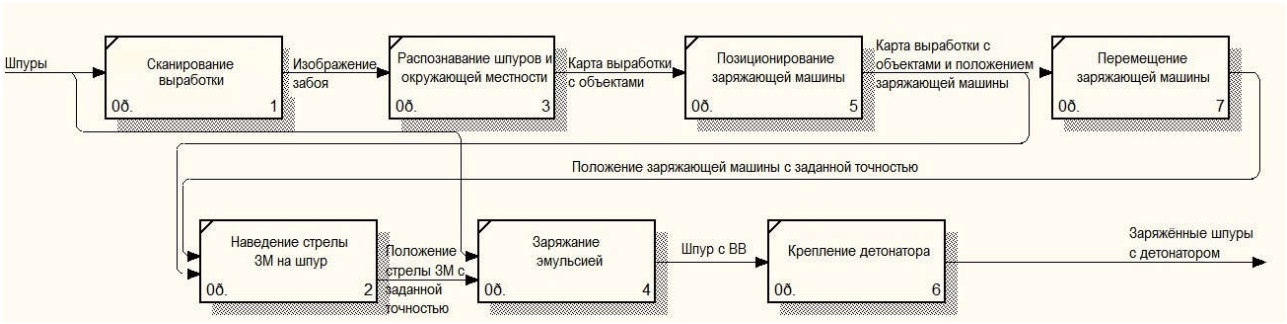


Рисунок 23 – Процесс заряжания шпуров буровзрывной технологии проведения горных выработок по стандарту системно-функционального моделирования IDEF0

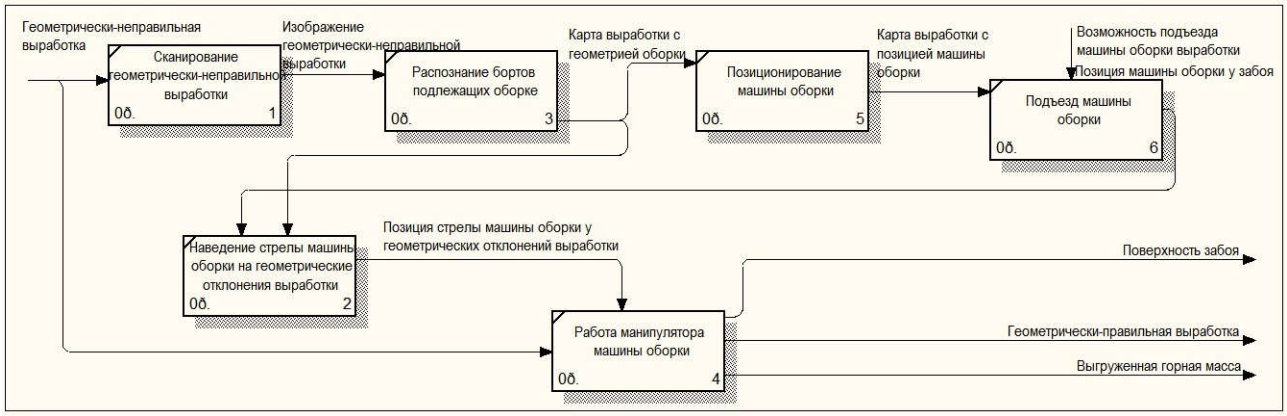


Рисунок 24 – Процесс оборки забоя буровзрывной технологии проведения горных выработок по стандарту системно-функционального моделирования IDEF0

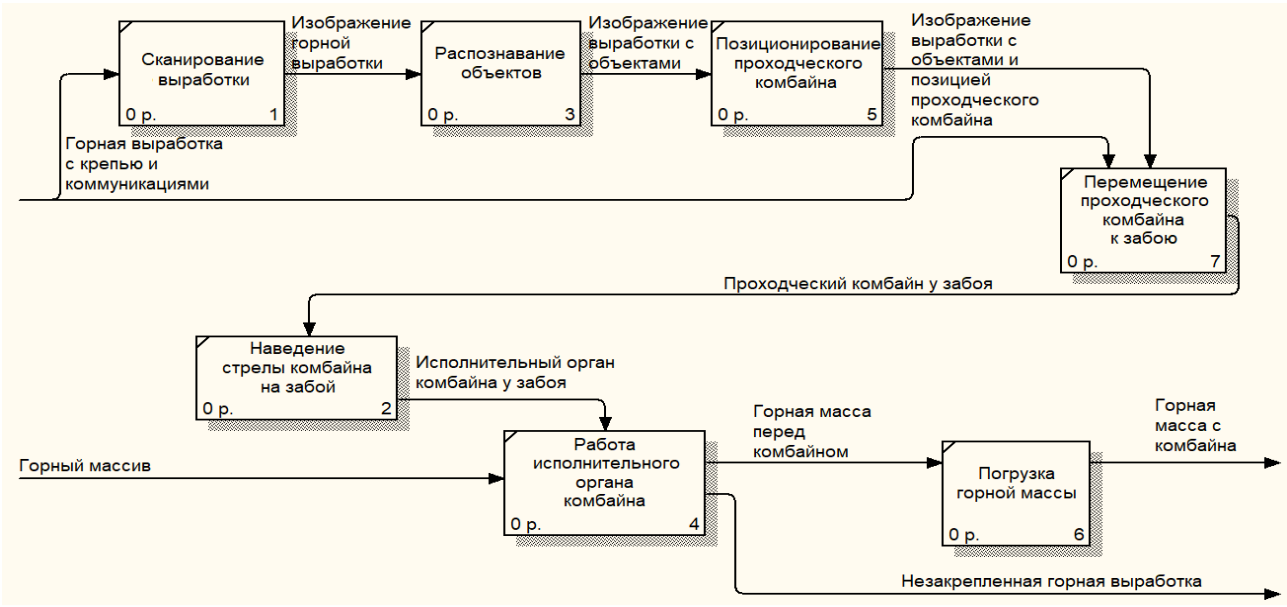


Рисунок 25 – Процесс отбойки горной массы комбайновой технологии проведения горных выработок по стандарту системно-функционального моделирования IDEF0

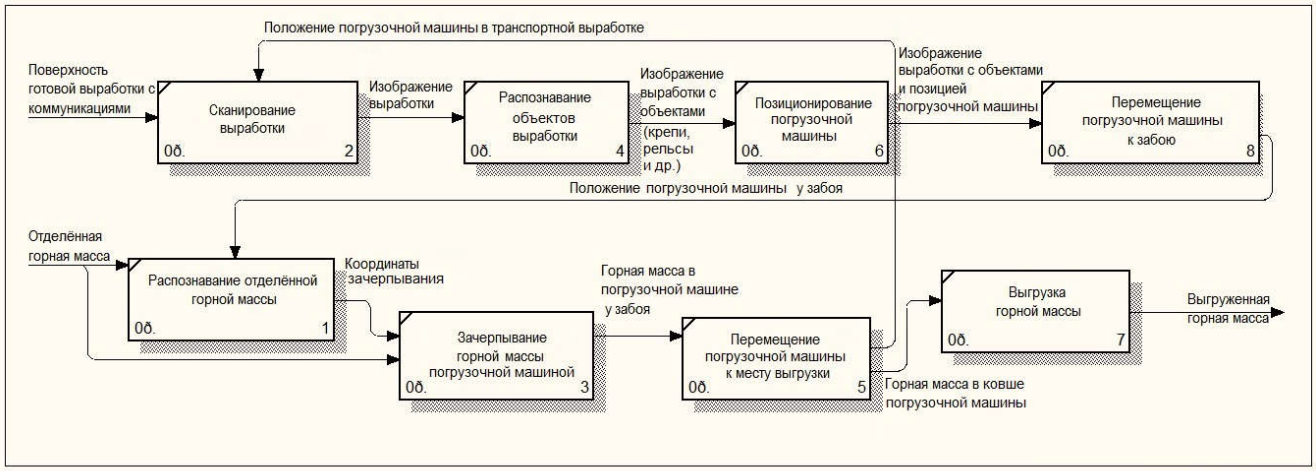


Рисунок 26 – Процесс погрузки горной массы для буровзрывной и комбайновой технологий проведения горных выработок по стандарту системно-функционального моделирования IDEF0

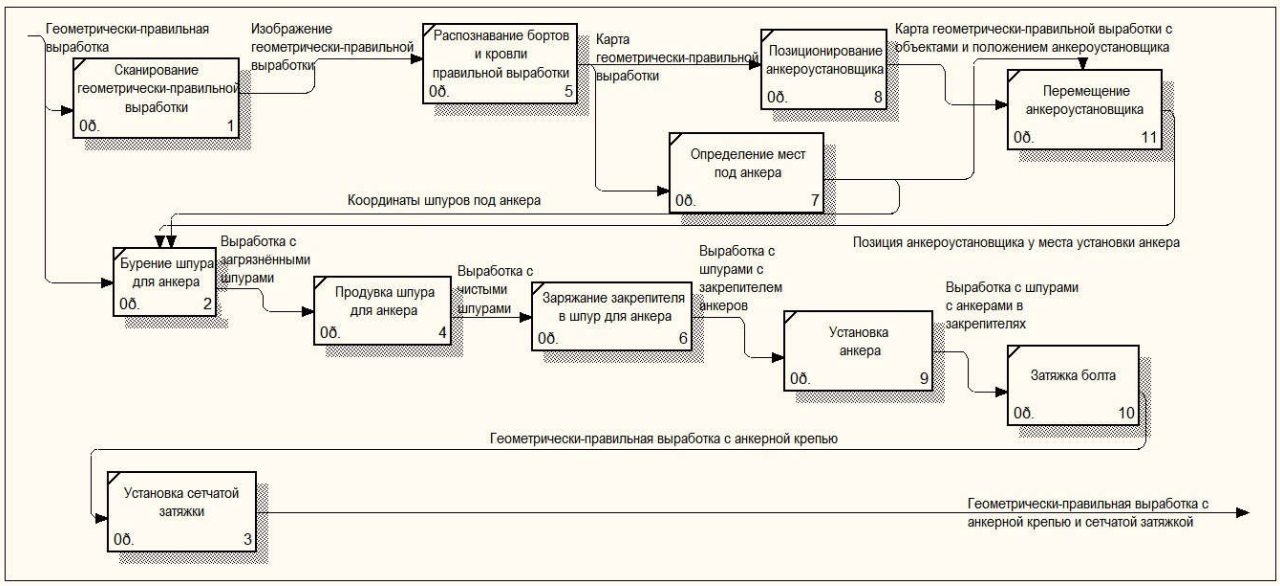


Рисунок 27 – Процесс крепления выработки для буровзрывной и комбайновой технологий проведения горных выработок по стандарту системно-функционального моделирования IDEF0

В результате анализа технологических процессов в каждом из них выявлена функциональная подсистема, отвечающая за ориентацию горных машин в пространстве, их перемещение и наведение их рабочих органов (Рисунок 28). Их основная задача – информационное обеспечение работы горных машин.

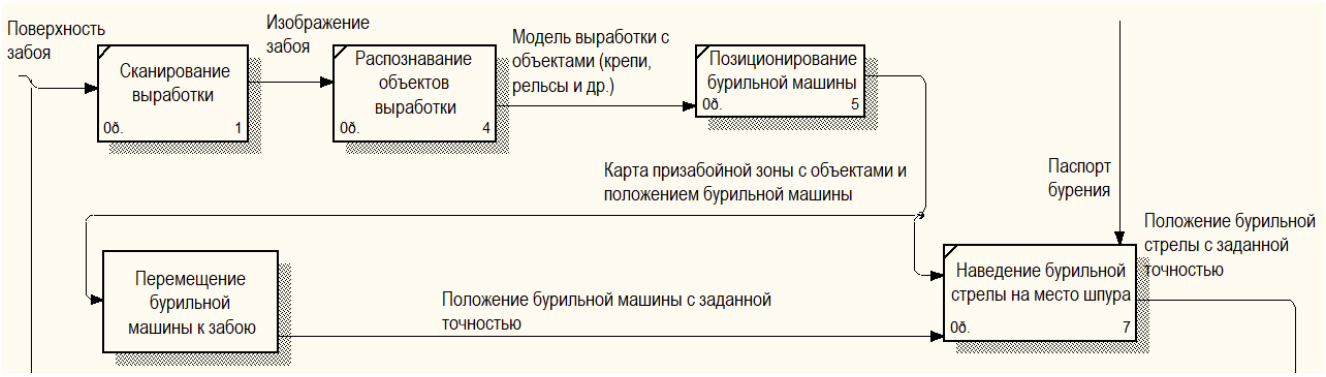


Рисунок 28 – Функции информационного обеспечения проходческих работ по стандарту системно-функционального моделирования IDEF0

Согласно методологии IDEF0, исполнителем каждой из них может выступать как горнорабочий, так и автоматика или робот.

В функциональной подсистеме первой выполняемой технологической операцией является восприятие выработки и объектов в ней для дальнейшей ориентации и правильного расположения горных машин у забоя выработки. В традиционном варианте технологии проведения горных выработок восприятие выработки в зоне забоя осуществляется горнорабочим с помощью органов чувств. Первые попытки частично передать данный функционал механике показаны на примере буровой каретки, определяющей бока выработки с помощью гидродомкратов. Для процесса бурения шпуров установка видеокамер на бурильную машину позволит вывести рабочего из зоны забоя, но не повысит точность позиционирования бурильной машины у забоя. Современные способы сканирования горных выработок и объектов в ней подразумевают использование лазерных сканеров. Они могут устанавливаться на задействованную в производстве бурильную технику, на отдельную платформу с получением шахтного мобильного робота-картографа, так и использоваться горнорабочими в виде вручную устанавливаемого инструмента.

Распознаванием воспринятой информации (определением объектов выработки для дальнейшей автономной работы с ними – забоя, кровли, боков, других по необходимости) в традиционном варианте технологии проведения горных выработок занимается горнорабочий. В горном деле предпринимаются попытки передать этот функционал вычислительной системе, устроенной по принципу

«нейронная сеть», однако, на данный момент времени роботизация данного процесса является дорогостоящей и требует работы специалистов в области искусственного интеллекта.

Ориентация горной машины в пространстве без участия человека может осуществляться с помощью систем позиционирования. В качестве примера можно привести несколько предложений: отечественные «RealTrack «Шахта» фирмы RTL Service и «SBGPS» фирмы Гранч и иностранные «Connected Mining» фирмы CISCO и «Becker Mining System» фирмы Becker GMbH – они основаны на беспроводной трансляции внутри выработок. Для определения местоположения между собой связываются расставленные точки доступа беспроводной сети и индивидуальные средства позиционирования, крепящиеся в том числе и на оборудование в забое. Также можно использовать нейронные сети, которые на основании расстояний, замеряемых лазерным сканером, будут определять положение горной машины.

Перемещение горных машин по выработкам в традиционной технологии проведения горных выработок осуществляет горнорабочий, находящийся в кабине установки. Простейшей модификацией такого способа управления является дистанционное управление на безопасном расстоянии от забоя, копирующее управление из кабины. Его главным недостатком является трудность по предоставлению оператору полной визуальной информации с места ведения работ. Поэтому такой вариант рекомендуется применять только в местах, где остро встаёт необходимость вывести человека из опасного места. Автоматизация перемещения шахтного оборудования реализована несколькими фирмами: фирма Athlas Copco предлагает систему компьютерного управления RCS 5, фирма Sandvik предлагает системы Automine и Automate, а фирма Caterpillar разработала систему управления Minegem. Преимущества использования таких компьютерных управляющих систем заключаются в меньшем износе отдельных узлов и двигателя машины благодаря оптимальному режиму их работы, а также точном перемещении бурильной установки на необходимое расстояние. Основная задача оператора бурильной машины в этом случае заключается в слежении за установкой, но он имеет возможность отключить автоматическое управление и осуществлять его дистанционно.

Наведение рабочих органов горных машин в традиционном варианте технологии проведения горных выработок осуществляет горнорабочий. Для автоматизации этого процесса фирма фирмы предлагают специализированные компьютерные системы управления. Например, Athlas Copco предлагает систему компьютерного управления бурением RCS 5, которая при максимальном уровне автоматизации автономно производит перемещение нескольких манипуляторов бурильной установки по просчитанному оптимальному маршруту, основанному на паспорте бурения. Система автоматизированного бурения AutoMine Drilling фирмы Sandvik основывающаяся на системе управления Sandvik Intelligent Control Architecture (SICA), позволяет осуществлять автоматическое наведение с точностью до 5 см.

В итоге, множество способов исполнения технологических процессов при проведении горных выработок определяется не только многообразием горных машин, существующих на рынке, но и многообразием способов передачи функции контроля процесса от горнорабочих к автоматике или роботам. Это повышает многообразие параметров технологий проведения горных выработок и усложняет выбор из них оптимальных.

2.2 Обоснование уровней автоматизации и роботизации основных процессов технологий проведения горных выработок

На основе проведенного системно-функционального анализа технологических процессов проходческих работ исследована совместимость различных вариантов автоматизации и роботизации процессов, осуществляющих информационное обеспечение и контроль за проходческими работами. Это позволило исключить априори невозможные комбинации внедрения автоматизации и роботизации в проходческие работы. На основе системно-функционального анализа проходческих работ и выявленной совместимости различных вариантов их автоматизации выделены пять уровней автоматизации роботизации процессов проходческих работ и их характеристики.

Уровень 1. Отсутствие автоматизации. Все технологические операции (визуальный обзор выработки, ориентация и контроль за перемещением горной техники в пространстве, рабочие операции) выполняются горнорабочим. Данный уровень характеризуется постоянным нахождением горнорабочих в забое, низкими затратами на реализацию и обычной скоростью исполнения технологических процессов.

Уровень 2. Дистанционное управление. Все технологические операции осуществляются непосредственно горнорабочим, но визуальный обзор выработки производится либо с дистанции, либо посредством видеокамеры. Данный уровень характеризуется небольшим присутствием горнорабочих в забое, низкими затратами на реализацию и замедлением исполнения технологических операций. Дистанционный контроль за выполнением процессов проходческого цикла увеличивает время их выполнения, так как изображение со статичной точки не позволяет получить горнорабочему полной картины происходящего.

Уровень 3. Реализация «технического зрения». Сканирование выработки производится средствами «технического зрения» – лазерными сканерами или эхолотами. Горнорабочему, дистанционно управляющему горной машиной с «техническим зрением», показывается 3D-модель выработки, и он дистанционно управляет горной машиной. Преимущество данного способа перед предыдущим в том, что «техническое зрение» даёт более точное изображение по сравнению с видеокамерой, что позволяет рабочему точнее выполнять технологические операции. Он значительно дороже реализации уровней 1 и 2.

Уровень 4. Реализация «технического зрения» и автоматического перемещения горной техники. При таком уровне автоматизации горные машины с помощью «технического зрения» автоматически сканируют горную выработку, с помощью нейронных сетей распознают полученную 3D-модель горной выработки и объектов, находящихся в ней, и автоматически осуществляют перемещение по выработкам по заданным горнорабочим траекториям. Горнорабочий лишь контролирует перемещение горной машины, а основные технологические операции выполняет дистанционно. Данный уровень автоматизации отличается повышенной скоростью

перемещения горных машин (так как управление скоростями оптимизируется), а также повышенной стоимостью исполнения по сравнению с уровнями 1-3.

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

Каждый из уровней автоматизации и роботизации технологий проведения горных выработок имеет свои преимущества и свои недостатки, приведенные в Таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение уровней автоматизации и роботизации технологий проведения горных выработок по характеристикам безопасности, стоимости и скорости

Уровень	**Стоимость ведения проходческих работ**	**Скорость ведения проходческих работ**	**Безопасность горнорабочих**
1	Низкая	Низкая	Низкая
2	Низкая	Очень низкая	Высокая
3	Повышенная	Повышенная	Высокая
4	Высокая	Высокая	Высокая
5	Очень высокая	Очень высокая	Высокая

Ни один из уровней автоматизации и роботизации не приводит априори к оптимальному сочетанию параметров технологии проведения горных выработок, так как параметры безопасности, скорости и стоимости входят во взаимное противоречие. Это усложняет оптимизационную задачу, повышая вариативность параметров проходческих работ.

2.3 Обоснование зависимости числа возможного функционального назначения элементов автоматизации и роботизации технологических процессов в технологии проведения горных выработок

Для оптимального выбора параметров технологии проведения горных выработок количественно обосновано множество вариантов ведения проходческих работ. Исходными данными для работы являются горнотехнические условия ведения проходческих работ, физико-механические свойства горных пород и множество моделей проходческих горных машин, представленных на рынке.

В результате применения системно-функционального подхода можно выделить множество процессов технологии проведения горных выработок, подвергаемых автоматизации или роботизации P. Мощность данного множества $|P|$ для буровзрывной технологии будет равна 5 (бурение шпуров, заряжание шпуров, погрузка отбитой горной массы, оборка забоя, крепление выработки), а для комбайновой технологии будет равна 3 (отбойка горной массы, погрузка отбитой горной массы, крепление выработки).

Затем элементы множества P многозначно отображаются в множество исполнителей технологических процессов M (формула 1), состоящее из стольких подмножеств, сколько технологических процессов содержит технология проведения горных выработок (формула 2). Исполнители технологических процессов – горные машины, представленные на рынке, подходящие под физико-механические свойства отрабатываемых горных пород и горнотехнические условия проходки.

$$f: P \rightarrow M; \tag{1}$$

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

Для нахождения множества вариантов автоматизации и роботизации технологии проведения горных выработок R элементы подмножеств M_1, M_2, …, M_n размещаются на технологические процессы P_1, P_2, …, P_n с учётом пяти возможных уровней роботизации. Каждый из таких вариантов описывается как размещение

длиной n из подмножеств $M_1, M_2, \ldots, M_n$ предложений по исполнению технологических процессов $<x_1, x_2, \ldots, x_n>$, где $x_i \in M_i$ для $1 \leq i \leq n$.

В результате получается множество кортежей автоматизированных или роботизированных горных машин, применяемых для ведения проходческих работ. Примером такого кортежа для комбайновой технологии проведения горных выработок может служить *<проходческий комбайн Joy 12HM46 с максимальным уровнем роботизации, самоходные вагоны 5ВС15М с максимальным уровнем роботизации, анкероустановочная машина Sandvik DS411 с дистанционным управлением>*.

Множество параметров автоматизированной или роботизированной технологии проведения горных выработок определяется как полное произведение пятикратной мощности каждого из подмножеств исполнителей технологических процессов (формула 3).

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

Таким образом, число вариантов автоматизации и роботизации технологий проведения горных выработок для конкретных горнотехнических условий и физико-механических свойств горных пород определяется внедрением различных уровней роботизации на каждый технологический процесс проходческих работ и существующими предложениями по механизации проходческих работ.

Мультипликативный характер расчёта мощности множества параметров приводит к тому, что даже при небольшом размере выборки горных машин, доступных для ведения проходческих работ в заданных горнотехнических условиях, оптимизация параметров будет проводиться минимум из сотен тысяч вариантов. Учитывая, что на каждый технологический процесс можно применить пять уровней автоматизации и роботизации, многовариантность выбора оптимальных параметров для комбайновой технологии возрастает на два порядка (5^3=125), а для буровзрыв-

ной технологии – на три порядка (5^5=3125). Это значительно усложняет выбор оптимальных параметров современных технологий проведения горных выработок при их автоматизации и роботизации.

2.4 Выводы по главе

Системно-функциональный анализ типовых комбайновой и буровзрывной технологий проведения горных выработок показал, что внедрение элементов автоматизации и роботизации в проходческие работы определяется технологическими операциями, выполняемыми горнорабочими. Выделен типичный блок технологических операций, имеющих интеллектуально-информационную природу. Это восприятие выработки и объектов в ней, распознавание образов, позиционирование горных машин, а также управление их перемещением и наведением их рабочих органов.

Технологические операции, которые могут быть переданы автоматике или роботу, определяются пятью уровнями автоматизации и роботизации процессов проходческого цикла, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки, так как параметры безопасности, стоимости и скорости проходки на каждом уровне вступают во взаимное противоречие. Невозможно априори сказать, какой из уровней автоматизации и роботизации должен быть применен на том или ином технологическом процессе для обеспечения оптимальных параметров технологии проведения горных выработок при ее модернизации.

Выделена зависимость, согласно которой учёт пяти уровней автоматизации и роботизации значительно усложняет задачу выбора оптимальных параметров технологии проведения горных выработок при ее модернизации, так как множество значений целевой функции возрастает в 125 раз для комбайновой технологии и в 3125 раз для буровзрывной технологии.

3 ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В настоящей главе рассмотрена многофакторная и многокритериальная задача оптимизации параметров типовых комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок с элементами автоматизации и роботизации и обоснован комплексный критерий оптимизации, минимизирующий среднее хронологическое число горнорабочих в забое и стоимость проходки при максимизации скорости ведения проходческих работ.

3.1 Комплексный критерий оптимизации технологий проведения горных выработок при автоматизации и роботизации технологических процессов

Основными показателями эффективности горнопроходческих работ считаются удельная скорость ведения проходческих работ V и удельная стоимость проходки C, на основе которых принимается решение об использовании того или иного варианта проходческих работ. При проектировании проходческих работ эти параметры вступают в противоречие: стоимость ведения проходческих работ требует минимизации, а скорость ведения проходческих работ – максимизации. При определении параметров типовых технологий проведения горных выработок необходимо либо разрешать противоречие путём комплексной оптимизации, либо основывать выбор на оптимизации только стоимости ведения проходческих работ, выставляя их скорость в качестве ограничения. Актуально обоснование комплексного критерия оптимизации показателей проходческих работ, объединяющего скорость, стоимость ведения проходческих работ и среднее хронологическое число горнорабочих в забое.

Для обоснования комплексного критерия можно применить следующие подходы: аддитивный, мультипликативный и минимаксный (максиминный). У каждого из них есть свои условия применения. Разновидности аддитивного подхода принимаются, когда важны абсолютные изменения критериев, для каждого из которых можно подобрать важность изменения с помощью весовых коэффициентов. Мультипликативный подход принимается, если важно абсолютное изменение критериев, каждый из которых не может принимать нулевое значение, без возможности учитывать изменение отдельных критериев. Минимаксный (максиминный) критерий принимается в случаях, когда необходимо ориентироваться на пессимистичный или оптимистичный варианты в условиях непредсказуемости внешних условий [124].

В задаче выбора оптимального варианта ведения проходческих работ в случае полной автоматизации процессов число горнорабочих в забое может принимать нулевые значения, что исключает использование мультипликативного комплексного критерия. Использование минимаксного (максиминного) подхода также невозможно, так как при принятии варианта ведения проходческих работ планируемые показатели N, C и V не обладают непредсказуемостью. Единственно возможным является использование аддитивного подхода.

Критерий оптимизации K требует минимизации или максимизации для всех параметров, его составляющих. Два из трёх оптимизируемых показателя системы – N и C – требуют минимизации, соответственно показатель скорости ведения горных работ, требующий максимизации, нужно привести к виду, требующему минимизации. Для скорости ведения проходческих работ, имеющей размерность в системе СИ м^3/с, обратной величиной является удельное время ведения горных работ с/м^3. Обозначим удельное время ведения проходческих работ T.

Рассматриваемые показатели эффективности имеют не только разные размерности, но и разный масштаб (среднее число горнорабочих в забое – единицы, удельное время проходческих работ – десятки минут на кубометр, стоимость проходческих работ – тысячи рублей за кубометр). Для сведения их в один критерий

оптимизации необходимо произвести их нормирование – деление значения каждого критерия на некоторую величину (нормирующий делитель) для уравнивания масштабов оптимизируемых величин и избавления их от разных размерностей. Нормирование, в свою очередь, рекомендуется производить на основе медианы области компромисса – середины отрезка, расположенного между минимальным и максимальным значением оптимизируемых параметров [125].

Также в работе [125] для решения задач многоэкстремальной оптимизации на невыпуклом множестве решений рекомендуется нелинейная квадратичная свёртка по Парето, геометрический смысл которой заключается в минимизации/максимизации расстояния от начала координат области оптимизации до оптимума. Нормированный комплексный критерий оптимизации показателей эффективности проходческих работ выглядит следующим образом (формулы 4 и 5):

$$K = \sqrt{\frac{4T^2}{(T_{max} + T_{min})^2} + \frac{4N^2}{(N_{max} + N_{\min})^2} + \frac{4C^2}{(C_{max} + C_{min})^2}} \to min. \qquad (4)$$

Что равно:

$$K = 2\sqrt{\frac{T^2}{(T_{max} + T_{min})^2} + \frac{N^2}{(N_{max} + N_{\min})^2} + \frac{C^2}{(C_{max} + C_{min})^2}} \to min, \qquad (5)$$

где T – удельное время ведения проходческих работ, N – среднее хронологическое число горнорабочих в забое, C – удельная стоимость ведения горных работ, 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.

3.2 Постановка задачи оптимизации

Для решения поставленной задачи оптимизации 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: σ – предел прочности породы на одноосное сжатие (МПа), k_P – коэффициент разрыхления породы;
2. Горнотехнические параметры F_T: $S_Ч$ – сечение выработки вчерне (м^2), N_A – число анкеров на метр выработки, D – диаметр шпура (мм), L – глубина шпура (м), L_B – длина горной выработки (м), $L_{БЕЗ}$ – безопасное расстояние, на которое отъезжают горные машины после завершения производственного процесса (м), $K_П$ – коэффициент присечки горных пород;
3. Параметры горных машин (факторы оптимизации):
   3.1. Производительные параметры F_Q: A – энергия одного удара при бурении (Дж), n – частота ударов при бурении (Гц), R – число одновременно работающих бурильных установок, K_O – коэффициент одновременности работы бурильных установок, $V_{ХБУ}$ – скорость хода бурильной установки (м/мин), $T_{ЗАМ}$ – время замены бурильной коронки (мин), B – стойкость коронки на одну заточку (м), T_H – время наведения бурильной установки на место шпура (мин), $T_{ЗАБ}$ – время забуривания бурильной установки (мин), Q_M – производительность зарядной машины (кг/мин), $Q_{ХЗМ}$ – скорость хода шланга подачи зарядной машины (м/мин), $T_{НАВ}$ – длительность наведения зарядной машины на очередной шпур (мин), $T_Ц$ – продолжительность цикла погрузочной машины (с), U_K – объём ковша погрузочной машины (м^3), $K_З$ – коэффициент заполнения ковша, Q_O – производительность оборочной машины, T_A – время установки анкера анкероустановочной машиной (мин), $Q_{КУ}$ – производительность проходческого комбайна по углю, $Q_{КП}$ – производительность проходческого комбайна по породе, $Q_{ТС}$ – объём откаточного средства, $Q_{ПОГР}$ – производительность погрузочной машины, м^3/мин;
   3.2. Скоростные параметры горных машин F_V: $V_Б$ – средняя скорость перемещения бурильной машины (м/мин), $V_З$ – средняя скорость перемещения зарядной машины (м/мин), $V_П$ – средняя скорость перемещения погрузочной машины (м/мин), V_O – средняя скорость перемещения оборочной машины, V_A – средняя скорость перемещения анкероустановочной машины (м/мин), V_K

– средняя скорость перемещения проходческого комбайна (м/мин), V_{TC} – средняя скорость перемещения откаточного средства (м/мин);

3.3. Параметры нахождения горнорабочих в забое F_N: $N_Б$ – число горнорабочих в забое, требующихся для бурения шпуров, $N_З$ – число горнорабочих в забое, требующихся для заряжания шпуров, $N_П$ – число горнорабочих в забое, требующихся для погрузки отбитой горной массы, N_O – число горнорабочих в забое, требующихся для оборки забоя, N_A – число горнорабочих в забое, требующихся для установки анкеров, N_K – число горнорабочих в забое, требующихся для отбойки горной массы проходческим комбайном, N_T – число горнорабочих в забое, требующихся для откатки горной массы;

3.4. Прочие параметры: q – удельный расход ВВ (кг/м^3), d – диаметр патрона ВВ, $K_З$ – коэффициент заряжания, Δ – плотность ВВ в заряде (кг/м^3), $L_{ЗАР}$ – длина заряда ВВ (м), $L_{ГЗ}$ – глубина заряжания ВВ (м);

4. Экономические параметры: $C_Б$ – стоимость бурильной машины, $C_{РБ}$ – стоимость роботизации бурильной машины, $C_З$ – стоимость зарядной машины, $C_{РЗ}$ – стоимость роботизации зарядной машины, $C_П$ – стоимость погрузочной машины, $C_{РП}$ – стоимость роботизации погрузочной машины, C_O – стоимость оборочной машины, $C_{РО}$ – стоимость роботизации оборочной машины, C_A – стоимость анкероустановочной машины, $C_{РА}$ – стоимость роботизации анкероустановочной машины, C_K – стоимость проходческого комбайна, $C_{РК}$ – стоимость роботизации проходческого комбайна, $C_{ТС}$ – стоимость откаточного средства, $C_{РТС}$ – стоимость автоматизации или роботизации откаточного средства;

Исследования вероятностной природы технологий проведения горных выработок комбайновым [126] и буровзрывным [127-129] способами показывают, что наиболее корректно отображать изменение случайной величины времени выполнения технологических процессов через бета-распределение. Причём основные технологические процессы, выполняемые горными машинами, имеют в основном левую асимметрию ($\alpha = 2$, $\beta = 5$), а вспомогательные и подготовительные процессы, выполняемые горнорабочими – правую ($\alpha = 2$, $\beta = 5$).

На основании этого делается вывод, что традиционный аналитический подход, при котором общее время цикла проходческих работ комбайновым или буровзрывным способом рассчитывается как сумма времён выполнения отдельных технологических процессов, даёт ошибку в меньшую сторону, из-за чего при составлении проектов горных работ возникает отставание от плана и повторное их проектирование с учётом отставания.

Так как бета-распределение неустойчиво к свёртке, две и более случайных величин времени выполнения технологического процесса проходческих работ невозможно сложить с необходимой точностью аналитическим путём, поэтому удельное время ведения проходческих работ с учётом их вероятностной природы возможно вычислить с помощью имитационных экспериментов, а составляющие критерия оптимизации будут найдены по неформализованным зависимостям.

Учитывая вышесказанное, задача оптимизации для буровзрывной и комбайновой технологий проведения горных выработок сводится к нахождению оптимума по критерию, сводящему воедино три неформализованных зависимости.

Удельное время ведения горнопроходческих работ буровзрывным способом $T_Б$ определяется по функции (6), зависящей от 35 параметров, 21 из которых – переменные:

$$T_Б = f1(\sigma, k_Р, S_Ч, N_А, D, L, L_В, L_{БЕЗ}, A, n, R, K_О, V_{ХБУ}, T_{ЗАМ}, B, T_Н, T_{ЗАБ}, Q_М, Q_{ХЗМ}, T_{НАВ}, T_Ц, V_К, K_З, T_А, V_Б, V_З, V_П, V_О, V_А, q, d, K_З, \Delta, L_{ЗАР}, L_{ГЗ}) \rightarrow min. \quad (6)$$

Удельное время ведения горнопроходческих работ комбайновым способом определяется по функции (7), зависящей от 16 параметров, 10 из которых – переменные:

$$T_К = f1(\sigma, k_Р, S_Ч, N_А, L_В, L_{БЕЗ}, K_П, T_Ц, U_К, K_З, T_А, Q_{КУ}, Q_{КП}, Q_{ТС}, V_А, V_К) \rightarrow min. \quad (7)$$

Среднее хронологическое число горнорабочих в забое $N_Б$ для буровзрывной технологии проведения горных выработок определяется по функции (8), зависящей от 40 параметров, 26 из которых – переменные:

$$N_Б = f2(\sigma, k_Р, S_Ч, N_А, D, L, L_В, L_{БЕЗ}, A, n, R, K_О, V_{ХБУ}, T_{ЗАМ}, B, T_Н, T_{ЗАБ}, Q_М, Q_{ХЗМ}, T_{НАВ}, T_Ц, U_К, K_З, T_А, V_Б, V_З, V_П, V_О, V_А, q, d, K_З, \Delta, L_{ЗАР}, L_{ГЗ}, N_Б, N_З, N_П, N_О, N_А) \rightarrow min. \quad (8)$$

Среднее хронологическое число горнорабочих в забое $N_К$ для комбайновой технологии проведения горных выработок определяется по функции (9), зависящей от 19 параметров, 13 из которых – переменные:

$$N_К = f1(\sigma, k_Р, S_Ч, N_А, L_В, L_{БЕЗ}, K_П, T_Ц, V_К, K_З, T_А, Q_{КУ}, Q_{КП}, V_П, V_А, V_К, N_К, N_П) \rightarrow min. \quad (9)$$

Удельная стоимость ведения горнопроходческих работ буровзрывным способом $C_Б$ определяется по функции (10), зависящей от 45 параметров, 31 из которых - переменные:

$$C_Б = f3(\sigma, k_Р, S_Ч, N_А, D, L, L_В, L_{БЕЗ}, A, n, R, K_О, V_{ХБУ}, T_{ЗАМ}, B, T_Н, T_{ЗАБ}, Q_М, Q_{ХЗМ}, T_{НАВ}, T_Ц, V_К, K_З, T_А, V_Б, V_З, V_П, V_О, V_А, q, d, K_З, \Delta, L_{ЗАР}, L_{ГЗ}, C_Б, C_{РБ}, C_З, C_{РЗ}, C_П, C_{РП}, C_О, C_{РО}, C_А, C_{РА}) \rightarrow min. \quad (10)$$

Удельная стоимость ведения горнопроходческих работ комбайновым способом $C_К$ определяется по функции (11), зависящей от 22 параметров, 16 из которых – переменные:

$$C_К = f1(\sigma, k_Р, S_Ч, N_А, L_В, L_{БЕЗ}, K_П, T_Ц, U_К, K_З, T_А, Q_{КУ}, Q_{КП}, V_П, V_А, V_К, N_К, C_К, C_{РК}, C_П, C_{РП}, C_А, C_{РА}) \rightarrow min. \quad (11)$$

Ограничения на все варьирующие параметры выставляются в зависимости от существующих моделей горнопроходческих машин. В итоге критерий оптимизации параметров типовых технологий проведения горных выработок представляется в виде многофакторной неформализованной зависимости (12):

$$K = 2\sqrt{\frac{f1(F_G, F_T, F_Q, F_V, F_O)^2}{(T_{max} + T_{min})^2} + \frac{f2(F_G, F_T, F_Q, F_V, F_O, F_N)^2}{(N_{max} + N_{min})^2} + \frac{f3(F_G, F_T, F_Q, F_V, F_O, F_C)^2}{(C_{max} + C_{min})^2}} \rightarrow min. \quad (12)$$

В результате решаемая математическая задача принимает вид условной многокритериальной (три целевых функции в комплексном критерии) многофакторной оптимизации (36 изменяющихся факторов для буровзрывной, 19 изменяющихся

факторов для комбайновой технологий проведения горных выработок). Совокупность всех комбинаций факторов есть множество вариантов автоматизированной или роботизированной технологии проведения горных выработок *R*.

3.3 Исследование влияния автоматизации и роботизации на параметры технологий проведения горных выработок

Для исследования влияния автоматизации и роботизации горнопроходческих работ на их показатели эффективности проведено исследование поставленной задачи в упрощённой постановке, когда факторами являются только уровни автоматизации и роботизации, модели горнопроходческих машин не меняются и не учитывается вероятностная природа проходческих работ. Это позволяет значительно снизить многовариантность оптимизационной задачи и найти её точное решение путём полного перебора, в конечном итоге обнаружить оптимальное значение.

Для возможного перебора всех сочетаний уровней автоматизации и роботизации для каждого технологического процесса подразумевается исполнение его горнорабочим, управляющим горной машиной из кабины. Комплект горных машин принят следующий: шахтная бурильная установка УБШ210А, зарядная машина CHARMEC LC 605, погрузочная машина 2ПНБ2У, оборочная машина DUX DS30RB и анкероустановочная машина Fletcher DDR.

Оптимизация проводилась для условий проведения трёх наклонных стволов ш. «Увальная» (Кузбасс) со следующими горнотехническими условиями проходки и физико-механическими свойствами горных пород: крепость пород f = 8 … 12 по шкале проф. М. М. Протодьяконова, сечение стволов S = 32 … 34 м^2 и углом наклона α = 12° … 18°. Крепление выработок предусматривается металлической аркой и анкерами длиной 2 и 5 м.

Выполнен полный перебор уровней автоматизации и роботизации для каждого основного технологического процесса, на котором они применимы (бурение шпуров, заряжание шпуров, оборка забоя, погрузка горной массы и крепление выработки анкерами). В итоге получено $5^5 = 3125$ вариантов технологии проведения

горных выработок, каждый из которых обладает уникальными показателями эффективности. Оценка каждого варианта производилась посредством разработанных в Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН детерминированных имитационных моделях горнопроходческих работ. Получены следующие результаты (Рисунок 29).

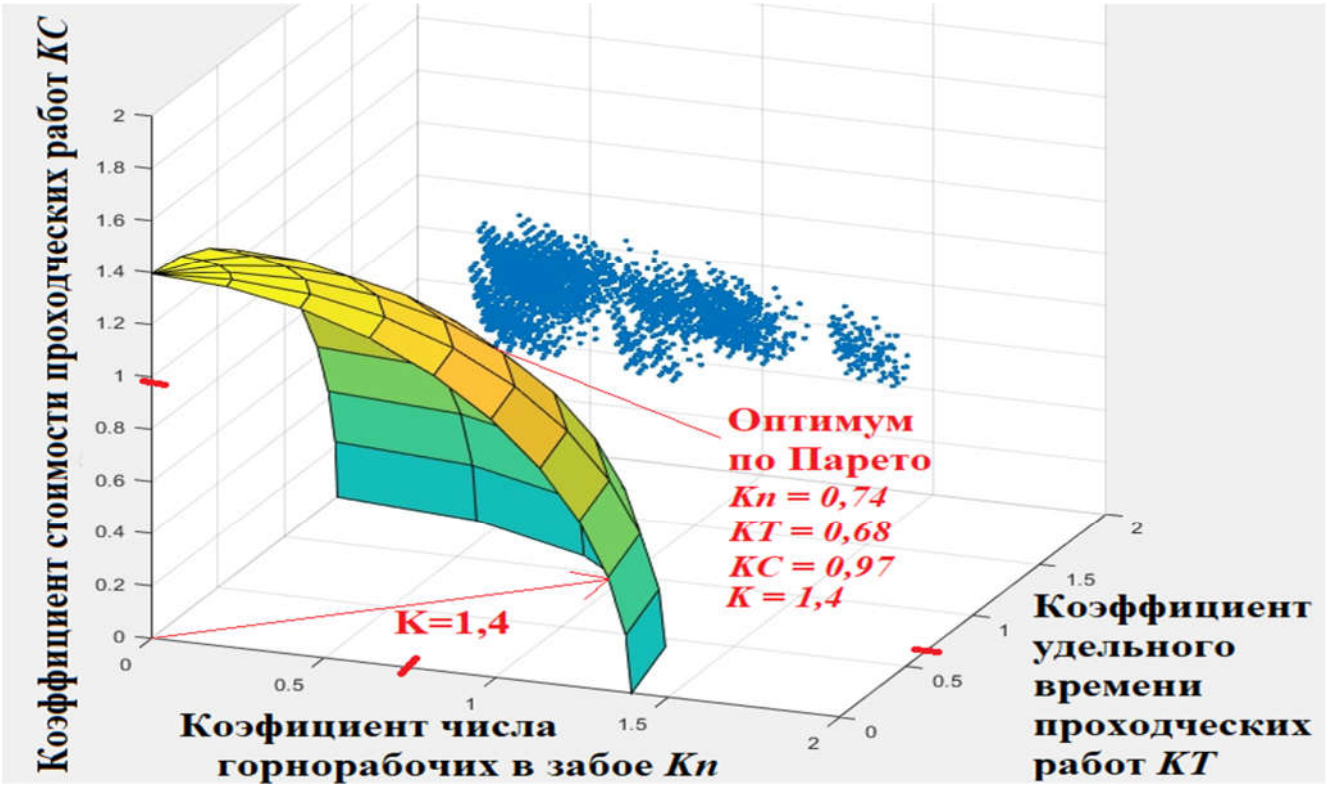


Рисунок 29 – Задача многокритериальной многофакторной комплексной оптимизации параметров буровзрывной технологии проведения горных выработок в упрощённой постановке

Оптимальные параметры полученной технологии обеспечиваются полной роботизацией шахтной бурильной установки УБШ210А и погрузочной машины 2ПНБ2У, а также оснащением зарядной машины, оборочной машины и анкероустановочной машины лидаром и дистанционным управлением ими оператором посредством 3D-модели выработки.

Оптимальные параметры полученной буровзрывной технологии проведения горных выработок по комплексному критерию оптимизации: среднее хронологическое число горнорабочих в забое – 1,11, удельное время проходческих работ – 19,08 мин/м^3, стоимость ведения проходческих работ – 1 652 руб./м^3. Получены нормированные значения, составляющие комплексный критерий оптимизации: по

оси среднего хронологического числа горнорабочих в забое – 0,74, по оси удельного времени проходческих работ – 0,68, по оси стоимости ведения проходческих работ – 0,97. Итоговое значение комплексного критерия оптимизации проходческих работ – K = 1,4.

Традиционный вариант технологии проведения горных выработок без внедрения автоматизации и роботизации имеет следующие параметры: среднее хронологическое число горнорабочих в забое – 2,74, удельное время проходческих работ – 26,29 мин/м^3, стоимость ведения проходческих работ – 1425 руб./м^3. Полученный оптимальный вариант технологии проведения горных выработок по сравнению с традиционным имеет среднее хронологическое число горнорабочих на 73% меньше, удельное время проходки на 27,8% меньше при удорожании стоимости проходки всего на 16%. Для дополнительного анализа построены три графика по двум осям из трёх (Рисунки 30-32).

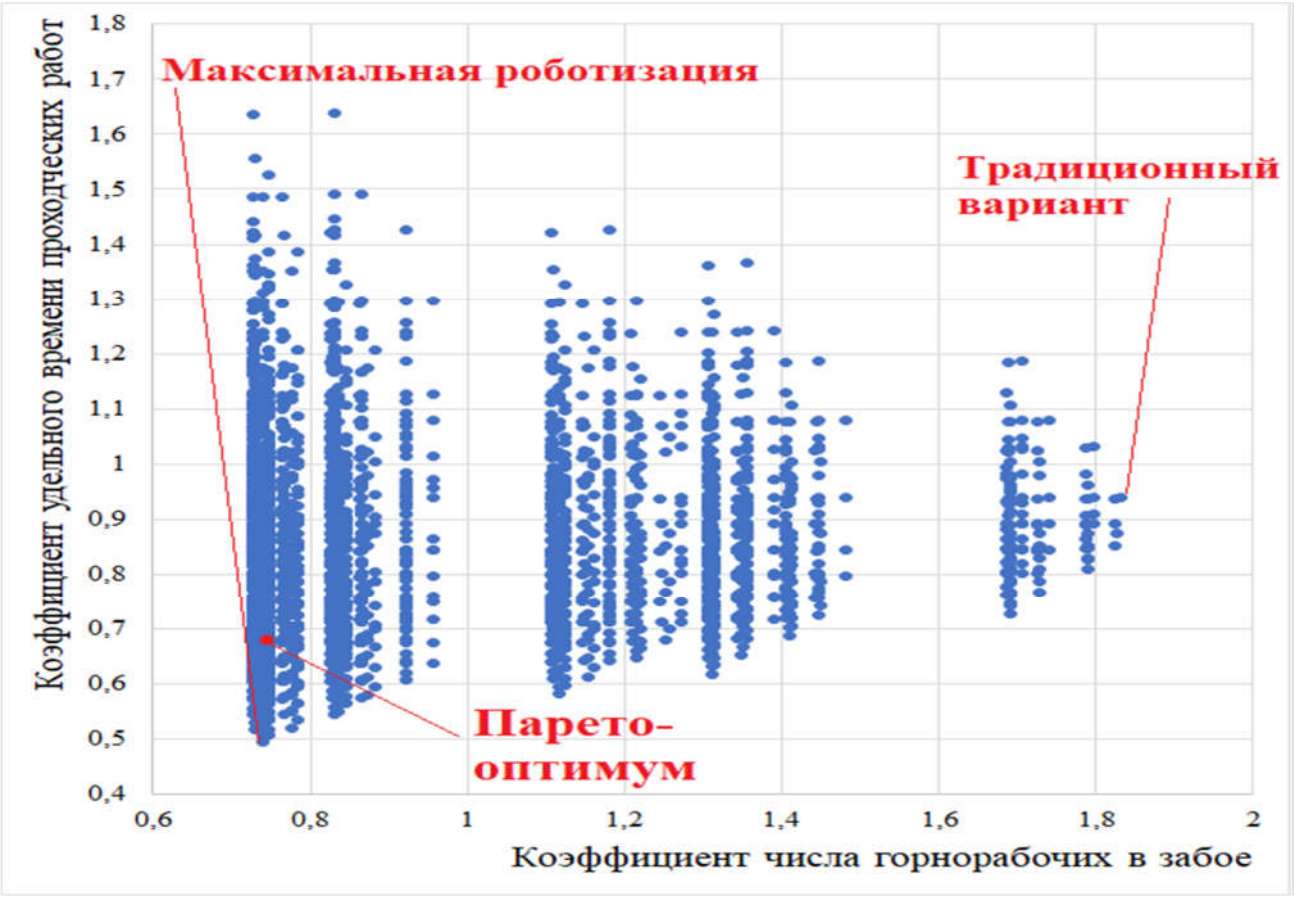


Рисунок 30 – Оптимизация параметров технологии проведения горных выработок по среднему хронологическому числу горнорабочих в забое и удельному времени проходческих работ

На рисунке 30 по оси среднего хронологического числа горнорабочих чётко различаются границы внедрения тех или иных уровней автоматизации и роботизации проходческой технологии проведения горных выработок. Также видно, что оптимальная технология не является ни самой быстрой, ни самой безопасной.

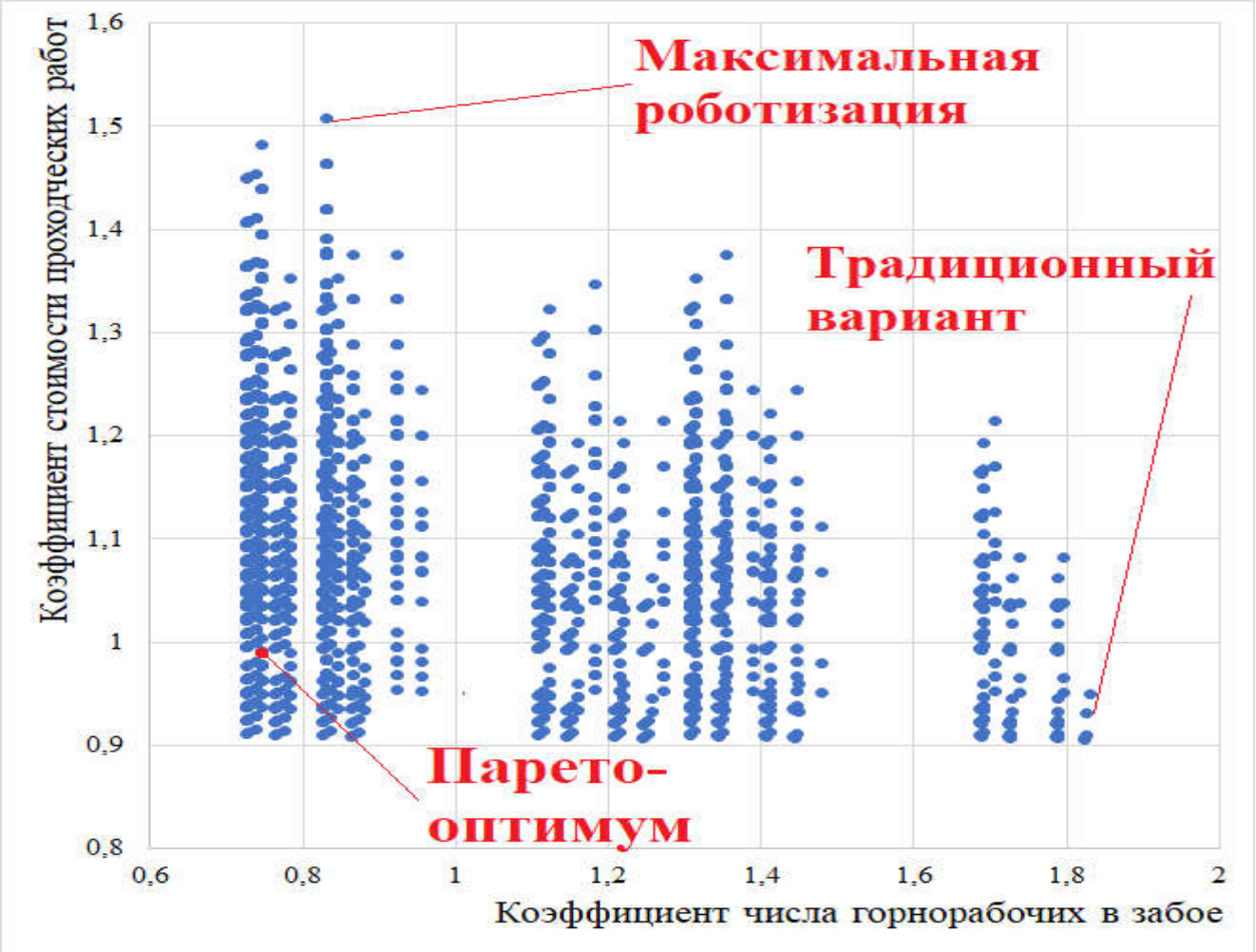


Рисунок 31 – Оптимизация параметров технологии проведения горных выработок по среднему хронологическому числу горнорабочих в забое и стоимости проходческих работ

На рисунке 31 по оси среднего хронологического числа горнорабочих также заметно отличаются различные комбинации внедрения автоматизации и роботизации в различные процессы проходческой технологии. Можно сделать вывод, что для обеспечения наибольшей безопасности горнорабочих угледобывающим предприятиям не нужно покупать дорогостоящий комплект полностью роботизированных горных машин.

Рисунок 32 – Оптимизация параметров технологии проведения горных выработок по удельному времени проходческих работ и стоимости проходческих работ

На рисунке 32 видно, что ни самый быстрый комплект горного оборудования, ни самый дорогой не являются оптимальными, хотя прослеживается обратная корреляция между временем ведения проходческих работ и стоимостью комплекта горных машин с элементами автоматизации и роботизации.

Данный пример решения упрощённой задачи оптимизации параметров технологий проведения горных выработок показывает, что для одного комплекта проходческих машин при полном переборе всех вариантов его автоматизации и роботизации оптимальным с точки зрения безопасности горнорабочих, скорости и стоимости ведения проходческих работ является именно вариант частичной автоматизации и роботизации процессов технологии проведения горных выработок.

На сегодняшний день такие варианты не рассматриваются при проектировании или модернизации шахт, что является сдерживающим фактором для повышения эффективности проходческих работ. Можно сделать вывод, что совместный перебор всех комбинаций моделей проходческих машин с перебором всех возможных комбинаций их автоматизации и роботизации значительно усложнит задачу оптимизации параметров типовых технологий проведения горных выработок.

Для выявления значимости использования критерия *K* по сравнению с традиционными методами оптимизации были произведены оптимизационные эксперименты в упрощённой постановке полным перебором для комбайновой и буровзрывной технологий проведения горных выработок. Их результат был сравнен с результатом оптимизационных экспериментов с использованием комплексного критерия оптимизации K, представленными в этой главе. Результат сравнения представлен в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Результаты оптимизации для комбайновой технологии проведения вентиляционного штрека в условиях ш. «Чертинская-Коксовая»

Параметры критерия *K*	Традиционная оптимизация	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^3	14,00	14,77	5,5
Удельная стоимость проходческих работ, руб./м^3	2080	2183	4,9
Значение критерия *K*	1,04	1,09	4,7

Таблица 4. Результаты оптимизации для буровзрывной технологии проведения наклонных стволов в условиях ш. «Увальная»

Параметры критерия *K*	Традицион-ная оптимизация	Оптимизация с учётом динамики и вероятностной природы технологических процессов	Отклоне-ние, %
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

Доказано, что учёт динамики и вероятностной природы технологических процессов проходческих работ в комплексном критерии оптимизации *K* устраняет погрешность в меньшую сторону при расчёте среднего хронологического числа горнорабочих в забое, удельного времени и удельной стоимости проходческих работ. Это позволяет повысить точность оптимизации параметров технологий проведения горных выработок при автоматизации и роботизации технологических процессов и избежать потенциального отставания ведения проходческих работ от графика.

3.4 Выводы по главе

Для решения проблемы оптимизации параметров технологий проведения горных выработок обоснован комплексный оптимизационный критерий, который сводит воедино требования к безопасности, скорости и стоимости проходки.

Так как время выполнения проходческих работ имеет вероятностную природу и определяется бета-распределением, аналитическая свёртка выполняемых подряд нескольких технологических процессов невозможна, вычисление комплексного критерия предложено путём имитационного моделирования. Также определены неформализованные зависимости комплексного критерия оптимизации от факторов оптимизационной задачи.

Поставленная задача оптимизации классифицирована как многофакторная (19-36 факторов) и многокритериальная (комплексный критерий из 3 параметров). В задаче оптимизации выделены переменные и постоянные факторы.

Исследована задача оптимизации параметров технологий проведения горных выработок с элементами автоматизации и роботизации в упрощённой постановке для одного комплекта горных машин и всех комбинаций уровней автоматизации и роботизации горных машин. Доказано, что оптимальным вариантом является вариант частичной роботизации процессов проходческого цикла, использование которого позволит уменьшить среднее хронологическое число горнорабочих в забое на 73% и удельное время проходки на 27,8% при удорожании стоимости проходки всего на 16%. Также доказано, что учёт динамики и вероятностной природы технологических процессов проходческих работ позволяет повысить точность оптимизации параметров технологий проведения горных выработок при автоматизации и роботизации основных технологических процессов.

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

В настоящей главе обоснована и разработана методика оптимизации параметров типовых технологий проведения горных выработок с элементами автоматизации и роботизации, основанная на совместном использовании имитационного моделирования, эволюционного алгоритма и комплексного критерия оптимизации. Осуществлена её реализация для условий шахт Кузбасса.

4.1 Методические основы оптимизации параметров технологий проведения горных выработок при автоматизации и роботизации технологических процессов

После нахождения множества факторов, влияющих на значения параметров технологий проведения горных выработок, необходимо решить две задачи: расчётную и оптимизационную. Решение расчётной задачи позволит оценить параметры технологий проведения горных выработок, а оптимизационной – позволит выбрать из рассчитанных параметров оптимальный (субоптимальный).

Расчёт параметров технологий проведения горных выработок аналитическими методами на сегодняшний день представлен в виде зависимостей, лишь приблизительно описывающих реальные характеристики проходческих работ. Изменчивость горно-геологических условий проходческих работ, вероятностная природа их ведения, а также динамическое взаимодействие горных машин друг с другом вносят значительную погрешность в результат аналитических расчётов. Из-за этого в проекты строительства шахт вносятся корректировки уже в ходе подготовительных работ.

В настоящее время для расчёта показателей эффективности горных работ успешно применяется имитационное моделирование. Оно позволяет «проиграть»

операции любой технологии, при этом учитывается вероятностная природа технологических операций и динамическое взаимодействие горных машин и горнорабочих. В Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН разработаны имитационные модели типовых комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок, которые позволяют рассчитать параметры технологий проведения горных выработок без применения аналитики и с учётом динамики и вероятностной природы технологических процессов.

Задачу выбора оптимальных параметров технологий проведения горных выработок следует выбирать в соответствии с решением расчётной задачи. Самый простой метод оптимизации – метод полного перебора – неприменим для текущей задачи из-за высокой вычислительной сложности. На основании опыта работы с имитационными моделями, расчёт каждой имитационной модели производится в течение 3-5 секунд, а полный перебор всех параметров технологий проведения горных выработок из минимум сотен тысяч вариаций займёт не менее 3,5 суток. Необходимо использование алгоритмов оптимизации, исключающих полный перебор вариантов.

В горном деле для оптимизации параметров производственных систем успешное применение находят эвристические алгоритмы. Они позволяют находить оптимальные либо субоптимальные параметры горных систем без аналитического описания системы за приемлемое время с высокой точностью.

Среди наиболее используемых эвристических алгоритмов выделяются семейство алгоритмов A* (в том числе алгоритм муравьиной колонии), алгоритмы восхождения к вершине (в том числе алгоритм отжига) и эволюционные алгоритмы (в том числе эволюционный алгоритм). Применение алгоритмов семейства A* не подходит для поставленной задачи, так как решает в основном транспортные и логистические задачи. Применение алгоритмов восхождения к вершине успешно работает с системами, где ярко выражены локальные минимумы и максимумы, а число факторов невелико. Поэтому их применение в поставленной задачи также нерационально.

Эволюционные алгоритмы позволяют работать с системами вне зависимости от количества факторов и числа локальных оптимумов. Их применение усложняется, если аналитическими методами трудно рассчитать параметры системы, которые также называются функцией полезности. Однако, их можно использовать совместно с имитационным моделированием, которое позволяет рассчитать параметры системы без её аналитической модели.

Поэтому для решения поставленной оптимизационной задачи выбрана разновидность эволюционного алгоритма – эволюционный алгоритм, функция полезности которого будет рассчитываться методом имитационного моделирования. Это позволит решить задачу оптимизации параметров технологий проведения горных выработок с высокой точностью за приемлемое время.

На основании совместного использования системно-функционального подхода, эволюционного алгоритма и имитационного моделирования обоснована методика оптимизация параметров технологий проведения горных выработок, состоящая из следующих этапов:

1) На первом шаге методики с помощью системно-функционального подхода горные машины, подходящие под конкретные горнотехнические условия и физико-механические свойства горных пород, размещаются на технологические процессы проходческих работ. После чего для каждой из них нужно применить пять уровней автоматизации и роботизации. В итоге их параметры образуют множество переменных факторов автоматизированных и роботизированных технологий проведения горных выработок R, описанное ранее.
2) Далее по принципам эволюционного алгоритма создаётся множество комплектов горных машин со случайными моделями и случайными уровнями их автоматизации и роботизации, число комплектов должно быть чётным. Характеристиками каждого комплекта являются факторы задачи оптимизации параметров технологий проведения горных выработок с элементами автоматизации и роботизации.

3) На втором шаге методики комплекты связываются попарно, и на основании их моделей горных машин и уровней автоматизации и роботизации для каждой пары конструируется еще пара комплектов горнопроходческих машин, параметры которых являются случайной комбинацией изначально существующих комплектов. Параметры новых сконструированных комплектов отличаются от изначальных.
4) Затем каждый комплект оценивается по критерию оптимизации (5) с помощью экспериментов над её имитационной моделью. Параметры имитационной модели соответствуют горнотехническим параметрам и факторам оптимизации. В результате имитационного моделирования рассчитываются среднее хронологическое число горнорабочих в забое и скорость проходки, а впоследствии и стоимость ведения проходческих работ по методике проф. В. И. Стрельникова. Эти три параметра позволяют рассчитать комплексный критерия оптимизации.
5) После этого все комплекты горных машин в множестве упорядочиваются по значению комплексного критерия по убыванию. Половина комплектов с наихудшими значениями критерия удаляется из расчётов. За счёт этого обеспечивается приближение комплексного критерия оптимизации к оптимуму.
6) У малого процента комплектов случайным образом производится замена одной горной машины с её уровнем автоматизации и роботизации. Эта процедура необходима для избегания эволюционным алгоритмом локальных оптимумов.
7) Оставшиеся в множестве комплекты снова проходят все процедуры, начиная с этапа 3.
8) Если в процессе эволюции комплексный критерий оптимизации перестаёт расти на протяжении нескольких итераций цикла, эволюционный алгоритм заканчивает свою работу и в результате выбирает комплект горных машин и их уровни автоматизации и роботизации для обоснования оптимальных параметров технологий проведения горных выработок. Согласно

теории планирования экспериментов для имитационной модели полученной технологии рассчитывается число экспериментов, которые позволят вычислить показатели её эффективности с учётом вероятностной природы горных работ, а затем проводится нужное число экспериментов. Итогом работы методики становятся оптимальные (субоптимальные) параметры технология проведения горных выработок – среднее хронологическое число горнорабочих в забое, скорость и стоимость проходки, – а также модели выбранных горных машин и применённые к ним уровни автоматизации и роботизации.

В итоге использование методики позволит обосновать технологию проведения горных выработок с оптимальными параметрами с учётом современных средств автоматизации и роботизации, вероятностной природы и динамики ведения горных работ для повышения скорости и безопасности ведения проходческих работ.

4.2 Адаптация имитационной модели проходческих работ при автоматизации и роботизации основных технологических процессов

В Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН разработаны модели типовых проходческих буровзрывной и комбайновой технологий проведения горных выработок. Необходимо дополнить их возможностью автоматизации и роботизации отдельных технологических процессов, а также дополнить модель инструментом расчёта параметров комплексного критерия оптимизации (5): среднего хронологического числа горнорабочих в забое, удельного времени и удельной стоимости проходческих работ.

Согласно разработанным уровням автоматизации и роботизации технологий проведения горных выработок, нужно оценить влияние на параметры проходческих работ дистанционного управления через видеокамеру и через 3D-модель выработки, а также влияние на эти параметры роботизации отдельных технологических операций.

В источниках [110] отмечается, что дистанционное управление через утопленные в корпус горных машин видеокамеры в условиях угольной пыли возможны, но негативно влияют на скорость ведения проходки. Операторы из-за неполного обзора выработки и осторожности могут управлять техникой до 20% медленнее, чем находясь в её кабине. Стоимость организации такого управления находится в пределах до 1 млн руб.

Управление горными машинами через 3D-модель выработки организуется посредством совмещения на одной машине лазерных сканеров – лидаров – и радаров. Дистанционное управление такими машинами для оператора фактически не отличается от тренировки на виртуальном тренажёре и негативного влияния на качество управления горными машинами не оказывает. Современные модели, как GML Underground, позволяют сканировать поверхность в условиях запылённости и с погрешностью сканирования менее 6 мм. При использовании соответствующего программного управления оператор управляет горной машиной с такой же скоростью, как и находясь в кабине горной машины.

Роботизация ориентации горных машин в пространстве и их перемещения по выработкам позволяют увеличить скорость их движения в среднем на 15%, а общую производительность (в случае роботизации погрузочно-доставочных машин) до 25% [110].

Для расчёта среднего хронологического числа горнорабочих в забое и скорости проходки разработаны имитационные модели технологий проведения горных выработок с элементами автоматизации и роботизации на языке имитационного моделирования GPSS World. Имитационные модели представляют собой последовательность блоков и команд, которые либо имитируют технологические операции проходческих работ, либо содержат расчёты, либо контролируют занятие или освобождение приборов обслуживания, что позволяет учитывать динамику проходческих работ.

Источником данных для имитационных моделей являются как горнотехнические данные, введённые пользователем, так и комплекты эволюционного алгоритма, в которых закодированы параметры как традиционных, так и автоматизированных или роботизированных горнопроходческих машин.

Расчётной основой имитационных моделей выступает блок SAVEVALUE (Рисунок 33), который позволяет сохранять горнотехнические параметры проходки в переменные имитационной модели, а затем использовать их для аналитического расчёта длительности отдельных технологических операций.

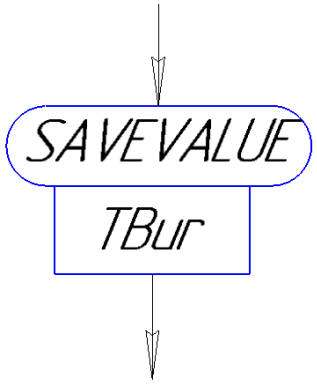


Рисунок 33 – Типовой блок языка GPSS World для расчёта и сохранения значений переменных

Блок SAVEVALUE используется в имитационных моделях проходческих работ с элементами автоматизации и роботизации в следующих случаях:

1) Импорт горнотехнических параметров из комплекта горных машин эволюционного алгоритма и сохранение их в переменных.
2) Расчёт параметров и показателей эффективности проходческих работ.
3) Учёт присутствия или отсутствия горнорабочих в забое в зависимости от заданного уровня автоматизации или роботизации технологического процесса.
4) Учёт времени выполнения технологических операций, на основе результатов расчёта в этом блоке считается среднее хронологическое число горнорабочих в забое.
5) Расчёт скорости ведения проходческих работ в зависимости от времени имитационного моделирования и длины пройденной горной выработки.

Имитация занятия горнопроходческих машин для выполнения технологических операций производится использованием блоков SEIZE (занять устройство обслуживания) и RELEASE (освободить устройство обслуживания) (Рисунок 34).

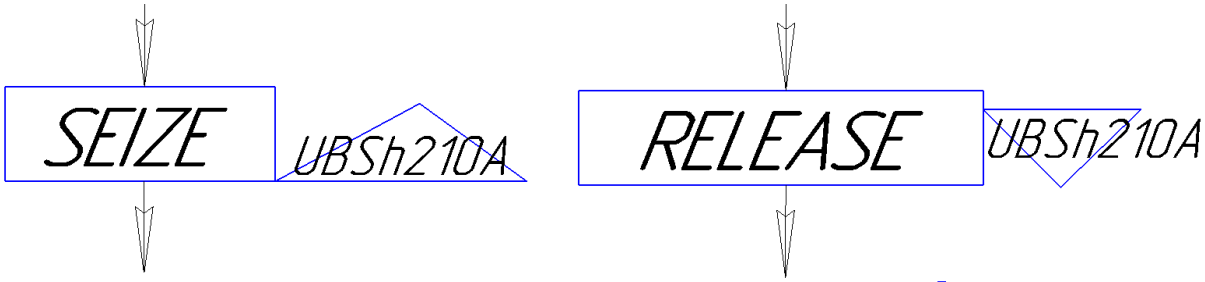


Рисунок 34 – Типовой блок языка GPSS World для имитации занятия и освобождения устройств обслуживания (горнопроходческих машин)

Имена занимаемых и освобождаемых горных машин импортируются в имитационную модель из комплекта горных машин эволюционного алгоритма, что позволяет имитировать работу одной и той же горной машины на разных технологических процессах (например, буропогрузочной машины, которая выполняет технологические процессы бурения шпуров и погрузки отбитой горной массы). Наличие в имитационной модели блоков SEIZE и RELEASE позволяет реализовывать одно из главных преимуществ имитационного моделирования и математического аппарата теории массового обслуживания – учёт динамики ведения горнопроходческих работ, так как в случае прихода заявки на обслуживание к уже занятому устройству обслуживания она будет ставиться в очередь на обслуживание.

Блок ADVANCE (Рисунок 35) используется в имитационных моделях проходческих работ с элементами автоматизации и роботизации для имитации обслуживания заявок в приборах, а также продвижения вперёд модельного времени.

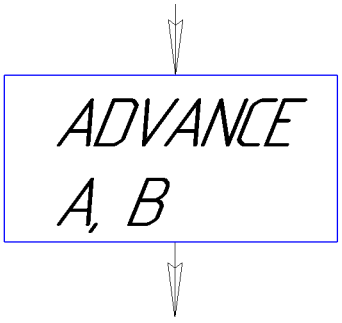


Рисунок 35 – Типовой блок языка GPSS World для имитации технологических операций

Его использование позволяет имитировать выполнение технологических операций горнопроходческими машинами, при этом учитывается:

1) Вероятностная природа ведения проходческих работ через задание в блоке ADVANCE вероятностного закона распределения (нормальное или бета-распределения).
2) Уровень автоматизации или роботизации моделируемой технологии проведения горных выработок, дающий штраф или уменьшение на время выполнения производственного процесса по сравнению с традиционной технологией.

На основании типичных блоков разработан типичный сегмент имитационной модели ведения проходческих работ с элементами автоматизации и роботизации. В качестве примера приведён сегмент, имитирующий работу бурильной установки (Рисунок 36).

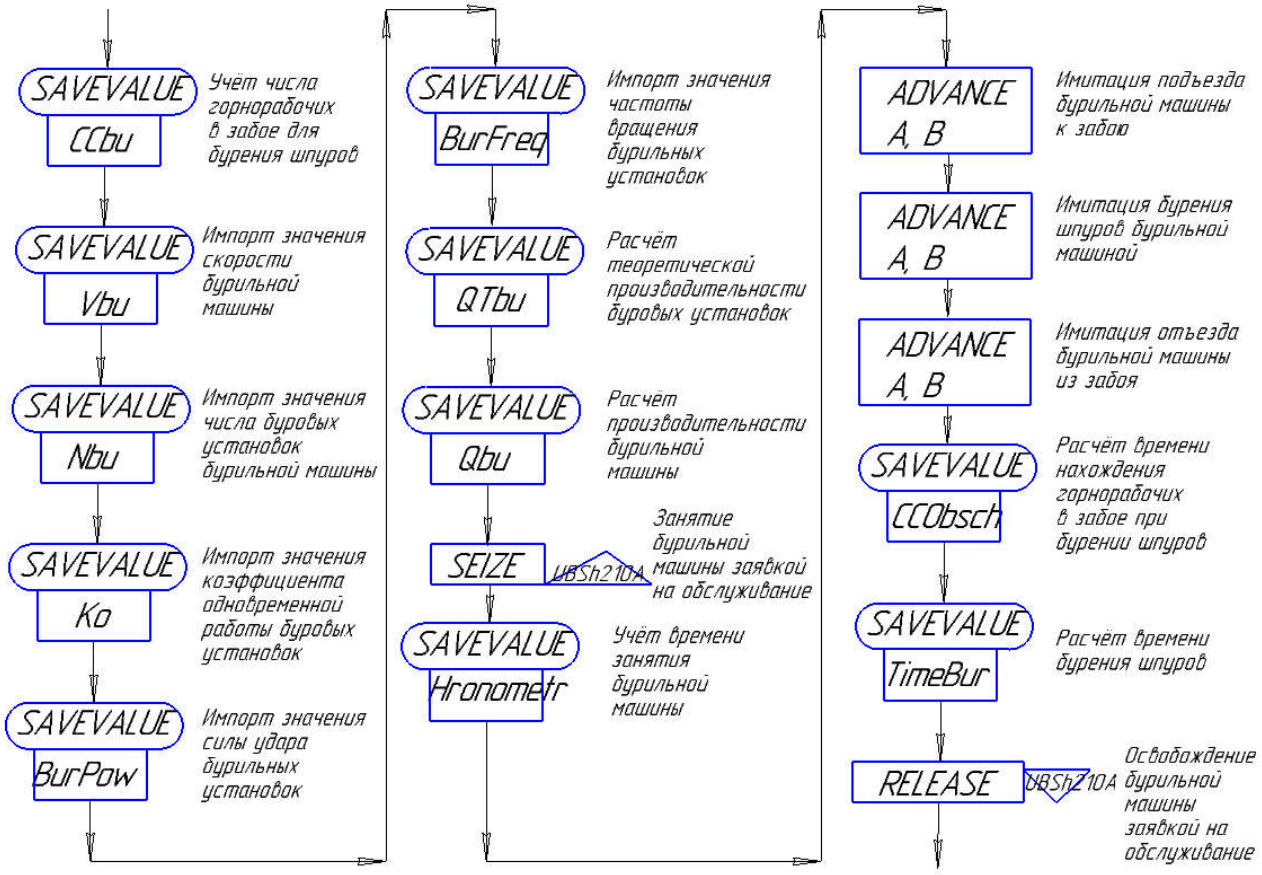


Рисунок 36 – Сегмент имитационной модели, имитирующий работу бурильной машины с элементами автоматизации и роботизации

Первые шесть блоков сегмента SAVEVALUE импортируют из комплекта горных машин эволюционного алгоритма значения параметров горных машин и их автоматизации либо роботизации. Следующие за ними два блока SAVEVALUE рассчитывают теоретическую производительность одной бурильной установки на бурильной машине и практическую производительность в случае, если на бурильной машине установлено больше одной бурильной установки.

Затем идёт имитация начала работы бурильной машины блоком SEIZE – либо горнорабочий начинает ей управлять непосредственно из кабины, либо дистанционно. Затем с помощью блока SAVEVALUE начинается отсчёт времени, с которого начинается технологический процесс бурения шпуров.

Следующие три блока ADVANCE имитируют подъезд бурильной машины к забою, бурение шпуров и отъезд бурильной машины из забоя, а также рассчитывает необходимое для этого время с учётом уровня автоматизации либо роботизации процесса бурения шпуров, а также вероятностной природы проходческих работ.

Последние блоки SAVEVALUE записывают в переменные итоговое время бурения шпуров, а также пересчитывают среднее хронологическое число горнорабочих в забое после очередного бурения шпуров. Завершающий сегмент блок RELEASE освобождает бурильную машину от выполнения заявки и позволяет другим заявкам снова её занимать при необходимости.

Вся имитационная модель состоит из сегментов инициализации модели, сегментов имитации основных технологических процессов (бурение шпуров, заряжание шпуров, взрыв зарядов и проветривание, оборка забоя, погрузка отбитой породы, крепление выработки анкерами и при необходимости другими видами крепей, вспомогательные работы), а также сегментом завершения проходческих работ, подсчёта показателей эффективности проходческих работ и импорта значений показателей во внешний текстовый файл.

4.3 Создание системы имитационного моделирования технологий проходки

Для ускорения проведения серии экспериментов над обоснованной имитационной моделью горнопроходческих работ с элементами автоматизации и роботизации необходимо специализированное программное обеспечение. Так как эволюционный алгоритм будет работать более, чем с тысячей имитационных моделей, необходимо заложить в него функционал задания констант для решения оптимизационной задачи, которыми являются горнотехнические условия горнопроходческих работ, а также заложить функцию автоматического написания имитационных моделей по константам и изменяющимся параметрам комплектов горных машин.

Создан специализированный программный комплекс «Система имитационного моделирования технологий проходки» (СИМТП), структурная схема которого показана на Рисунке 37.

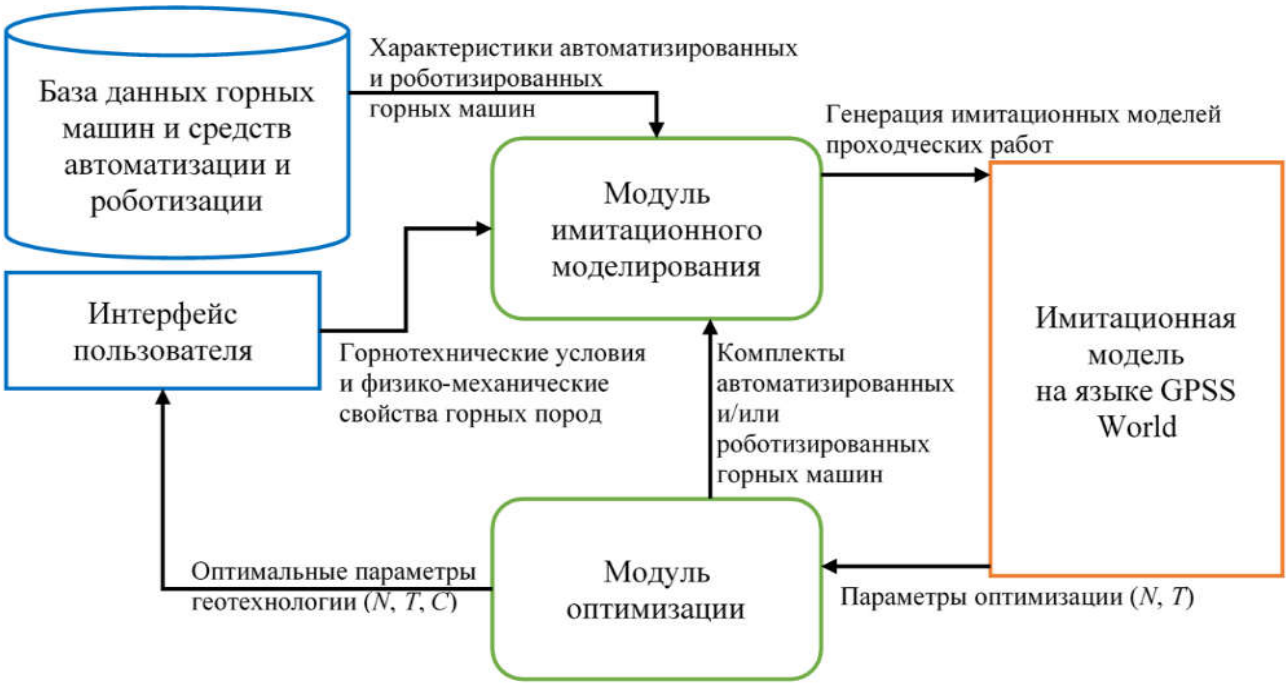


Рисунок 37 – Структурная схема системы имитационного моделирования технологий проходки

Ядром системы являются два модуля – имитационного моделирования и оптимизации. «Модуль имитационного моделирования» позволяет на основе введённых пользователем горнотехнических условий автоматически выбирать из базы

данных подходящие характеристики горнопроходческих машин, генерировать имитационную модель для отображения технико-организационных вариантов технологий проведения горных выработок буровзрывным и комбайновым способами, а также проводить вычислительные эксперименты при помощи ядра моделирования GPSS World и определять для каждого варианта параметры технологии – скорость и стоимость проходки метра выработки, продолжительность нахождения горнорабочих в забое.

«Модуль оптимизации» позволяет с использованием комплексного аддитивного нормированного критерия оптимизации, основанного на минимизации удельной скорости и стоимости проходки метра выработки, а также среднего хронологического числа горнорабочих в забое, автоматически определять оптимальный технико-организационный вариант проходческих работ для заданных горнотехнических условий.

Для проведения оптимизационных экспериментов необходимо определить два вида входных данных: константы и переменные (управляемые факторы). Всё множество значений управляемых факторов, которые являются техническими, экономическими параметрами и параметрами безопасности, хранятся в базе данных горнопроходческих машин (Рисунок 38). Так как модельный ряд горных машин, а также их стоимостные параметры постоянно изменяются, в программе предусмотрен интерфейс для корректировки параметров горных машин, а также добавления новых моделей и удаления неактуальных. Для редактирования доступны следующие таблицы: «Производственные процессы», «Технологические операции», «Проходческие комбайны», «Самоходные вагоны», «Конвейеры», «Вагонетки», «Анкероустановочные машины», «Бурильные машины», «Зарядные машины», «Погрузочные машины циклического действия», «Погрузочные машины непрерывного действия», «Оборочные машины».

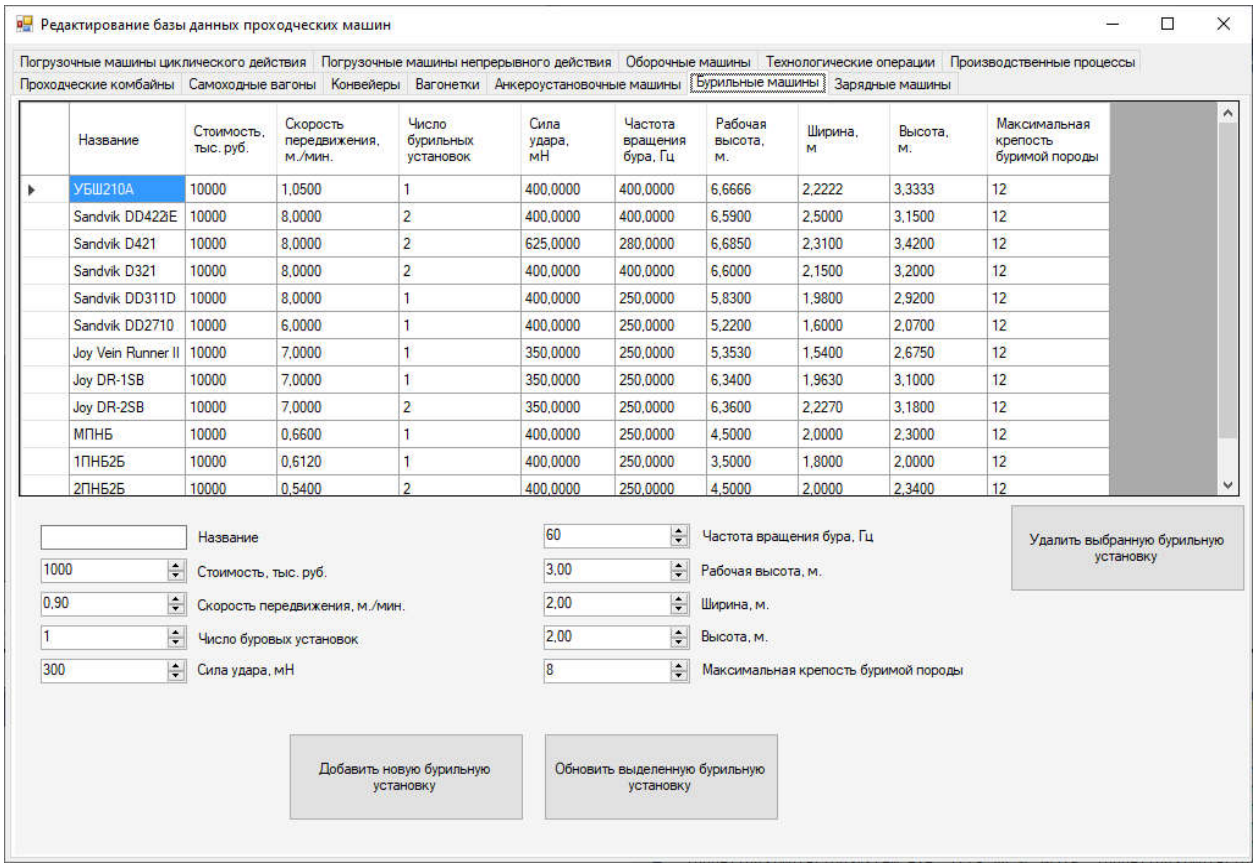


Рисунок 38 – База данных моделей горных машин и их параметров

Для вставки и обновления строк таблиц необходимо заполнить все поля ввода в нижней части интерфейса. Например, для проходческого комбайна нужно указать его название, стоимость, скорость передвижения (по паспорту), производительность отбойки по углю и породе, минимальные и максимальные рабочие площади сечения проводимой выработки, максимально допустимую крепость отбиваемой породы, ширину и высоту. Затем нажать на кнопку «Добавить новый проходческий комбайн», после чего база данных дополнится новой записью, а изменения отобразятся в интерфейсе.

Константы в виде горнотехнических условий проходческих работ и физических характеристик горных пород задаются пользователем в соответствующем интерфейсе (Рисунок 39).

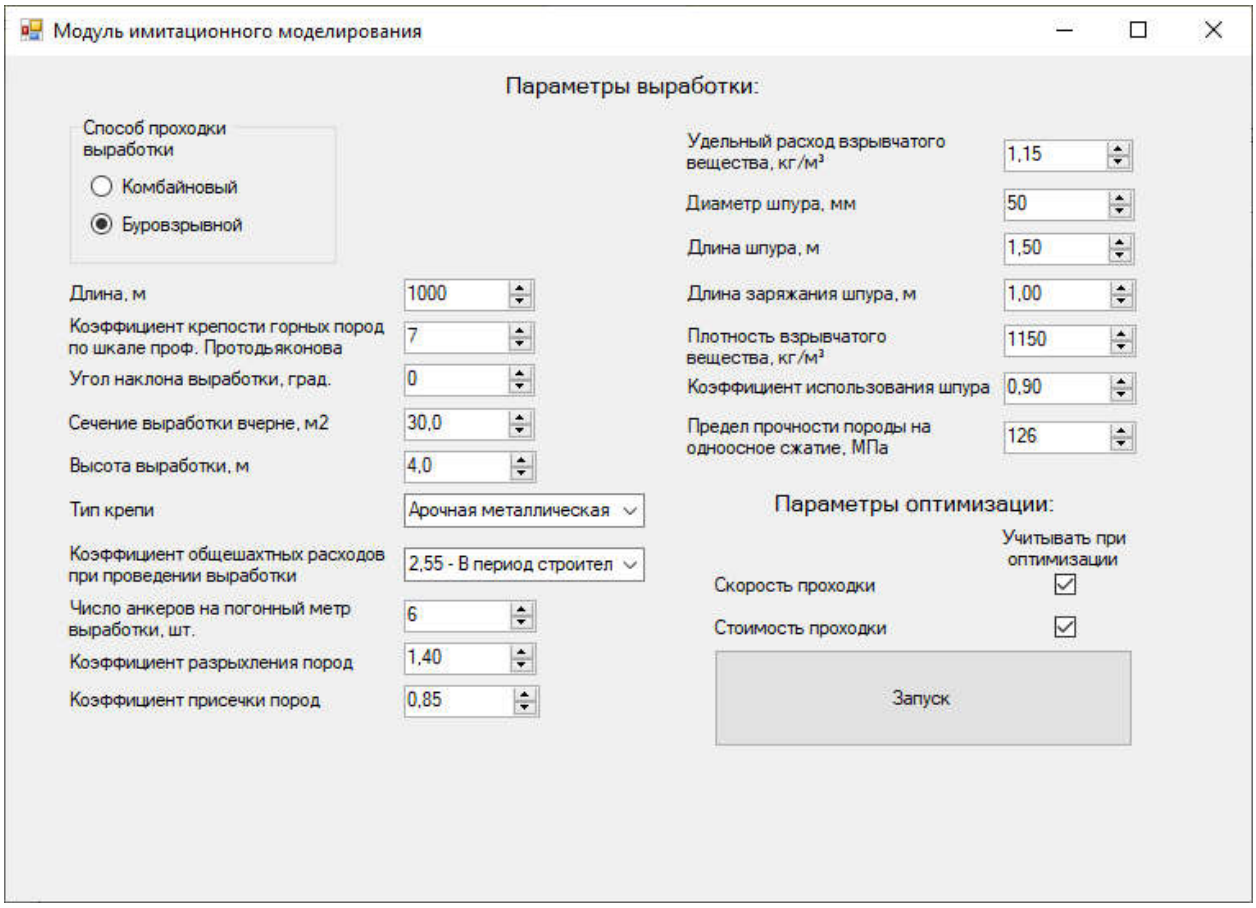


Рисунок 39 – Окно задания горнотехнических условий

Пользователь выбирает, параметры какой типовой технологии проведения горных выработок необходимо оптимизировать: комбайновой или буровзрывной. В зависимости от выбранной технологии для редактирования пользователю становятся доступны следующие параметры:

- Для комбайновой технологии: длина проходимой выработки, крепость горных пород, наклон, высота и сечение выработки вчерне, устанавливаемая крепь, период строительства выработки, число анкеров на метр выработки, коэффициент разрыхления породы и коэффициент присечки.
- Для буровзрывной технологии дополнительно указываются удельный расход взрывчатого вещества, диаметр отверстия шпура и его длина, длина заряжания, плотность взрывчатого вещества, коэффициент использования шпура и предел прочности породы на одноосное сжатие.

Далее пользователь выбирает, по каким параметрам проводить оптимизацию. На выбор предлагается три параметра: скорость проходки, стоимость проходки и

среднее хронологическое число горнорабочих в забое, характеризующее степень безопасности горнорабочих на рабочем месте и эффективность роботизации. У пользователя есть возможность выбрать несколько параметров, что приведёт к многокритериальной оптимизации параметров проходческой технологии.

После нажатия кнопки «приступить к эксперименту» модуль имитационного моделирования обращается к базе данных и запускает на ней процедуры по формированию всех возможных вариантов роботизации каждой модели горной машины, работающей в заданных пользователем горнотехнических условиях. Затем приложение импортирует во внутренние таблицы все возможные варианты роботизации горных машин, а также их параметры (производственные, стоимостные, скоростные).

Далее работу начинает модуль оптимизации, работающий по принципу эволюционного алгоритма. В модуле объявляется класс «множество комплектов горнопроходческих машин», каждый экземпляр которого представляет собой отдельный комплект роботизированного горного оборудования. Случайным образом из таблицы вариантов роботизации горных машин набирается 100 комплектов, каждый из которых обладает уникальными параметрами производительности, стоимости и безопасности горнорабочих.

На следующем шаге алгоритма приложение создаёт ещё 100 комплектов горных машин, которые случайным образом наследуют параметры уже имеющихся в множестве комплектов. Оценка новых комплектов проводится в модуле имитационного моделирования. Для этого в нём создана функция автоматического написания имитационных моделей на языке GPSS World.

Модуль имитационного моделирования импортирует параметры горных машин из комплекта эволюционного алгоритма и вписывает их имитационную модель в виде модельных переменных. В зависимости от параметров он определяет порядок и необходимость написания сегментов GPSS-модели. После модели импортируются в среду имитационного моделирования GPSS World. Там производится оценка каждого комплекта роботизированных горных машин, а результаты моделирования в виде скорости проходки возвращаются в модуль оптимизации.

Когда произведена оценка скорости проходческих работ, модуль оптимизации проводит оценку стоимости проходческих работ по методике проф. В. И. Стрельникова.

На основе выбранных пользователем параметров оптимизации производится подсчёт итогового коэффициента оптимизации, на основе которого популяция эволюционного алгоритма ранжируется по убыванию. Половина комплектов горных машин с худшим значением коэффициента удаляется из популяции, а оставшиеся повторяют вышеперечисленные шаги эволюционного алгоритма до его окончания.

В результате модуль оптимизации получает комплект горного оборудования для заданной технологии проведения горных выработок, а также средства его автоматизации и роботизации, обеспечивающие оптимальные либо субоптимальные параметры проходки, и отображает его пользователю (Рисунок 40).

Рисунок 40 – Результат работы модуля оптимизации параметров технологии проведения горных выработок

Также выводятся все параметры, по которым проводилась оптимизация: среднее хронологическое число горнорабочих в забое, скорость и стоимость проходческих работ. В нижней части интерфейса находятся изображения горных машин с условными обозначениями средств автоматизации и роботизации.

4.4 Оценка параметров технологий проведения горных выработок при автоматизации и роботизации технологических процессов

Для проведения экспериментов по обоснованной методике необходимо создание базы данных горного оборудования, имитационной модели горнопроходческих работ и программы для ЭВМ, реализующей эволюционный алгоритм. Для хранения характеристик представленных на рынке моделей горных машин, а также предложений по их роботизации создана реляционная база данных. Она содержит модели горных машин и их характеристики (стоимость, скорость перемещения, производственные показатели, возможности по роботизации, габариты), технологические процессы и составляющие их технологические операции, ограничения на совместное использование горной техники.

Прикреплённые к базе данных алгоритмы позволяют адекватно комбинировать имеющиеся модели горных машин в роботизированные комплекты на основе заданных пользователем горнотехнических условий. Алгоритмы рассчитывают стоимостные параметры комплектов и число горнорабочих, находящихся в забое для их обслуживания. Для оценки сформированных в базе данных комплектов горнопроходческих машин использовано имитационное моделирование. Время выполнения каждой технологической операции и среднее число горнорабочих в забое рассчитываются на основе параметров горных машин, хранящихся в базе данных, а также горнотехнических условий проходки. Для проведения оптимизационных экспериментов разработана программа для ЭВМ.

Пользователь через интерфейс вводит горнотехнические условия, задаёт параметры технологии проведения горных выработок, которые нужно оптимизировать. Эти данные передаются в модуль оптимизации, построенный на принципах эволюционного алгоритма. Для комплектования горных машин он использует базу данных, в которой хранятся все параметры горной техники.

Для оценки каждого отдельного комплекта горных машин модуль оптимизации пересылает данные в модуль имитационного моделирования, где на основе па-

раметров комплекта горных машин и горнотехнических условий создается имитационная модель. После над ней проводятся эксперименты, позволяющие вычислить оптимизируемые параметры комплекта горных машин, которые возвращаются в модуль оптимизации для дальнейших шагов эволюционного алгоритма.

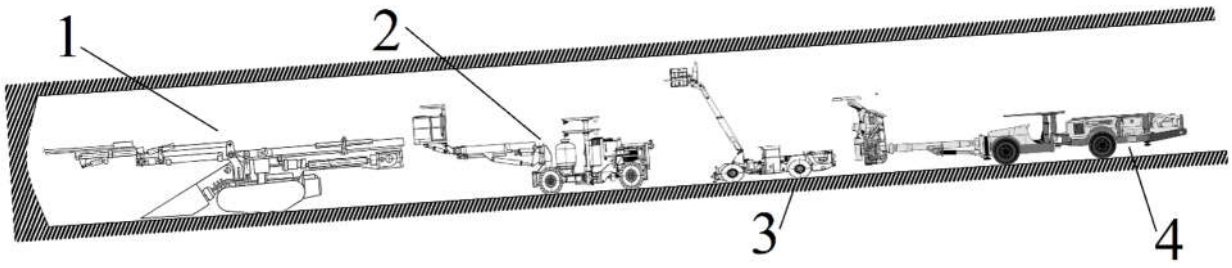
Модуль оптимизации работает до тех пор, пока эволюционные эксперименты дают уменьшение критерия оптимизации от итерации алгоритма к итерации. В случае, если несколько циклов подряд критерий оптимизации стагнирует, модуль оптимизации вычисляет комплект горных машин эволюционного алгоритма с наименьшим показателем критерия оптимизации и отправляет её в модуль имитационного моделирования. Там вычисляется число прогонов модели, которое требуется для вычисления точных параметров выбранного варианта технологии проведения горных выработок с учётом дисперсии случайных величин и заданной точности. По завершении работы модуль оптимизации рассчитывает оптимальные либо субоптимальные параметры технологии проведения горных выработок и выдаёт их в интерфейс пользователя.

Проверка работы разработанной методики выполнялась для условий проходки трёх наклонных стволов буровзрывным способом на шахте Увальная длиной 1,53 км. Оптимизация параметров технологии проведения горных выработок производилась для условий крепости пород $f = 8 \ldots 12$ по шкале проф. М. М. Протодьяконова, сечение стволов $S = 32 \ldots 34$ м^2 длиной $l = 2$ км и углом наклона $\alpha = 12° \ldots 18°$. Крепление выработок предусматривается металлической аркой и анкерами длиной 2 и 5 м.

Проведённые на предприятии работы были выполнены без роботизации со следующими параметрами: среднее хронологическое число горнорабочих в забое – 2,88, удельное время ведения проходческих работ – 17,85 мин/м^3, удельная стоимость ведения проходческих работ – 1 423 руб./м^3. Используются погрузочная машина 2ПНБ2У, анкероустановщики типа Rambor или Wombat.

Исходные данные записаны в разработанную программу для ЭВМ, после чего запущен эволюционный алгоритм, задействовавший имитационное моделирование. Получен комплект горных машин (рисунок 41), использование которых

обеспечивает оптимальные либо субоптимальные параметры технологии проведения горных выработок (Таблица 5):



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

Рисунок 41 – Полученный оптимальный вариант технологии проведения наклонных стволов для условий ш. «Увальная»

Таблица 5. Оптимальные (субоптимальные) параметры буровзрывной технологии проведения трёх наклонных стволов шахты «Увальная»

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
1	2	3	4	5	6
1. A – энергия одного удара бурильной установки, Дж	400	4. K_O – коэффициент одновременности работы бурильных установок	0,9	7. B – стойкость коронки на одну заточку, м	30
2. n – частота ударов бурильной установки, Гц	250	5. $V_{ХБУ}$ – скорость хода бурильной установки, м/мин	20	8. T_H – время наведения бурильной установки на место шпура, мин	0,17
3. $R_Б$ – число одновременно работающих бурильных установок, шт.	2	6. $T_{ЗАМ}$ – время замены бурильной коронки, мин	2	9. $T_{ЗАБ}$ – время забуривания бурильной установки, мин	0,5
10. Q_M – производительность зарядной машины, кг/мин	4	19. $V_П$ – средняя скорость перемещения погрузочной машины по выработке без уклона, км/ч	0,5	28. $C_{РБ}$ – стоимость роботизации бурильной машины, млн. руб.	12
11. $Q_{ХЗМ}$ – скорость хода шланга подачи зарядной машины, м/мин	15	20. V_O – средняя скорость перемещения оборочной машины по выработке без уклона, км/ч	9	29. $C_З$ – стоимость зарядной машины, млн. руб.	20
12. $T_{НАВ}$ – длительность наведения зарядной машины на очередной шпур, мин	0,33	21. V_A – средняя скорость перемещения анкероустановочной машины по выработке без уклона, км/ч	15	30. $C_{РЗ}$ – стоимость роботизации зарядной машины, млн. руб.	1
13. $R_З$ – число стрел зарядной машины, шт.	2	22. $N_Б$ – число горнорабочих в забое, требующихся для бурения шпуров, чел.	0	31. C_O – стоимость оборочной машины, млн. руб.	15

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6
14. Q_O, производительность оборочной машины, м^3/мин	0,15	23. $N_З$ – число горнорабочих в забое, требующихся для заряжания шпуров, чел.	0	32. $C_{РО}$ – стоимость роботизации оборочной машины, млн. руб.	1
15. $Q_{ПОГР}$, производительность погрузочной машины, м^3/мин	1,25	24. $N_О$ – число горнорабочих в забое, требующихся для оборки забоя, чел.	0	33. $C_П$ – стоимость погрузочной машины, млн. руб.	0
16. $T_А$, время установки анкера анкероустановочной машиной, мин	4,5	25. $N_П$ – число горнорабочих в забое, требующихся для погрузки отбитой горной массы, чел.	0	34. $C_{РП}$ – стоимость роботизации погрузочной машины, млн. руб.	0
17. $V_Б$ – средняя скорость перемещения бурильной машины по выработке без уклона, км/ч.	0,5	26. $N_О$ – число горнорабочих в забое, требующихся для крепления забоя, чел.	0	35. $C_А$ – стоимость анкероустановочной машины, млн. руб.	35
18. $V_З$ – средняя скорость перемещения зарядной машины по выработке без уклона, км/ч	8	27. $C_Б$ – стоимость бурильной машины, млн. руб.	14	36. $C_{РА}$ – стоимость роботизации анкероустановочной машины, млн. руб.	1

Данный частично роботизированный комплект горных машин показал следующие параметры эффективности: среднее хронологическое число горнорабочих в забое – 1,07, удельное время ведения проходческих работ – 12,76 мин/м^3, удельная стоимость ведения проходческих работ – 1 788 руб./м^3. В Таблице 6 показано сравнение полученной технологии проведения наклонных стволов для условий ш. «Увальная» с традиционным вариантом, использованным на производстве, а также вариантом максимально возможной автоматизации и роботизации.

Таблица 6. Параметры нескольких вариантов проведения наклонных стволов буровзрывным способом для условий ш. «Увальная»

Вариант ведения проходческих работ	Среднее хронологическое число людей в забое, N, чел	Удельное время ведения проходческих работ, T, мин/м^3	Удельная стоимость ведения проходческих работ, C, руб./м^3	Критерий оптимизации, K
Оптимальный (субоптимальный) вариант	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

Несмотря на то, что значение критерия оптимизации у технологии с оптимальными (субоптимальными) параметрами и технологии с максимальной автоматизацией и роботизацией отличается всего на 11,6%, выбор оптимальной технологии проведения наклонных стволов позволяет горному предприятию экономить около 23,7 млн. рублей при проходке 1,53 км наклонных стволов при аналогичных показателях безопасности и скорости проведения наклонных стволов.

На графиках организации работ проведения наклонного ствола с применением традиционной и частично роботизированной технологий, построенных по результатам компьютерных экспериментов, показано, что выбранная частично роботизированная технология 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%. Всё это позволит сократить время проходческого цикла на 63,83% по сравнению с традиционной технологией (Рисунок 42).

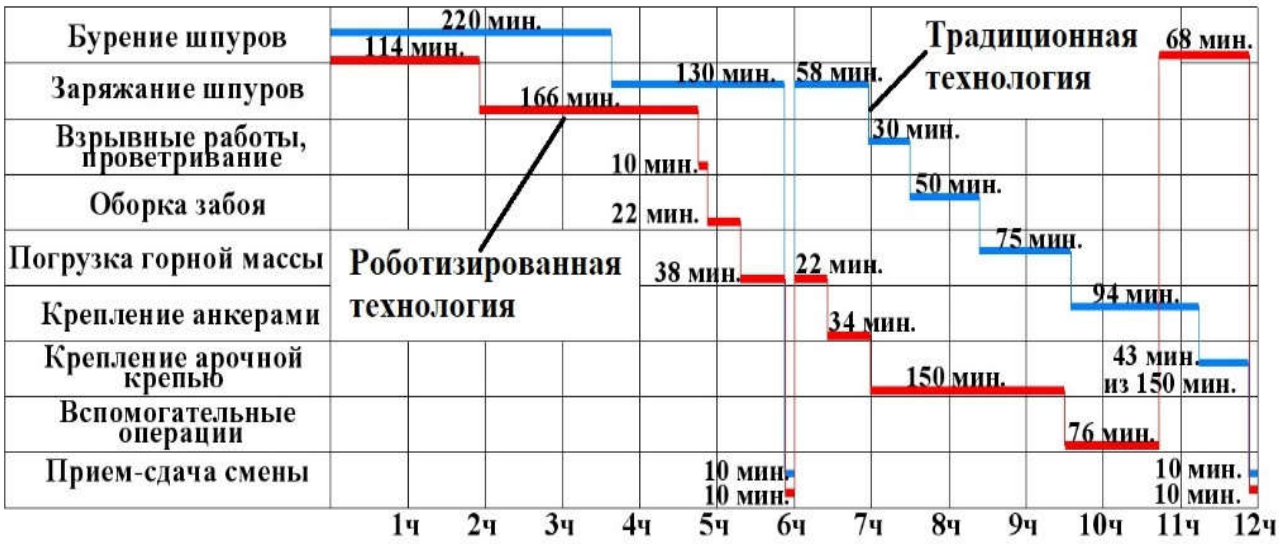


Рисунок 42 – Графики организации работ проведения наклонных стволов роботизированной и традиционной технологиями

Полученная роботизированная технология проведения горных выработок позволит за месяц пройти на 21 м выработки больше, чем традиционная (Рисунок 43).

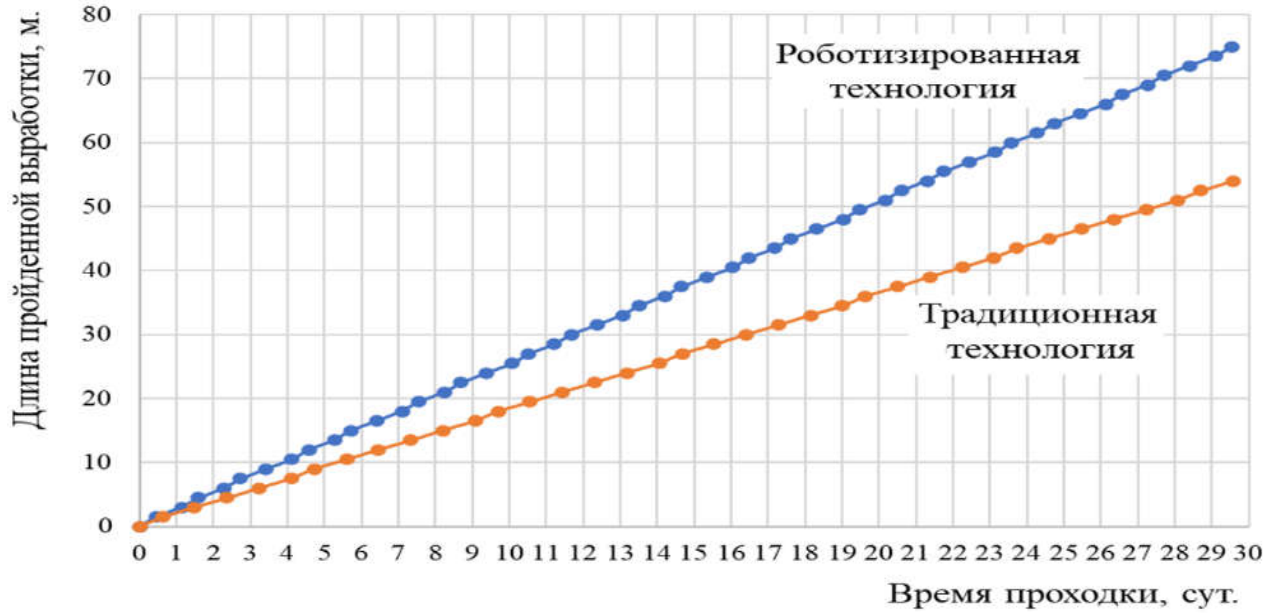


Рисунок 43 – Динамика ведения проходческих работ с использованием традиционной и роботизированной технологий проведения горных выработок

Полученный вариант с частичной роботизацией операций 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 MQT-120 «Рамбор». Показатели эффективности полученной технологии: среднее хронологическое число горнорабочих в забое – 1,28, скорость проходки – 540 м/мес., сто-

имость 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.

4.5 Выводы по главе

Обоснована и разработана методика оптимизации параметров типовых комбайновых и буровзрывных технологий проведения горных выработок при автоматизации и роботизации основных технологических процессов, включающая 6 этапов и имеющая ряд отличительных преимуществ:

- определение оптимальных параметров без проведения дорогостоящих натурных экспериментов;

- учёт множества нетрадиционных вариантов частичной автоматизации и роботизации основных технологических процессов проходческого цикла;

- решение многофакторной многокритериальной задачи дискретной оптимизации параметров технологий проведения горных выработок при автоматизации и роботизации основных технологических процессов с учётом их динамики и вероятностной природы;

Применение методики для условий ведения проходческих работ комбайновым и буровзрывным способом на шахтах Кузбасса показало, что варианты частичной автоматизации и роботизации основных технологических процессов имеют оптимальные параметры безопасности, скорости и стоимости технологий проведения горных выработок.

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 м^2 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 м^2 под углом 4-6° 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 *К* необходимо и достаточно разрешаются на уточненных 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 м^2 под углом 12-18° по породе крепостью 8-12 по шкале проф. М. М. Протодьяконова;

– для оптимизации параметров комбайновых технологий точность поиска оптимальных параметров увеличивается на 4,7%, на примере условий проведения вентиляционного штрека сечением вчерне 14,7 м^2 под углом 4-6° с присечкой породы крепостью 3-4 по шкале проф. М. М. Протодьяконова.

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 м^2 от сбойки №15.21 в сторону западных бремсбергов вверх по простиранию пласта 5 под углом 4-6° с присечкой породы крепостью 3-4 по шкале проф. М. М. Протодьяконова. 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 м^2 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 Scamec 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» (СИМТП), позволяющая проводить оптимизацию параметров технологий 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 роботиза-

ции технологических процессов возможно при учёте следующих параметров в разработанной методике оптимизации: газоносность и нарушенность пласта, плановых и внеплановых простоев, геометрии горных выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линник Ю. Н. Сравнительный анализ показателей работы при эксплуатации отечественных и зарубежных проходческих комбайнов / Ю. Н. Линник, В. Ю. Линник, О. В. Байкова, А. В. Поляков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 11. – С. 208-215.

2. Гришин, В. Ю. Использование дисперсионного анализа при исследовании уровня травматизма на горном предприятии / В. Ю. Гришин и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 4. – С. 222-224.

3. Чефранов И. В. Разработка методов оценки риска для обеспечения безопасности проведения выработок в условиях негазовых шахт восточного Донбасса / автореф. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. 05.26.03. – Москва: 2004. – 28 с.

4. Лукьянова Г. В. Выбор рациональных вариантов проходческих погрузочно-транспортных модулей на основе моделирования рабочих процессов с учетом случайного характера внешних воздействий / автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук 05.05.06.: Новочеркасск. – 2006. – 22 с.

5. Плакиткин Ю. А. Цифровизация экономики угольной промышленности России - от "Индустрии 4.0" до "Общества 5.0" / Ю. А. Плакиткин, Л. С. Плакиткина // Горная промышленность. – 2018. – № 4. – С. 22-28.

6. Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года (утверждена распоряжением правительства России от 13.06.2020 № 1582-Р) [Электронный ресурс]: 2020. – Режим доступа: https://minenergo.gov.ru/node/433

7. Першин В. В. Механизация операций проходческого цикла при сооружении капитальных горных выработок / В. В. Першин, Ю. А. Масаев, Е. В. Паршикова // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2009. – № 1. – С. 109-113

8. Першин В. В. Совершенствование технологии и организации строительства устьев наклонных стволов / В. В. Першин, А. В. Дементьев, М. О. Соловьёва // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2011. – № 3. – С. 29-33

9. Першин В. В. Современные вопросы строительной геотехнологии. Информационно-эргатические аспекты / Кузб. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2015. – 236 с.

10. Копытов А. И. Новые технологии безопасной разработки рудных месторождений в условиях Кузбасса / А. И. Копытов, В. В. Першин, Ю. А. Масаев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 3. – С. 77-82

11. Копытов А. И. Методика выбора крепи горных выработок при разработке месторождений "Евразруда" / А. И. Копытов В. В. Першин, Г. К. Клюкин, М. Д. Войтов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – № 2. – С. 36-39.

12. Першин В. В. Обоснование параметров и разработка новой конструкции многослойного анкера фрикционного типа // В. В. Першин, Ю. А. Фадеев, Т. Е. Трипус // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2016. – № 2. – С. 47-53

13. Копытов А. И. Новая технология отработки шерегешского месторождения горно-шорского филиала ОАО «ЕВРАЗРУДА» / А. И. Копытов, В. В. Першин // Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы в горном деле». –2016. – С. 128-131.

14. Степанов Ю. А. Обеспечение информационной поддержки ведения горных работ с использованием ГИС-технологий / Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 4. – С. 118-122.

15. Степанов, Ю. А. Геоинформационные системы и промышленная безопасность угольных предприятий / Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – № 4. – С. 50-54.

16. Abramovich A., Stepanov Yu., Janocko Ju. The influence of the coal mining process on the state of the Earths surface in the district of the block. E3S web of conferences. T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. 2020. С. 01051

17. Хямяляйнен В. А. Управление процессом формирования цементационных завес вокруг капитальных горных выработок / автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Кузбасский политехн. ин-т.

Кемерово, 1992. – 36 с.

18. Хямяляйнен, В. А. Экспериментальные исследования физико-механических свойств тампонажных растворов на основе цемента и отходов углеобогащения / В. А. Хямяляйнен, М. А. Баёв // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – № 6. – С.12-19.

19. Хямяляйнен В. А. Оценка влияния отходов углеобогащения на физико-механические свойства тампонажных растворов и параметры технологии цементации / В. А. Хямяляйнен, М. А. Баёв // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 4. – С. 247-253.

20. Егоров. П. В. Исследование влияния длины очистного забоя на проявление горного давления на механизированную крепь / П. В. Егоров и др. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2004. – № 6. – С. 99-103.

21. Егоров. П. В. Влияние нарушенности и обводненности горных пород на устойчивость горных выработок / П. В. Егоров, О. П. Егоров // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2004. – № 6-1. – С. 98-99.

22. Егоров, П. В. К вопросу выбора базовой схемы расчета параметров междукамерных целиков / П. В. Егоров, В. А. Песиков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2004. – № 2. – С. 60-63.

23. Федорин В. А. Геотехнологические аспекты открыто-подземного (совмещенного) способа освоения угольных месторождений Кузбасса / В. А. Федорин, А. Ю. Михайлов, Г. Е. Ивершина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № 11. – С. 261-269

24. Шахматов В. Я. Повышение безопасности ведения открытых горных работ за счет использования подземной инфраструктуры смежной шахты / В. Я. Шахматов и др. // безопасность труда в промышленности. – 2010. – № 4. – С. 63-64.

25. Федорин В. А. Технологические аспекты отработки верхнего слоя на мощных угольных пластах / В. А. Федорин, В. Я. Шахматов, Е. Л. Варфаломеев, О. В. Кассина // Сборник трудов XIII международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной

промышленности»: Кемерово. – 2011. – С. 127-130.

26. Майоров А. Е. Исследование процесса закрепления анкеров сыпучим материалом / Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – № 4. – С. 11-15.

27. Майоров А. Е. Геомеханические аспекты консолидирующего крепления горных выработок / Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2011. – № 3. – С. 41-44.

28. Майоров А. Е. Обоснование и разработка технологии анкер-инъекционного крепления капитальных выработок с использованием цементных растворов и сыпучего заполнителя / автореф. дисс. на соиск. уч. степ. доктора техн. наук. // Кемерово. – 2012. – 42 с.

29. Нургалиев Е. И. Реологические характеристики специализированных цементных смесей для комплексной изоляции горных выработок / Е. И. Нургалиев, А. Е. Майоров // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 4. – С. 56-65.

30. Нургалиев Е. И. Физико-механические характеристики специализированных цементных смесей для комплексной изоляции горных выработок / Е. И. Нургалиев, А. Е. Майоров // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 4. – С. 50-56.

31. Конюх В.Л., Тайлаков О.В., Анферов Б.А. Применение сетей Петри для моделирования шахтных робототехнических систем // Автоматизация горных и строительных машин. – Новосибирск: ИГД СО РАН – 1990, С. 41-50

32. Sinoviev V. V. Starodubov A. N., Okolnishnikov V.V., Dorofeev M. U. Approach to effectiveness evaluation of robotics technology in mining using discrete event simulation. International journal of mathematics and computers in simulation. 2016. V10. P. 123-128.

33. Зиновьев В. В. Разработка системы имитационного моделирования организационно-технических вариантов угледобывающего производства / В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов, С. В. Кравчук, П. В. Гречишкин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 2. – С. 30-38.

34. Стародубов А. Н. Система имитационного моделирования горнопроходческих работ / А. Н. Стародубов, В. В. Зиновьев, М. В. Берсенев, А. Е. Майоров // Уголь. – 2016. – № 2. – С. 20-24.

35. Okolnishnikov V.V., Rudometov S.V., Zhuravlev S.S., Sinoviev V.V. Simulation of longwall coal mining technologies. 28th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2016. 28. 2016. С. 212-215.

36. Стародубов А. Н. Применение имитационного моделирования для исследования режимов выпуска угля подкровельной толщи / А. Н. Стародубов, В. В. Зиновьев, В. И. Клишин, В. А. Крамаренко // Материалы всероссийской научно-практической конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «ИММОД-2019». – Екатеринбург: 2019. – С. 540-547.

37. Кузнецов И. С. Оценка производительности при добыче угля открытым способом на имитационной модели / И. С. Кузнецов, В. В. Зиновьев // Материалы инновационного конвента «Кузбасс: образование, наука, инновации – 2016». – Кемерово: 2016. – С. 32-34.

38. Кузнецов И. С. Имитационное моделирование безлюдной открыто-подземной геотехнологии с учетом простоев горных машин / И. С. Кузнецов, В. В. Зиновьев // Материалы всероссийской научно-практической конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «ИММОД-2019». – Екатеринбург: 2019. – С. 445-450.

39. Тайлаков О. В. Выбор рациональных параметров аэрофотосъемки поверхности угольных предприятий беспилотными летательными аппаратами / О. В. Тайлаков, В. И. Ефимов, Д. С. Коровин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2016. – № 1. – С. 50-57.

40. Тайлаков О. В. Верификация пространственно-цифровых моделей открытых угольных складов, построенных по результатам аэрофотосъемки / О. В. Тайлаков, М. П. Макеев, Д. С. Коровин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – № 5. – С. 68-73.

41. Тайлаков О. В. Контроль параметров гидродинамического воздействия на угольный пласт в горизонтальных скважинах / О. В. Тайлаков, Е. А. Уткаев, А. Н.

Кормин // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2019. – № 5. – С. 351-353.

42. Демин В. Ф. Структурно-параметрический синтез оптимальной технологической схемы очистных работ / В. Ф. Демин, Н. Н. Тулепов, В. В. Демин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2006. – № 1. – С. 40-43.

43. Ордин А. А. К вопросу об оптимизации длины и производительности комплексно-механизированного очистного забоя угольной шахты / А. А. Ордин, А. А. Метельков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 2. – С. 418-422.

44. Рудометов С. В. Моделирование работы очистного забоя угольной шахты / С. В. Рудометов, В. В. Окольнишников, А. А. Ордин // Сборник материалов конференции «Марчуковские научные чтения 2019». – Новосибирск, 2019. – С. 144

45. Ордин А. А. Оптимизация ширины захвата очистного комбайна при подземной разработке пологих метаноносных угольных пластов / А. А. Ордин, А. М. Тимошенко, Д. В. Ботвенко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 6. – С. 89-96

46. Мешков А. А. О рекордной длине и производительности очистного забоя шахты имени В. Д. Ялевского / А. А. Мешков и др. // Уголь. – 2018. – № 7. – С. 4-8.

47. Ордин А. А. Оптимизация объема добычи медистых руд октябрьского медно-никелевого месторождения с учетом лагового фактора / А. А. Ордин, И. В. Васильев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 3. – С. 79-85.

48. Димитракопулос Р. Вероятностная оптимизация стратегического проектирования шахт: десятилетие разработок и исследований / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 2. – С. 5-17.

49. Хохолов Ю. А. Оптимизация формирования льдопородного массива в горных выработках / Ю. А. Хохолов, А. Ф. Мамонов, В. П. Зубков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2004. –

№ 10. – С. 103-107.

50. Ботвинник А. А. Интегрированная модель управления качеством выходного потока угля при открытой разработке свиты пластов / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 3. – С. 63-72.

51. Антонов М. А. Адаптация методов оптимизации многофакторных задач и специальных методов оптимизации сложных систем к технологическим схемам угольных шахт / М. А. Антонов, Н. К. Оганесян, В. В. Агафонов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 11. – С. 367-371.

52. Клишин С. В. Моделирование процесса выпуска угля при механизированной отработке мощных крутопадающих угольных пластов / С. В. Клишин, В. И. Клишин, Г. Ю. Опрук // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 6. – С. 105-116.

53. Клишин В. И. Разработка мощных пластов механизированными крепями с регулируемым выпуском угля / Институт горного дела СО РАН: Новосибирск. – 2007. – 134 с.

54. Клишин В. И. Исследование процессов выпуска угля при отработке мощных пологих и крутых угольных пластов / В. И. Клишин, С. В. Клишин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 2. – С. 69-81.

55. Копытов А.И. Методические основы для повышения эффективности и безопасности горно-подготовительных работ при отработке глубоких горизонтов месторождений ОАО «Евразруда» / А.И. Копытов, В.В. Першин // Вестник КузГТУ № 3. Кемерово - 2013. – С. 46-49

56. Копытов А.И. Разработка рациональной технологии крепления горных выработок в удароопасных условиях / А.И. Копытов, А.А. Лебедев, Б.А. Утробин // Вестник КузГТУ. - 2017. - № 5. - С. 10-14.

57. Адамков А.В. Разработка и обоснование параметров врубоблочного способа разрушения угольного массива при проведении подготовительных выработок автореф. … канд. тех. наук: 25.00.22 / Адамков Аркадий Викторович; КузГТУ им.Т.Ф. Горбачева. - Кемерово., 2007. - 21 с.

58. Адамков А. В. Состояние запыленности воздуха в забоях подготовительных выработок при работе проходческих комбайнов / А. В. Адамков // Вестник КузГТУ – Кемерово, 2004. – № 1. – С. 56–59.

59. Позолотин А.С. Метод расчета параметров анкерной крепи глубокого заложения для поддержания горных выработок в различных горно-геологических и горнотехнических условиях угольных шахт / А.С. Позолотин, М.А. Розенбаум, А.А. Ренев, Е.А. Разумов, С.М. Черняховский // Журнал «Уголь». 2013. № 4 (1045). С. 32-35.

60. Ануфриев В.Е. Опыт доупрочнения канатными анкерами кровли выработок, сохраняемых на границе с выработанным пространством / В.Е. Ануфриев, А.С. Позолотин, А.А. Ренев, В.М. Рычковский, Ю.Ю. Самолетов // Вестник КузГТУ. 2004. № 2 (39). С. 55-60.

61. Кассихина Е.Г. Обоснование конструктивных решений стальных копров многофункционального назначения // Горно-информационно аналитический бюллетень (научно-технических журнал). - № 4. 2014. – С. 28-32.

62. Кассихина Е. Г. Программа для подбора сечений элементов стального копра многофункционального назначения и вычисления собственного веса металлоконструкций копра / свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019663146. – 2019. – заявл. 02.10.2019. – опублик. 10.10.2019. – 53 Кб.

63. Кассихина Е.Г. Обоснование параметров и разработка метода расчета стальных копров многофункционального назначения автореф. … канд. тех. наук: 25.00.22 / Кассихина Елена Геннадьевна; КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева. - Кемерово., 2002. - 22 с.

64. Хомченко В.Н. Зависимость расчётных размеров целиков от глубины разработки в системах с короткими очистными забоями / В.Н. Хомченко, В.А. Карасев, Ю.И. Масаев // Вестник КузГТУ – Кемерово, 2015. – № 1. – С. 45–49.

65. Зорков Д.В. Обоснование технологических параметров безопасного въезда очистного механизированного комплекса в предварительно подготовленную демонтажную выработку на угольных шахтах назначения автореф. … канд.

тех. наук: 25.00.22 / Зорков Данил Викторович; КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева. - Кемерово., 2016. - 22 с.

66. Зорков, Д. В. Геомеханическое обоснование выбора крепи предварительно подготовленной демонтажной выработки / Д. В. Зорков, А. А. Ренев, С. С. Цибаев // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 2 (108). – С. 49-56.

67. Масаев Ю.А. Совершенствование технологии возведения бетонных крепей для подземных горных выработок / Ю.А. Масаев, А.П. Политов, В.Ю. Масаев // Вестник КузГТУ. – 2017. – № 4. – С. 58-66.

68. Супруненко А.Н. Неопределенности и производственные риски угольной шахты / А.Н. Супруненко, В.А. Скукин, А.И. Набоков // Вестник КузГТУ. – 2005. – № 4.2. - С. 105-108.

69. Филимонов К.А. Исследование влияния скорости подвигания очистного забоя на разрушение кровли // Вестник КузГТУ. – 2003. – № 6 - С. 10-12.

70. Миндели, Э. О. Буровзрывные работы при подземной добыче полезных ископаемых. – М., Недра. – 1996.

71. Покровский, Н. М. Технология строительства подземных сооружений и шахт. – М., Недра. – 1977. – 400 с.

72. Дмитрак, Ю. А. Методика расчёта основных показателей при комплексной механизации проведения выработок буровзрывным способом // Механизация горнопроходческих работ: Сб. науч. тр. / ЦНИИподземмаш. – М., 1982. – С. 44-53.

73. Корнеев, М. В, Выбор оптимальных технологических решений проведения горизонтальных горных выработок / автореф. диссер. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1984. - 21 с.

74. Рогов, Е. И. Системный анализ в горном деле / Алма-Ата: Наука, 1976. – 207 с.

75. Чинакал Н. А. Шахта будущего // Проблемы шахты будущего. — Новосибирск, 1965. — С. 5–28.

76. Чинакал Н. А. От теории к практике «шахты будущего» // Шахта будущего. Тезисы докладов 2-й Всесоюз. научн.-практ. конференции 16–18 октября 1973 г. — Новосибирск, 1973. — С. 3–4.

77. Конюх В. Л. Предпроектный анализ шахтных робототехнических систем / В. Л. Конюх, О. В. Тайлаков // Наука. – Новосибирск. – 1991. – 238 с.

78. Конюх В. Л. Имитационное моделирование в горном деле / В. Л. Конюх, В. В. Зиновьев // Сборник докладов научно-практической конференции «Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках ИММОД-2003», Санкт-Петербург, 23-24 октября 2003 г. – С. 106-110

79. Конюх В. Л. Шахтная робототехника. / Кемерово: Кузбассвузиздат. – 2000. – 335 с.

80. Конюх В. Л. Имитационное моделирование способов добычи полезных ископаемых на большой глубине / В. Л. Конюх, В. В. Окольнишников // Проблемы информатики. – 2009. – № 3. – С. 54-61.

81. Зиновьев В. В. Разработка методов динамического моделирования горно-подготовительных работ / диссер. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Кемерово, 1998. – 219 с.

82. Конюх В. Л. Имитационное моделирование в горном деле / В. Л. Конюх, В. В. Зиновьев / Сборник материалов конференции «ИММОД-2003»: Екатеринбург, 2003. – С. 106-110.

83. Зиновьев В. В. Моделирование многозабойной проходки с использованием имитационного подхода / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № S6. – С. 138-144.

84. Зиновьев В. В. Разработка дискретно-событийных моделей роботизированных технологий проведения горных выработок / В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов / Уголь. – 2014. – № 12. – С. 38-41

85. Зиновьев В. В. Имитационные модули для синтеза моделей горнопроходческих работ / // Сборник материалов конференции «ИММОД-2015»: Екатеринбург, 2015. – С. 127-132.

86. Гречишкин П. В. Динамическое моделирование взаимодействия оборудования механизированного очистного забоя / диссер. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Кемерово, 2005. – 22 с.

87. Клюкин, Г. К. Совершенствование метода проектирования технологии строительства горных выработок / диссер. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Кемерово, 2005. – 18 с.

88. Соловьёв В. А. Разработка и научное обоснование эффективных буровзрывных технологий с применением самоходного оборудования для рудников / В. А. Соловьёв и др. // Апатиты, 1989. – 156 с.

89. Стрельцова Г. А. Концептуальные модели управления технологией подземной поточной роботизированной добычи крепких руд / Г. А. Стрельцова, А. М. Ткаченко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S6. – С. 506-517.

90. Стрельцова Г. А. Концептуальные модели управления технологией подземной поточной роботизированной добычи крепких руд / Г. А. Стрельцова, А. М. Ткаченко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № S. – С. 241-249.

91. Оганесян А. С. Алгоритм модульного синтеза технологических схем угольных шахт / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 12. – С. 18-27.

92. Журавлёв А. Г. Поиск рациональных параметров транспортных систем карьеров с применением цифровых технологий / Сборник докладов конференции «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений». – 2020. – С. 220-226.

93. Журавлёв А.Г. Вопросы оптимизации параметров транспортных систем карьеров / Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3-1. – С. 583-601.

94. Журавлёв А. Г. Моделирование параметров транспортных систем карьеров // Черная металлургия. – 2015. – № 12. – С. 22-26.

95. Журавлёв А. Г. Возможности автоматизированной оптимизации работы транспортных систем карьеров на основе мультиагентного подхода / А. Г. Журавлев, П. А. Ченцов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. - № S37. – С. 141-150.

96. Martin, Magnusson. 3D Scan Matching for Mobile Robots with Application to Mine Mapping. Department of Technology at Orebro University. Orebro. – 2006. – P. 46

97. Ройтер, М. Эффективность работы механизированных очистных забоев с системой управления Марко «Цифровая шахта» / М. Ройтер, М. Крах, У. Кислинг, Ю. Векслер // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2014. – № 1. – Т.2. – С. 176-181

98. Лыхин П. А. О росте производительности буровзрывного комплекса при проходке тоннелей / Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2013. – № 7. – С. 156-162.

99. Глебов Н. А. Системы управления робототехническими и мехатронными комплексами в подземном и индустриальном строительстве / Известия ТРТУ. – 2006. – С. 85-92

100. Заряжание и взрывание шпуров и скважин / Горный журнал Казахстана. – 2011. – № 9. – С. 28-30

101. Журавлёв А. Г. Тенденции развития транспортных систем карьеров с использованием роботизированных машин / Проблемы недропользования. – 2014. – № 3. – С. 164-175

102. Тарасов П. И. Варианты реализации безлюдных технологий для горно-промышленного транспорта / П. И. Тарасов, А. Г. Журавлев, В. А. Черепанов, В. В. Разбицкий // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2013. – № 1. – С. 104-111.

103. Ваганов В. С. Анализ способов организации сетей передачи данных для построения современных МФСБ в угольных шахтах / В. С. Ваганов, Л. В. Урусов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 3. – С. 72-81.

104. Опарин В. Н. Мировой опыт автоматизации горных работ на подземных рудниках / В. Н. Опарин и др. // Новосибирск, 2007. – 97 с.

105. Русин Е. П. Об автоматизации добычных процессов на подземных горнорудных предприятиях / Е. П. Русин, А. М. Фрейдин, А. П. Тапсиев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № S16. – С. 235-244.

106. Фрянов В. Н. Робот в очистном забое. Перспективы развития и внедрения технологий подземной угледобычи без постоянного присутствия людей / Уголь Кузбасса. – 2014. – № 6. – С. 32-25.

107. Фрянов В. Н. Теоретические подходы к проектированию роботизированных угольных шахт на основе современных технологий моделирования / В. Н. Фрянов, Л. Д. Павлова, М. В. Темлянцев // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2017. – № 3. – С. 15-21.

108. Фрянов В. Н. Моделирование геомеханических процессов при подземной разработке мощных угольных пластов длинными и короткими забоями с элементами роботизации / В. Н. Фрянов, Л. Д. Павлова // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2018. – № 1. – Т.5. – С. 142-148.

109. Фрянов В. Н. Обоснование геомеханических параметров роботизированной выемки угольных пластов на больших глубинах по результатам численного моделирования / В. Н. Фрянов, Л. Д. Павлова // Горный журнал. – 2019. – № 2. – С. 48-52.

110. Кубарев В. А. Разработка концептуальной модели управления роботизированным проходческим комплексом при подземной угледобыче / В. А. Кубарев и др. // «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника», труды Восьмой Всероссийской научно-практической конференции. – 2018. – С. 90-95.

111. Fryanov V. N. Pavlova L. D. Cherepov A. A. Geomechanical justification based on the results of numerical modeling of combined technology parameters of working areas development with the use of robotized means of underground mining. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 206 (2018) 012037. P. 1-7.

112. Fryanov V. N. Pavlova L. D. Modeling geomechanical processes in underground longwall and shortwall mining of thick coal seams with elements of robotization. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 262 (2019) 012016. P. 1-5.

113. Емельянов А. А. Комплексное имитационное моделирование с применением генетических алгоритмов / А. А. Емельянов, О. В. Булыгина, Е. А. Власова, Н. З. Емельянова // Прикладная информатика. - 2017. - № 6. - С. 89-100.

114. Хивинцев М. А. Агрегированная с многоагентным генетическим алгоритмом имитационная модель предприятия дистанционной торговли для решения задач многокритериальной оптимизации // автореф. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. 05.13.18. – Москва. – 2015. – 28 с.

115. Хивинцев М. А. Применение многоагентного генетического алгоритма для поиска оптимальных стратегических и оперативных решений / А. М. Хивинцев, А. С. Акопов // Бизнес-информатика. – 2014. – № 1. – С. 23-33.

116. Акопов А. С. Разработка параллельных генетических алгоритмов вещественного кодирования для систем поддержки принятия решений социально-экономического и экологического планирования / А. С. Акопов, А. Н. Бекларян, М. Тхакур, Б. Д. Верма // Бизнес-информатика. – 2019. – № 1. – С. 33-44.

117. Космачева И. М. Модель оценки эффективности конфигурации системы защиты информации на базе генетических алгоритмов / И. М. Космачева, Н.В. Давидюк, И.В. Сибикина, И.Ю. Кучин // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. - 2020. - № 3. - С. 40-41.

118. Гурьев А. Т. Имитационное моделирование систем лесных машин с использованием генетических алгоритмов / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № S10. – С. 246-255.

119. Петросов Д. А. Интеллектуальный структурный синтез технологических процессов на основе эволюционных методов и теории сетей петри / Д. А. Петросов, А. Г. Бажанов // Известия Юго-западного государственного университета. Серия: управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2018. – № 2. – С. 41-51.

120. Афонин П. В. Инструментальные средства для оптимизации и планирования производства на базе эволюционных метаэвристик / П. В. Афонин, А. А. Маликова, К. С. Сашилина // Программные продукты и сервисы. – 2014. – № 4. – С. 188-193.

121. Beklaryan L. A., Akopov A. S., Beklaryan A. L., Saghatelyan A. K. Agent-based simulation modeling for regional ecological-economic systems. A case study of the Republic of Armenia. Machine Learning and Data Analysis. 2016. V. 2. Issue 1.

122. Бекларян Г. Л. Проблемы управления внешнеэкономической деятельностью РФ / Вестник ЦЭМИ. – 2018. – № 4. – С. 18.

123. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. Руководящий документ Госстандарта России Р 50.1.028-2001. – 2001. – 62 с.

124. Бродецкий Г. Л. Системный анализ в логистике, выбор в условиях неопределённости. – М: Academia. – 2010. – 336 с.

125. Зак Ю. А. Прикладные задачи многокритериальной оптимизации / Москва : Экономика, 2014. - 455 с.

126. Бабиюк Г. Б. Анализ показателей проходческих комбайнов на шахтах Г.П. «Свердловскантарцит» / Г.Б. Бабиюк, Е.С. Смекалин // Уголь Украины. – 2008. – № 1. – С. 16-20.

127. Соловьёв В. А. Статистические законы распределения параметров и операций производственных процессов и оценка их влияния на стабильность добычи руды и проходки горных выработок буровзрывным способом / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2004. – № 10. – С. 178-183.

128. Соловьёв В. А. Результаты статистических исследований процессов ведения очистных и проходческих работ с применением самоходного оборудования / Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 1. – С. 135-142

129. Соловьёв В. А. Разработка и научное обоснование эффективных буровзрывных технологий с применением самоходного оборудования на рудниках / автор. дисс. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. – Екатеринбург: 2005. – 39 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Согласовано:

Генеральный директор
АО «НЦ ВостНИИ»
_____ О.В. Тайлаков
«28» августа 2020 г.

Утверждаю:

Директор ФИЦ УУХ СОРАН
_____ В.Н. Кочетков
«27» августа 2020 г.

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ ПРОВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК С ЭЛЕМЕНТАМИ АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТИЗАЦИИ

Кемерово 2020

Приложение Б

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
АО НЦ «ВостНИИ»
д.т.н., проф.
О.В. Тайлаков
«28» августа 2020 г.
м.п.

СПРАВКА
о практической значимости
«Методики оптимизации параметров геотехнологий проведения горных выработок с элементами автоматизации и роботизации»,
авторы к.т.н. Зиновьев В.В., Николаев П.И.

Рассмотрена «Методика оптимизации параметров геотехнологий проведения горных выработок с элементами автоматизации и роботизации», разработанная в ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» к.т.н. Зиновьевым В.В. и Николаевым П.И. Методика основана на совместном использовании имитационного моделирования для отображения взаимодействия горнопроходческого оборудования во времени и пространстве и генетического алгоритма для определения оптимального (или субоптимального) варианта комплектации горных машин, автоматизированных и роботизированных на разных уровнях. Предложена последовательность действий для определения и выбора рациональных параметров геотехнологии проведения горных выработок с использованием Системы имитационного моделирования технологий проходки (СИМТП), позволяющей провести оптимизационные эксперименты специалистам горной отрасли без погружения в суть имитационного моделирования и теорию оптимизации.

«Методика оптимизации параметров подземных проходческих геотехнологий с элементами автоматизации и роботизации» имеет высокую практическую значимость и весомое положительное влияние на эффективность и безопасность подземной разработки угольных месторождений при строительстве и эксплуатации шахт и рекомендуется к реализации на угледобывающих предприятиях и в проектных организациях.

Зав. отделом проектирования
горных производств АО «НЦ ВостНИИ»
к.т.н. Д.В. Ботвенко

Приложение В

УТВЕРЖДАЮ
Директор Кемеровского филиала
АО «ВНИМИ», к.т.н.
_____ П.В. Гречишкин
«18» сентября 2020 г.

СПРАВКА
о практической значимости
«Методики оптимизации параметров геотехнологий проведения горных выработок с элементами автоматизации и роботизации»,
авторы к.т.н. Зиновьев В.В., Николаев П.И.

Рассмотрена «Методика оптимизации параметров геотехнологий проведения горных выработок с элементами автоматизации и роботизации», разработанная в ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» к.т.н. Зиновьевым В.В. и Николаевым П.И. Методика основана на совместном использовании имитационного моделирования для отображения взаимодействия горнопроходческого оборудования во времени и пространстве и генетического алгоритма для определения оптимального (или субоптимального) варианта комплектации горных машин, автоматизации и роботизации на разных уровнях. Предложена последовательность действий для определения и выбора рациональных параметров геотехнологии проведения горных выработок с использованием Системы имитационного моделирования технологий проходки (СИМТП), позволяющей провести оптимизационные эксперименты специалистам горной отрасли без погружения в суть имитационного моделирования и теорию оптимизации.

«Методика оптимизации параметров геотехнологий проведения горных выработок с элементами автоматизации и роботизации» имеет высокую практическую значимость и в перспективе имеет весомое положительное влияние на эффективность и безопасность подземной разработки угольных месторождений; рекомендуется к применению при разработке и проектировании систем автоматизации и роботизации технологических процессов проведения горных выработок.

Приложение Г

РЕСУРС ММК-УГОЛЬ

ООО «ММК-УГОЛЬ»
Шахта «Чертинская - Коксовая»

СПРАВКА
о практическом использовании результатов диссертации
Николаева Петра Игоревича

Настоящей справкой подтверждается, что результаты диссертационной работы Николаева Петра Игоревича «Обоснование и разработка методики комплексной оптимизации параметров подземных проходческих геотехнологий с элементами автоматизации и роботизации» использованы ООО «ММК-УГОЛЬ» Шахта «Чертинская - Коксовая» при подготовке Паспорта на проведение вентиляционного штрека №557 от сбойки №15.21 в сторону западных бремсбергов вверх по простиранию пласта 5 под углом 4-6° с присечкой породы крепостью 3-4 по шкале проф. Протодьяконова. Способ проведения выработки – комбайновый. Сечение выработки вчерне 14,7 м², высота выработки – 3 м, ширина – 4,9 м. Крепление кровли и боков выработки осуществляется анкерами А20В длиной 1,8 и 2,8 м.

По результатам, разработанной в диссертационной работе «Системы имитационного моделирования технологий проходки» (СИМТП), обоснованы оптимальные параметры (табл. 1), а также определены показатели эффективности технологии проведения штрека (табл. 2).

Таблица 1. Оптимальные параметры проведения вентиляционного штрека №557 ш. «Чертинская-Коксовая»

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
$Q_{КУ}$ – производительность проходческого комбайна по углю, м³/мин.	2	$V_К$ – скорость перемещения проходческого комбайна по выработке, м/мин.	4	$C_{КР}$ – стоимость системы дистанционного управления проходческим комбайном, млн. руб.	3
$Q_{КП}$ – производительность проходческого комбайна по породе, м³/мин.	0,3	$N_К$ - число горнорабочих в забое, требующихся для управления комбайном	0	СК – стоимость забойного конвейера, млн. руб.	0,5
$Q_{КОНВ}$ – производительность забойного конвейера, т/мин.	5,8	$N_А$ - число горнорабочих, требующихся для крепления выработки анкерами	2	$C_А$ - стоимость анкероустановщика, млн. руб.	0,055
$T_А$ – время установки одного анкера, мин.	8	$C_К$ - стоимость проходческого комбайна, млн. руб.	30		

Таблица 2. Показатели эффективности проведения вентиляционного штрека №557 шахты «Чертинская-Коксовая»

Показатель эффективности	Значение
Среднее хронологическое число горнорабочих в забое	1,278
Скорость проходки, м/мес.	540
Стоимость проходки, руб./м³	1908

На основании обоснованных оптимальных параметров проведения вентиляционного штрека №557 даны рекомендации по выбору дистанционно управляемого проходческого комбайна КП21Д, скребкового конвейера СР-70-05, анкероустановщика MQT-120, типа «Рамбор». Использование вышеуказанных рекомендаций, снижает трудоемкость работ на 23% и повышает безопасность ведения проходческих работ за счет сокращения среднего хронологического числа горнорабочих в опасной зоне забоя на 44%.

Главный инженер
ООО «ММК-УГОЛЬ»
Шахта «Чертинская-Коксовая» подпись В.С. Горностаев

м.п.

Приложение Д

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020661781

Система имитационного моделирования технологий проходки

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ УУХ СО РАН) (RU)***

Авторы: ***Николаев Пётр Игоревич (RU), Зиновьев Василий Валентинович (RU), Стародубов Алексей Николаевич (RU), Кузнецов Игорь Сергеевич (RU), Крамаренко Виталий Александрович (RU)***

Заявка № **2020618637**

Дата поступления **06 августа 2020 г.**

Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ ***01 октября 2020 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев