

На правах рукописи



Кузнецов Игорь Сергеевич

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КАРЬЕРНЫХ
ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ
С УЧЕТОМ ВНЕПЛАНОВЫХ ПРОСТОЕВ**

Специальность: 05.05.06 – «Горные машины»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Кемерово 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ УУХ СО РАН) и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» (КузГТУ)

Научный руководитель: **Зиновьев Василий Валентинович**, кандидат технических наук, заместитель директора по научно-административной работе ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово

Официальные оппоненты: **Комиссаров Анатолий Павлович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Горные машины и комплексы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

Кузиев Дильшад Алишерович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Горного оборудования, транспорта и машиностроения» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита состоится «07» октября 2022 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28. Тел.: (3842) 68-23-23, e-mail: haa.omit@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2022/kuz/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета:



Непша Федор Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Объем угля, извлекаемый открытым способом, составляет 74% от всей добычи этого полезного ископаемого в Российской Федерации. Важной остается проблема повышения эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов (ЭАК), на которую влияют параметры горных машин, взаимодействующих во времени и пространстве, а также внеплановые простои (ВП), которые могут занимать до 57% рабочего времени, что приводит к временному прекращению работ и, как следствие, снижению производительности.

Степень разработанности. Обоснованию, моделированию и оптимизации ЭАК посвящены работы многих ученых, таких как: К.Н. Трубецкой, А.А. Кулешов, К.Ю. Анистратов, В.И. Суханов, В.В. Ржевский, А.А. Хорешок, А.С. Морин, Г.Д. Буялич, А.П. Комиссаров, Ю.А. Лагунова, Б.Л. Герике, Ю.Е. Воронов, В.С. Квагинидзе, А.Ю. Захаров, А.С. Фурман, А.Г. Журавлев, Д.А. Кузиев, О.Н. Вусейкова, А.Ю. Воронов, Д.В. Стенин, В.В. Макаров, Ю.В. Стенин, а также A. Krause, C. H. Ta, S. Alarie, C. Burt, M. M. Vemba, W. Cox, T. French, M. Reynolds, L. While и других.

Анализ исследований и разработок этих авторов позволил выявить следующее:

- недостаточно детально учитывается влияние причин и продолжительности простоев на эффективность работы ЭАК, что приводит к искаженным оценкам при выборе оптимальных параметров ЭАК;
- не в полной мере учитывается вероятностное взаимодействие экскаваторов и автосамосвалов во времени и пространстве, что не позволяет избежать ошибок в планировании организации работ и приводит к несоответствию расчетной (плановой) и фактической величин производительности ЭАК;
- отсутствует учет влияния на эксплуатационную производительность ЭАК возможных альтернативных вариантов комбинирования параметров горных машин, при этом возможный пропуск рационального варианта приводит к необоснованной трате ресурсов при ведении открытых горных работ;
- не решена задача многофакторной многокритериальной оптимизации параметров ЭАК с одновременным повышением производительности при минимизации стоимости работ.

В связи с этим работа, направленная на оптимизацию параметров карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов с учетом внеплановых простоев, исключая вышеприведенные недостатки, является актуальной.

Диссертация выполнена при финансовой поддержке РФФИ №19-37-90031 (2019-2021).

Целью работы является оптимизация параметров карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов с учетом внеплановых простоев для повышения эффективности открытых горных работ.

Идея работы заключается в совместном использовании эволюционного алгоритма и аналитико-имитационного моделирования технологических процессов для оптимизации параметров экскаваторно-автомобильного комплекса.

Объект исследования: экскаваторно-автомобильный комплекс для открытых горных работ.

Предмет исследования: параметры работы экскаваторно-автомобильного комплекса, зависящие от горнотехнических условий эксплуатации.

Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо решить взаимосвязанные задачи:

1. Разработать аналитико-имитационную модель функционирования ЭАК с учетом внеплановых простоев.
2. Определить степень влияния внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК.
3. Разработать программно-методическое обеспечение для определения оптимальных параметров ЭАК с учетом внеплановых простоев.

Методы исследований:

- анализ и обобщение литературных источников по проблематике исследований;
- методы математического моделирования, включая теорию массового обслуживания, дискретно-событийное имитационное моделирование, эвристическую многофакторную оптимизацию при построении и анализе оптимизационной модели ЭАК;
- методы математической статистики и теории вероятностей при анализе причин и продолжительности простоев оборудования ЭАК;
- пассивные методы экспериментальных исследований при мониторинге использования оборудования ЭАК;
- объектно-ориентированное программирование при анализе результатов оптимизированных параметров работы ЭАК.

Научные положения, выносимые на защиту:

- 1) Внеплановые простои, характеризующиеся периодичностью и продолжительностью, подчиняющимися гамма-распределению, уменьшают суточную добычу угля в забое по сравнению с плановой добычей в среднем на 17,2% при доверительной вероятности 95,0%.
- 2) Критерий оценки влияния внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК (K_i) позволяет выявлять наиболее значимые по периодичности возникновения и продолжительности внеплановые простои экскаваторов и автосамосвалов и учитывать их вклад при оптимизации параметров ЭАК.
- 3) Оптимальные параметры ЭАК определяются применением эволюционного алгоритма с оценкой эксплуатационной производительности ЭАК и удельных затрат на погрузку и транспортирование горной массы посредством аналитико-имитационного моделирования совместной работы экскаваторов и автосамосвалов с учетом их внеплановых простоев.

Научная новизна работы заключается в:

- разработке аналитико-имитационной модели функционирования ЭАК, отличающейся учетом в сети массового обслуживания (СеМО) задержек заявок в приборах обслуживания, равных величине внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов;

- разработке критерия оценки влияния внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов K_i , который является средним значением между коэффициентами детерминации периодичности возникновения простоя и его продолжительности;

- постановке и решении общей задачи многофакторной многокритериальной оптимизации параметров ЭАК с использованием программно-методического обеспечения, основанного на эволюционной оптимизации и аналитико-имитационном моделировании функционирования ЭАК с учетом динамики и вероятностной природы технологических процессов, а также внеплановых простоев.

Достоверность подтверждается применением апробированных классических методов аналитико-имитационного моделирования, теории вероятностей, математической статистики и оптимизации, планирования экспериментов; сходимостью результатов моделирования с фактическими показателями работы угольных разрезов Кузбасса для одних и тех же условий эксплуатации.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии неклассических методов эволюционной оптимизации параметров ЭАК с учётом влияния внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов посредством аналитико-имитационного моделирования технологических процессов.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенный подход, реализованный в виде программно-методического обеспечения для выбора оптимальных параметров ЭАК с учетом внеплановых простоев, может быть использован в организациях и институтах, занимающихся проектированием открытых горных работ, а также при обучении студентов горных специальностей.

Личный вклад автора заключается в:

- систематизации простоев экскаваторов и автосамосвалов с установлением законов их распределения;
- разработке аналитико-имитационной модели функционирования ЭАК с учетом внеплановых простоев горных машин в виде замкнутой сети массового обслуживания
- разработке критерия значимости влияния внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК;
- разработке программно-методического обеспечения для выбора оптимальных параметров ЭАК с учетом внеплановых простоев горных машин;
- проведении вычислительных экспериментов по оценке влияния учета внеплановых простоев карьерных экскаваторов и автосамосвалов на суточную эксплуатационную производительность ЭАК, с последующей оценкой эффективности мероприятий по их минимизации;
- определении оптимальных параметров ЭАК на примере условий угольного разреза ООО СП «Барзасское товарищество».

Реализация выводов и результатов работы: Созданы специализированные системы поддержки принятия решений: «Система имитационного моделирования для оптимизации параметров карьерных экскаваторно-

автомобильных комплексов с учетом вероятностных простоев» (свид-во № 2022619692 от 16.06.2022) и «Компьютерная система имитационного моделирования для исследования параметров безлюдной открыто-подземной геотехнологии» (свид-во № 2021663272 от 13.08.2021). Разработана «Методика оптимизации карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов с учетом внеплановых простоев», принятая к использованию Новационной фирмой «КУЗБАСС-НИИОГР» и рекомендованная к реализации в проектных организациях и на угольных разрезах.

Апробация работы: Основные результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на научно-практических конференциях: «Развитие» (г. Кемерово, 2017-2021 гг.); «Россия молодая» (г. Кемерово, 2018-2021 гг.); «Кузбасс: образование, наука, инновации» (г. Кемерово, 2017-2021 гг.); «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте» (г. Кемерово, 2018-2020 гг.); «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» «СИБРЕСУРС» (г. Кемерово, 2018 г.); «Имитационное моделирование. Теория и практика» (г. Екатеринбург, г. Санкт-Петербург 2019 г., 2021 г.); «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.).

Публикации: По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 4 – в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 1 – в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus. Получено 2 свидетельства о регистрации программы на ЭВМ.

Объем и структура диссертации: Диссертационная работа изложена на 169 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 116 наименований, содержит 68 рисунков, 60 формул, 30 таблиц и 6 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационного исследования, посвященного оптимизации параметров ЭАК с учетом ВП, определены цель и задачи для её достижения, сформулированы защищаемые положения, научная новизна работы и личный вклад автора, описаны теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе определено множество основных параметров ЭАК, используемых для определения эффективности его работы. С использованием элемента комбинаторики «сочетание» доказано, что количество возможных вариантов комплектации параметров ЭАК может достигать сотен тысяч, что значительно усложняет задачу выбора оптимального решения. При этом возможный пропуск рационального варианта приводит к необоснованной трате ресурсов при ведении открытых горных работ. Проведен анализ состояния и тенденций развития методов математического моделирования и оптимизации параметров карьерных ЭАК. Выявлены недостатки, которые приводят к искаженным оценкам при выборе оптимальных параметров ЭАК.

Во второй главе решена первая задача. Для ее решения *выполнена систематизация простоев экскаваторов и автосамосвалов* в виде многоуровневой схемы. Часть схемы, отображающая причины простоев автосамосвалов, представлена на рис. 1. Полная схема включает 151 причину простоев.

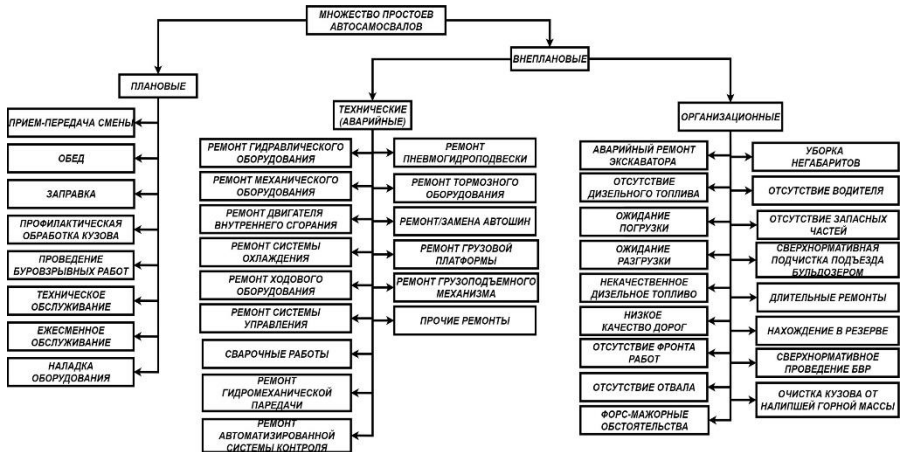


Рисунок 1– Причины простоев карьерных автосамосвалов

Идентифицированы законы распределения периодичности и продолжительности ВП с использованием методов статистического анализа. На рис. 2 в качестве примера представлена гистограмма и полигон наблюдаемых частот при идентификации закона распределения продолжительности вероятностного простоя по причине ремонта гидравлического оборудования автосамосвалов марки БелАЗ-7513, работающих на разрезе ООО СП «Барзасское товарищество».

Разработана концептуальная аналитико-имитационная модель функционирования ЭАК с учетом ВП. Разработаны математические модели основных процессов в виде систем массового обслуживания (СМО). Процессы «прибытие и установка автосамосвалов под погрузку/разгрузку» отображены СМО вида $g/g/m/N$, процесс «загрузка автосамосвалов экскаватором» – СМО вида $g/g/1/0$, а процесс «разгрузка автосамосвалов» – СМО вида $g/g/m/0$. Модели процессов объединены в единую сеть массового обслуживания (СеМО) вида $(g/g/m/N) \cup (g/g/1/0) \cup (g/g/m/N)$, структурная схема которой представлена на рис. 3.

В СеМО заявки представляют собой автосамосвалы различных типоразмеров. Приборами, обслуживающими эти заявки, являются забой, экскаваторы и пункты разгрузки. Продолжительность обслуживания заявок в каждом приборе зависит от горнотехнических условий эксплуатации, физико-механических свойств горных пород и параметров экскаваторов и автосамосвалов.

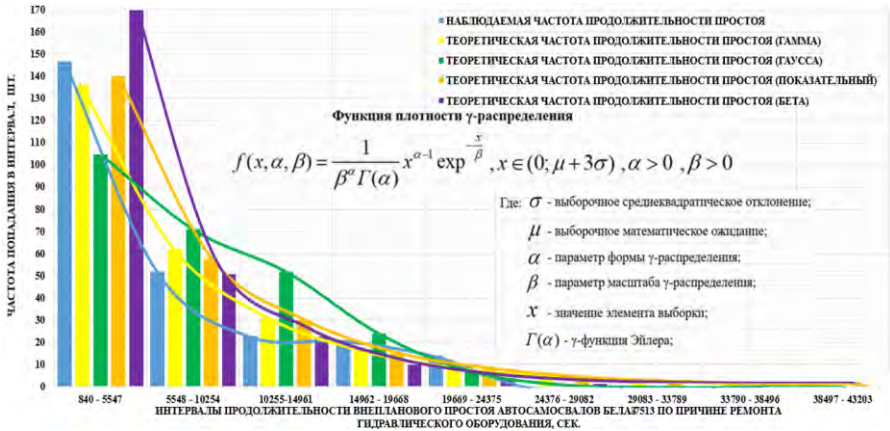


Рисунок 2 – Гистограмма и полигон наблюдаемых частот при идентификации закона распределения продолжительности ВП по причине ремонта гидравлического оборудования автосамосвалов

Продолжительность задержки заявок в забое отображена в виде функции:

$$t_{\text{ман.заб.}} = f(n_i) \quad (1)$$

где n_i – тип принятой схемы выполнения маневровых работ (тупиковая, сквозная, петлевая с разворотом).

Продолжительность задержки заявок в приборах, отображающих экскаваторы, представлена в виде функции:

$$t_{\text{позр.}} = f(E_{\text{экс.}}, d_{\text{фр.}}, k_{\text{нк}}, q_{\text{мах}}, k_{qAC}, k_p, N_k, C_k, \beta, \rho) \quad (2)$$

где $E_{\text{экс.}}$ – вместимость ковша экскаватора, [м³]; $d_{\text{фр.}}$ – средний размер взорванной горной породы, [м]; $k_{\text{нк}}$ – коэффициент наполнения ковша экскаватора; $q_{\text{мах}}$ – грузоподъемность автосамосвала, [тонн]; k_{qAC} – коэффициент использования грузоподъемности автосамосвала; k_p – коэффициент разрыхления горных пород; N_k – число ковшей, разгружаемых экскаватором в кузов автосамосвала, [шт.]; C_k – соотношение линейных размеров ковша и наибольшего размера самого крупного куска взорванной горной породы; β – угол поворота экскаватора, [град.]; ρ – плотность горных пород, [т/м³].

Продолжительность задержки заявок в пунктах разгрузки представлена в виде функций:

$$t_{\text{ман.разг.}} = f(r_{AC}, R_{\text{ман.разг.}}, L_{\text{ман.}}, l_{ac}, L_{\text{ос.дор.}}, V_{\text{ср.разг.}}) \quad (3)$$

где r_{AC} – минимальный радиус поворота автосамосвала, [м]; $R_{\text{ман.разг.}}$ – радиус поворота автосамосвала при выполнении маневровых операций на разгрузку, [м]; $L_{\text{ман.}}$ – длина маневрового пути при выполнении маневровых операций на разгрузку, [м]; l_{ac} – длина автосамосвала, [м]; $L_{\text{ос.дор.}}$ – расстояние между осевыми линиями дорог, [м]; $V_{\text{ср.разг.}}$ – скорость маневрирования карьерных автосамосвалов в пунктах разгрузки, [м/с],

$$t_{раз.} = f(t_{под.куз.}, t_{опуск.куз.}) \quad (4)$$

где $t_{под.куз.}$ – время подъема кузова автосамосвала, [сек]; $t_{опуск.куз.}$ – время опускания кузова автосамосвала, [сек].

Для учета ВП экскаваторов и автосамосвалов в СеМО веден дополнительный источник, генерирующий заявки через вероятностные интервалы времени. При генерации эти заявки задерживают заявки-автосамосвалы на время их простоя, а также закрывают своеобразные клапаны () и ограничивают доступ заявок-автосамосвалов к обслуживающим устройствам. Условия открытия ($K = 1$) и закрытия ($K = 0$) клапанов:

$$K = 1, \text{ при } \begin{cases} m_{св.} < m \\ D_{экс.} = 1 \end{cases}, \quad (5)$$

$$K = 0, \text{ при } \begin{cases} m_{св.} = 0 \\ D_{экс.} = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

где $D_{экс.}$ – доступность экскаватора (1 – доступен; 0 – не доступен); $m_{св.}$ – количество свободных мест у экскаватора до и после погрузки автосамосвалов, находящиеся в интервале $0 \leq m_{св.} \leq m$, m – количество каналов многоканального устройства «Забой», [шт.].

Эксплуатационная производительность ЭАК определяется интенсивностью выходного потока в СеМО, а удельные затраты на погрузку и транспортирование горных пород – количеством и типом заявок во входном потоке, а также количеством и типом приборов обслуживания. СеМО является замкнутой с ограниченным количеством заявок, соответствующим количеству автосамосвалов.

Путем программной реализации СеМО посредством языка имитационного моделирования GPSS World, разработана аналитико-имитационная модель с учетом ВП, состоящая из 7 сегментов: 1. Прибытие автосамосвалов и присвоение им значений параметров; 2. Работа экскаваторов и автосамосвалов в забое; 3. Транспортирование горных пород в пункт разгрузки и возвращение автосамосвалов к экскаватору; 4. Работа автосамосвалов в пунктах разгрузки; 5. Простой экскаваторов и их продолжительность; 6. Простой автосамосвалов и их продолжительность; 7. Расчет объема взорванных горных пород. В такой модели заявки СеМО соответствуют динамическим элементам – транзактам имитационной модели, которые двигаются от блока к блоку и задерживаясь в них, отображают технологические процессы ЭАК.

Продолжительность задержки транзактов в блоках, устанавливается путем ввода гамма распределения с соответствующими параметрами, полученными по хронометражным данным. В случае отсутствия хронометража продолжительность определяется по известным аналитическим формулам. Для примера, на рис.4 представлена часть аналитико-имитационной модели, отображающая работу автосамосвалов в пунктах разгрузки.

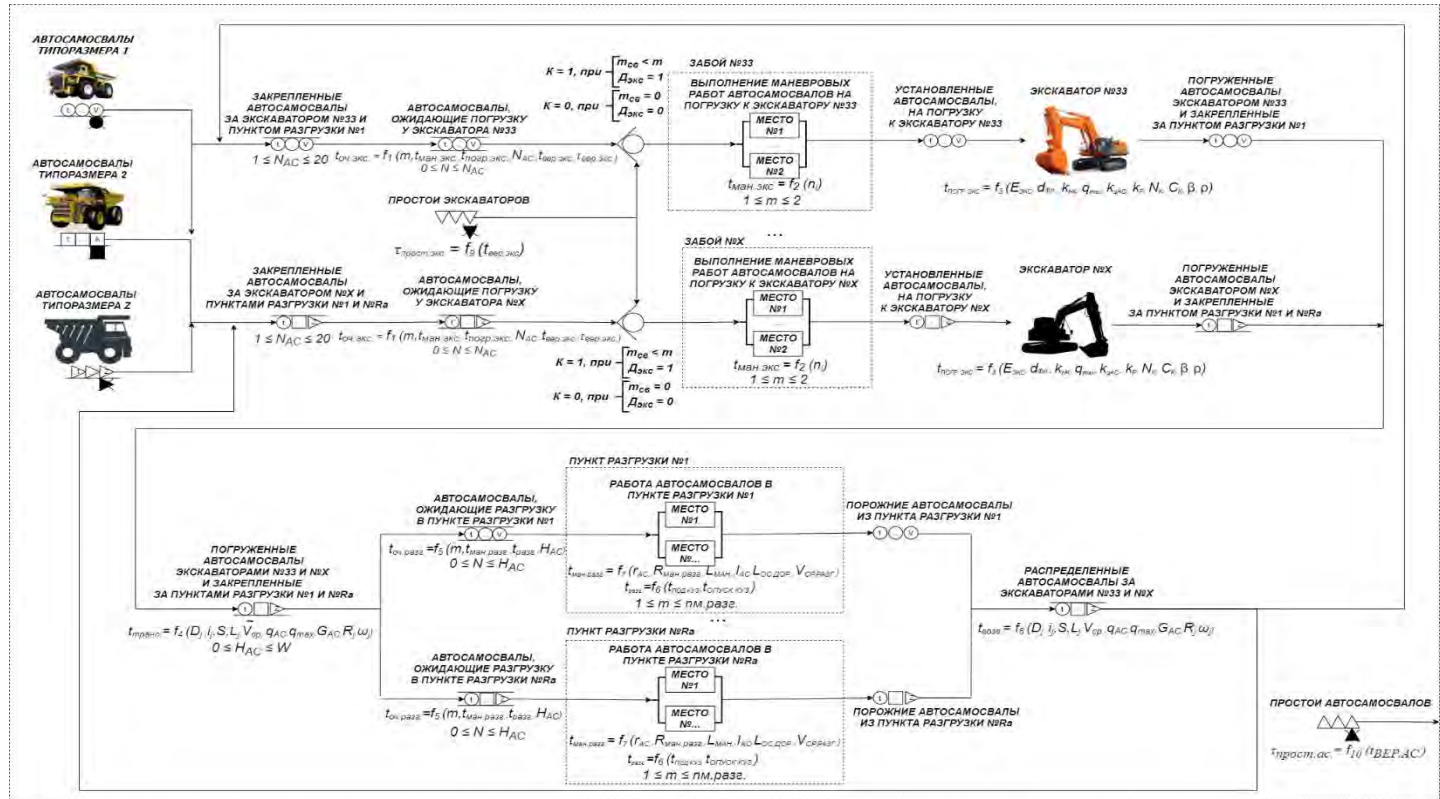


Рисунок 3 – Структурная схема модели взаимодействия экскаваторов и автосамосвалов в виде СеМО

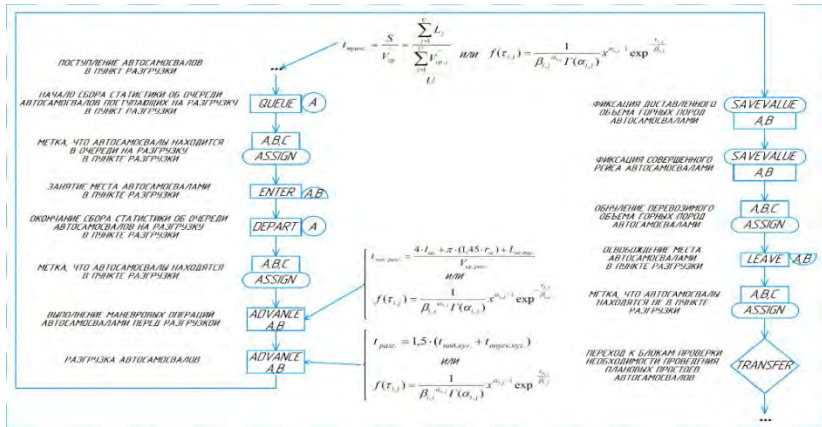


Рисунок 4 – Сегмент 4. Работа автосамосвалов в пунктах разгрузки

Математическое ожидание интервалов поступления автосамосвалов в пункт разгрузки ($\mu_{trans.}$) определяется как среднее время транспортирования горных пород от забоя в пункт разгрузки ($t_{trans.}$) по формуле:

$$t_{trans.} = \frac{S}{V_{cp.}} = \frac{\sum_{j=1}^U L_j}{\sum_{j=1}^U \tilde{V}_{cp.j}}, \quad (7)$$

где S – дальность транспортирования, [м]; L_j – длина j -ого участка трассы, [м]; $\tilde{V}_{cp.}$ – средняя техническая скорость движения автосамосвалов, [м/с]; $\tilde{V}_{cp.j}$ – средняя техническая скорость движения автосамосвалов, на j -ом участке трассы, [м/с]; U – количество участков трассы (забойный, карьерный, траншейный, отвальный).

Математическое ожидание продолжительности выполнения маневровых операций автосамосвалами перед разгрузкой ($\mu_{ман.разг.}$) определяется по формуле:

$$t_{ман.разг.} = \frac{4 \cdot l_{ac.} + \pi \cdot (1,45 \cdot r_{ac.}) + L_{ос.дор.}}{V_{cp.разг.}}, \quad (8)$$

а продолжительность разгрузки ($\mu_{разг.}$)

$$t_{разг.} = 1,5 \cdot (t_{под.куз.} + t_{опуск.куз.}), \quad (9)$$

где $r_{ac.}$ – минимальный радиус поворота автосамосвала, [м]; $L_{ман.}$ – длина маневрового пути при выполнении маневровых операций на разгрузку, [м]; $l_{ac.}$ – длина автосамосвала, [м]; $L_{ос.дор.}$ – расстояние между осевыми линиями дорог, [м]; $V_{cp.разг.}$ – скорость маневрирования карьерных автосамосвалов в пунктах разгрузки, [м/с]; $t_{под.куз.}$ – время подъема кузова автосамосвала, [сек]; $t_{опуск.куз.}$ – время опускания кузова автосамосвала, [сек].

Значение среднеквадратического отклонения интервалов поступления автосамосвалов в пункт разгрузки, а также продолжительность маневровых операций перед разгрузкой и сама разгрузка (σ_i) определяются согласно правилу 3-х сигм по формуле:

$$\sigma_i = \frac{t_i}{3}, \quad (10)$$

где i – тип операции (транспортирование, маневрирование).

Оценена адекватность аналитико-имитационной модели, которая проводилась путем сравнения данных диспетчерских отчетов автоколонны по прошлому периоду с результатами моделирования для одних и тех же условий эксплуатации. В результате расхождение не превысило 10,0%.

Проведена оценка степени влияния ВП на добычу из забоя угольного разреза. Для примера, на рис.5 представлены результаты одного из вычислительных экспериментов по оценке суточного объема добычи забоя с учетом различных видов простоев. Имитировалась работа одного ЭАК, действующего в условиях угольного разреза ООО «СП Барзасское товарищество».

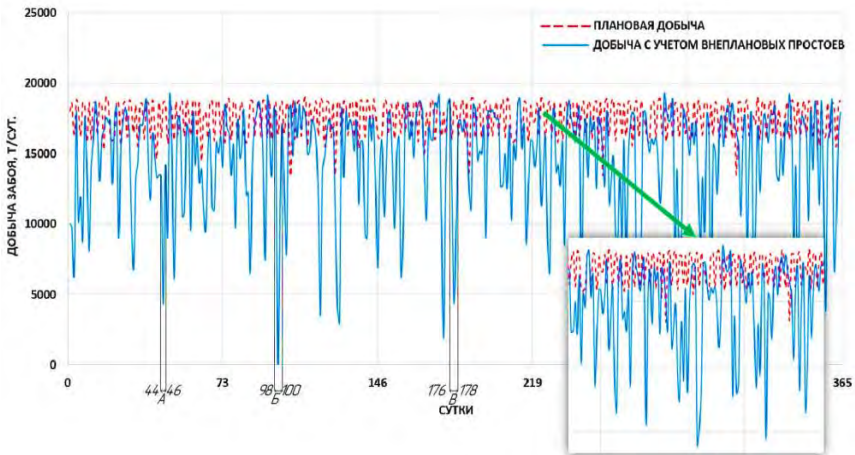


Рисунок 5 – Динамика суточной добычи забоя с учетом простоев

Пунктирная линия отображает плановую добычу забоя, сплошная – добычу с учетом ВП технического и организационного характера. Видно, что плановая добыча отличается от добычи с учетом ВП, где возникают «периоды провалов добычи». Так, в период (А), в течение 44-46 суток происходили простои, связанные с заменой гидроцилиндра подъема стрелы и гидромотора экскаватора, протяжкой колес автосамосвалов, ремонтом их пневмогидроподвески (ПП), охлаждением и ремонтом гидросистемы у автосамосвалов. В период (Б), 98-100 суток проводились ремонт двигателя внутреннего сгорания (ДВС), замена рукава высокого давления (РВД), ремонт гидравлической части экскаватора, подкачка колеса, ремонт гидросистемы, ходовой ча-

сти и системы управления автосамосвалов и т.д. Аналогичным образом проведены вычислительные эксперименты по пяти разрезам Кузбасса.

В третьей главе представлено решение второй задачи. *Выполнена оценка степени влияния предложений по минимизации ВП горных машин на эксплуатационную производительность ЭАК.* В качестве примера использования аналитико-имитационной модели для минимизации простоев экскаватора и автосамосвалов в условиях угольного разреза ООО «СП Барзасское товарищество» организована работа экскаватора в подготовленных забоях на два подъезда с удовлетворительным состоянием подъездных и забойных автодорог (рис.6).

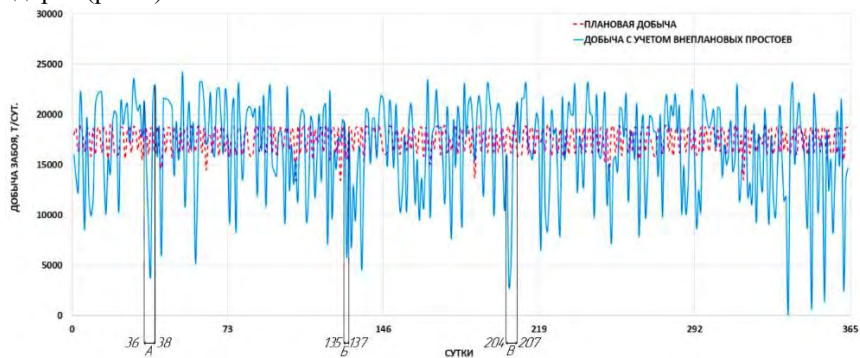


Рисунок 6 – Динамика добычи забоя с учетом различных видов простоев (организация работы экскаватора на два подъезда)

Установлено, что организация работы экскаватора на два подъезда не только уменьшит отклонение плановой добычи забоя от добычи с учетом ВП на 11,7%, но и увеличит добычу забоя в среднем на 5,4%.

Исследован характер влияния периодичности и продолжительности ВП на эксплуатационную производительность ЭАК. На примере условий ООО СП «Барзасское товарищество» с ЭАК, включающим экскаватор HitachiEX-1900 с ковшом вместимостью 11 м³ и четыре автосамосвала марки БелАЗ-7513 грузоподъемностью 130 тонн, установлен ряд зависимостей. Например, на рис. 7 видно, что увеличение периодичности ВП экскаватора по причине ремонта гидравлического оборудования в интервале от 340 до 936 часов, увеличивает эксплуатационную производительность ЭАК на 1,61-4,36%, при постоянных продолжительностях между 7,86 и 25,94 часов соответственно.

Разработан критерий оценки влияния периодичности и продолжительности ВП на эксплуатационную производительность ЭАК. Одним из наиболее распространенных и проработанных формализмов выявления степени влияния факторов на отклик в моделях, учитывающих вероятностные процессы, является дисперсионный анализ. Так как ВП характеризуется периодичностью его возникновения и продолжительностью, применен двухфакторный дисперсионный анализ.

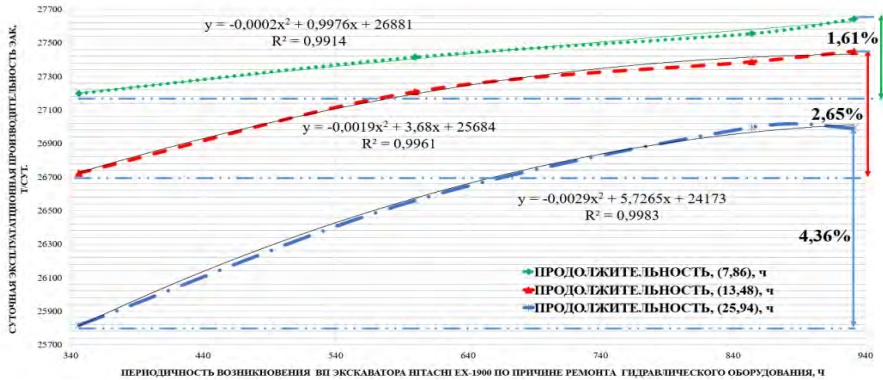


Рисунок 7 – Ремонт гидравлического оборудования экскаватора Hitachi EX-1900 (периодичность)

При этом принято, что фактор A_i – математическое ожидание продолжительности i -го вероятностного простоя, [сек]; фактор B_j – математическое ожидание периодичности возникновения j -го вероятностного простоя; отклик Y_{ij} – суточная эксплуатационная производительность ЭАК [т/сут.]. Выборочный коэффициент детерминации каждого из факторов, показывающий степень его влияния, определялся по формуле:

$$\tilde{\rho}_k^2 = \frac{\tilde{\sigma}_k^2}{\tilde{\sigma}_Y^2}, \quad (11)$$

где $\tilde{\sigma}_k^2$ – дисперсия групповых средних по k -ому фактору; $\tilde{\sigma}_Y^2$ – общая выборочная дисперсия. Для расчета значимости влияния вероятностного простоя на эксплуатационную производительность ЭАК предложен критерий:

$$K_i = \frac{\tilde{\rho}_A^2 + \tilde{\rho}_B^2}{2}, \quad (12)$$

где $\tilde{\rho}_A^2$ – выборочный коэффициент детерминации фактора – продолжительность простоя, $\tilde{\rho}_B^2$ – выборочный коэффициент детерминации фактора – периодичность простоя при следующих ограничениях: $\tilde{\rho}_A^2 \neq 0$; $\tilde{\rho}_B^2 \neq 0$.

Выполнено ранжирование степени влияния ВП на эксплуатационную производительность ЭАК для условий угольного разреза ООО СП «Барзасское товарищество». С использованием разработанного критерия (формула (12)) установлено, что наибольшее влияние оказывают ВП по причине отсутствия автосамосвалов ($K_i = 47,22\%$), а наименьшее – ожидания погрузки ($K_i = 28,20\%$). Учет только наиболее значимых ВП на основе критерия, определяемого посредством двухфакторного дисперсионного анализа с повторениями, позволит упростить процесс оптимизации параметров горных машин за счет исключения множества простоев, оказывающих меньшее влияние на эксплуатационную производительность ЭАК.

В четвертой главе представлено решение третьей задачи. Для этого *определены целевые функции и ограничения оптимизации параметров ЭАК с учетом ВП*. При выборе параметров ЭАК с одновременным учетом технологического (эксплуатационная производительность) и экономического (удельные затраты на транспортирование и погрузку горных пород) показателей эффективности, возникает противоречие: производительность необходимо максимизировать, а затраты минимизировать. При этом необходимо учитывать весомость каждого из показателей эффективности в зависимости от требований исследователя. Таким образом, возникает задача многокритериальной оптимизации.

Для решения данной задачи предложен комплексный критерий оптимизации показателей эффективности ЭАК, основанный на методе свертки, а именно – мультипликативной в агрегированном виде

$$F = \frac{Q_{\text{эак}}^{\alpha}}{C^{\beta}} \rightarrow \max \quad (13)$$

где $Q_{\text{эак}}$ – суточная эксплуатационная производительность ЭАК, [т/сут.]; C – удельные затраты на погрузку и транспортирование горных пород, [руб./т.]; α – весовой коэффициент эксплуатационной производительности; β – весовой коэффициент удельных затрат на погрузку и транспортирование горных пород. При следующих ограничениях: $\alpha + \beta = 1$; $\alpha \in (0;1)$; $\beta \in (0;1)$; $C \neq 0$; $h_{\text{пен.}} \leq 1,5 H_{\text{ч. max}}$; $V_{\text{max}} \leq 30$; $h_{\text{пен.}}$ – высота уступа, [м]; $H_{\text{ч. max}}$ – максимальная высота черпания экскаватора, [м]; V_{max} – максимально допустимая средняя техническая скорость движения автосамосвалов на участках трассы, [км/ч]; (в соответствии с требованиями техники безопасности); $3 \leq N_k \leq 10$; N_k – число ковшей, разгружаемых экскаватором в кузов автосамосвала, [шт.]; $45 \leq q_{\text{max}} \leq 130$ (добыча); $30 \leq q_{\text{max}} \leq 450$ (вскрыша); $1 \leq N_{\text{ак}} \leq 20$; $N_{\text{ак}}$ – количество автосамосвалов, закрепленных за экскаватором, [шт.]; $5 \leq E_{\text{экс}} \leq 11$ (добыча); $5 \leq E_{\text{экс}} \leq 35$ (вскрыша); $E_{\text{экс}}$ – вместимость ковша экскаватора, [м³].

Эксплуатационная производительность ЭАК определяется с использованием аналитико-имитационной модели. Удельные затраты на погрузку и транспортирование горных пород:

$$C = C_{\text{ногр.}} + \sum_{i=1}^N \frac{C_{\text{трансп.}}}{N}, \quad (14)$$

где: $C_{\text{ногр.}}$ – удельные затраты на погрузку горных пород экскаватором в автосамосвалы, [руб./т.]; $C_{\text{трансп.}}$ – удельные затраты на транспортирование горных пород автосамосвалами, [руб./т.], N – количество автосамосвалов, [шт.].

Целевые функции (15), (16) включают в себя 38 параметров, из которых 9 параметров являются факторами оптимизации:

$$Q_{\text{ЭАК}} = f_1(R_{\text{gt}}, R_{\text{fm}}, R_{\text{gm}}, R_{\text{ЕАК}}) \rightarrow \max, \quad (15)$$

$$C = f_2(R_{\text{gm}}, R_{\text{gt}}, R_{\text{ЕАК}}) \rightarrow \min, \quad (16)$$

где R_{gt} – множество параметров горнотехнических условий эксплуатации; R_{fm} – множество параметров физико-механических свойств горных пород;

R_{gm} – множество параметров горных машин; R_{EAK} – множество параметров ЭАК.

Характер целевой функции в сложной аналитико-имитационной модели ЭАК, в которой есть обратные связи и разнородные заявки, позволяет говорить о неприменимости точных методов решения оптимизационных задач. Численные методы на основе алгоритмов эвристического класса позволяют найти оптимальные параметры систем за кратчайшее время с высокой точностью, при этом нет необходимости в полном исследовании области допустимых значений и аналитическом описании целевой функции. Произведена адаптация генетического алгоритма оптимизации, который включает в себя пять шагов (рис. 8).

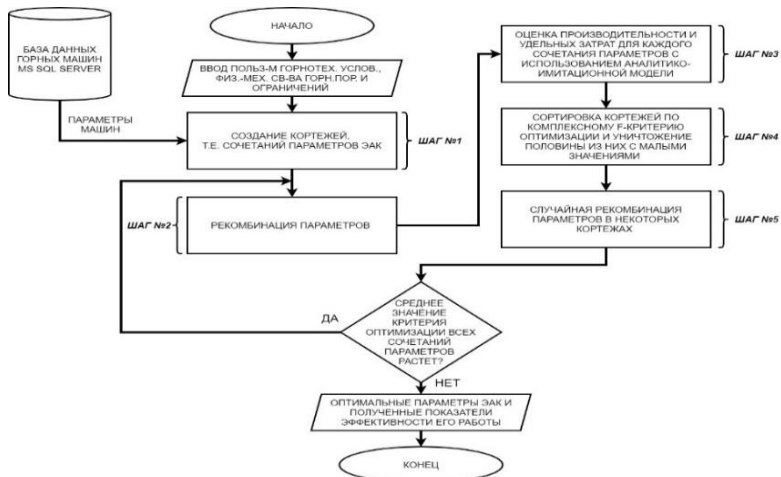


Рисунок 8 – Оптимизация параметров ЭАК посредством эволюционного алгоритма

На первом шаге, создаётся крупное число так называемых кортежей, т.е. сочетаний параметров ЭАК. Затем происходит рекомбинация параметров. Число кортежей увеличивается в 2 раза, при этом новые кортежи генерируются как сочетание параметров уже существующих. На третьем шаге для каждого сочетания параметров происходит оценка производительности с использованием аналитико-имитационной модели и удельных затрат. На четвёртом шаге все кортежи сортируются по значению комплексного мультипликативного критерия оптимизации в агрегированном виде. Половина из них, обладающих наименьшими значениями критерия, удаляется. На пятом шаге в некоторых кортежах происходит рекомбинация параметров: некоторым параметрам случайным образом присваиваются новые значения. Затем шаги 2-5 повторяются до тех пор, пока среднее значение критерия оптимизации всех сочетаний параметров не перестанет расти.

Разработано программно-методическое обеспечение для определения оптимальных параметров ЭАК с учетом ВП на основе аналитико-имитационной модели, структурная схема которого представлена на рис. 9.

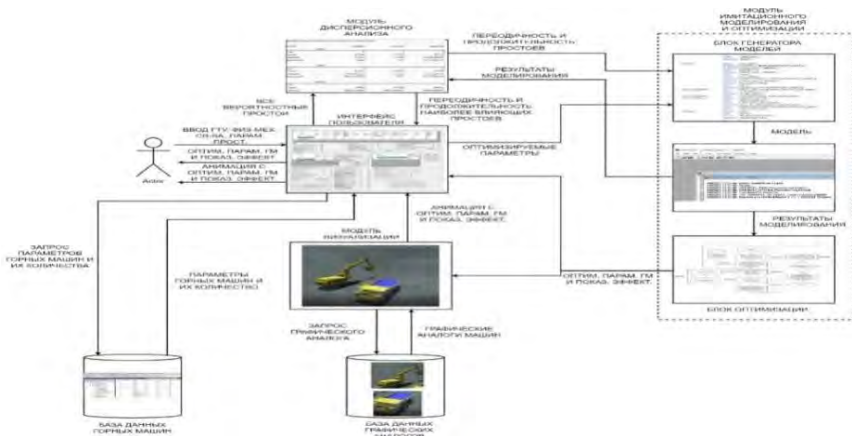


Рисунок 9 – Структурная схема программно-методического обеспечения оптимизации параметров ЭАК

Программно-методическое обеспечение включает в себя модули: дисперсионного анализа для оценки степени влияния вероятностных простоев на производительность; имитационного моделирования и оптимизации для оценки вариантов сочетаний параметров и выбора эффективного решения; визуализации для вывода результатов моделирования вместе с анимацией работы ЭАК, а также интерфейс пользователя для интерактивного взаимодействия.

Определены оптимальные параметры ЭАК на примере условий угольного разреза ООО СП «Барзасское товарищество» и сформулированы рекомендации по использованию экскаватора и автосамосвалов (табл. 2).

Согласно данным, полученным с диспетчерских отчетов автоколонн разреза ООО СП «Барзасское товарищество», при использовании на вскрышном забое №44 девяти автосамосвалов грузоподъемностью 130 тонн, закрепленных за экскаватором ЭКГ-10, а также двенадцати автосамосвалов грузоподъемностью 130 тонн во вскрышном забое №32, закрепленных за экскаватором Hitachi EX-1900, суммарная суточная производительность с двух забоев составит 96,09 тыс.т/сут. при удельных затратах на погрузку и транспортирование горной породы 10,88 руб./т. Значение критерия эффективности составляет 2,97.

Применение рекомендуемых значений параметров позволит увеличить суточную эксплуатационную производительность на 41,8%, при этом сократить удельные затраты на погрузку и транспортирование горных пород на 10,7%. Значение критерия эффективности ЭАК повыситься на 39,1%.

Таблица 2 – Результаты экспериментов поиска оптимальных параметров с учетом ВП горных машин

Параметр	Значение	
	Вскрышной забой №44	Вскрышной забой №32
Вместимость ковша, [м ³]	27	27
Максимальный радиус черпания, [м]	20,9	21,78
Максимальная высота черпания, [м]	20,6	15,56
Максимальная высота разгрузки, [м]	13,1	9,2
Пример модели экскаватора	Hitachi-EX-5500	Caterpillar 7295
Грузоподъёмность автосамосвала, [тонн] (количество, [шт.])	90 - 91 (5), 130 - 136 (3)	130 - 156,9 (5), 180 - 181 (2), 221 - 240 (3)
Габаритные размеры автосамосвала, [м] (длина/ширина/высота)	9,78 / 5,89 / 5,12 - 11,5 / 7 / 5,90	11,37 / 6,89 / 5,85 - 14,15 / 8,45 / 6,88
Вес тары, [тонн]	70 - 113	100 - 164
Минимальный радиус поворота автосамосвала, [м]	10 - 16,6	12 - 15,1
Пример модели автосамосвала	БелАЗ-7557, БелАЗ-7513, Caterpillar 777D, Hitachi EH 1600,	Hitachi EH 3000, БелАЗ-7518, БелАЗ-7531, БелАЗ-7513
Показатели эффективности		
$Q_{\text{зак}}$, [тыс.т./сут.]	165,49	
C , [руб./т.]	9,72	
F	4,13	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи выбора оптимальных параметров экскаваторно-автомобильных комплексов с учетом внеплановых простоев горных машин, обеспечивающее повышение эффективности открытых горных работ, что имеет существенное значение для развития угольной отрасли Российской Федерации.

В диссертации решены взаимосвязанные задачи:

1) Результатом решения задачи – «Разработать аналитико-имитационную модель функционирования ЭАК с учетом внеплановых простоев» является:

- Произведена систематизация простоев экскаваторов и автосамосвалов на плановые и внеплановые. Установлено, что периодичность и продолжитель-

ность ВП экскаваторов и автосамосвалов соответствует гамма-распределению с ограниченной правосторонней областью.

- Разработана концептуальная модель функционирования ЭАК с применением теории массового обслуживания и выполнена ее программная реализация с помощью языка имитационного моделирования GPSS World, что позволяет оценивать суточную производительность ЭАК и удельные затраты на погрузку и транспортирование горной массы с учетом ВП экскаваторов и автосамосвалов. Максимальная погрешность выходных модельных данных по сравнению с данными диспетчерских отчетов не превышает критического значения в 10%.

- Установлено, что расхождение суточной плановой добычи с добычей при учете ВП составляет в среднем 17,2% при доверительной вероятности 95,0%.

2) Результатом решения задачи – «Определить степень влияния внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК» на примере условий угольного разреза ООО «СП Барзасское товарищество» является:

- Установлено, что организация работы экскаватора на два подъезда с учетом ВП позволит повысить добычу из забоя на 5,43%.

- Установлено, что увеличение продолжительности ВП экскаватора по причине ремонта гидравлического оборудования в интервале от 7 до 26 часов, линейно снижает эксплуатационную производительность ЭАК на 2,36-5,08%, при постоянных периодичностях между 346 и 931 часов соответственно. Увеличение периодичности ВП экскаватора по причине ремонта гидравлического оборудования в интервале от 340 до 936 часов, увеличивает эксплуатационную производительность ЭАК на 1,61-4,36%, при постоянных продолжительностях между 7,86 и 25,94 часов соответственно. Увеличение продолжительности ВП автосамосвалов по причине ремонта ДВС в интервале от 3 до 392 часов, линейно снижает эксплуатационную производительность ЭАК на 0,79-25,61%, при постоянных периодичностях между 1623,3 и 19265,6 часов соответственно. Увеличение периодичности ВП автосамосвалов по причине ремонта ДВС в интервале от 1623 до 19295 часов, увеличивает эксплуатационную производительность ЭАК на 0,24-19,95%, при постоянных продолжительностях между 3,4 и 392,4 часов соответственно.

- Разработан критерий оценки влияния ВП на эксплуатационную производительность ЭАК (K_i), который определяется как среднее арифметическое между коэффициентами детерминации факторов периодичности и продолжительности внепланового простоя.

- Произведено ранжирование внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов с использованием разработанного критерия K_i для условий угольного разреза ООО СП «Барзасское товарищество»: отсутствие автосамосвалов ($K_i \approx 47,22\%$); ремонт рабочего оборудования экскаватора ($K_i \approx 46,23\%$); ремонт гидравлического оборудования экскаватора ($K_i \approx 45,80\%$); ремонт ходового и механического оборудования экскаватора ($K_i \approx 43,98\%$); ремонт электрооборудования экскаватора ($K_i \approx 41,91\%$); ремонт/замена автошин ($K_i \approx 39,23\%$); ремонт системы управления автосамосвала ($K_i \approx$

38,66%); ремонт электрооборудования автосамосвала ($K_i \approx 34,48\%$); ремонт двигателя внутреннего сгорания ($K_i \approx 30,58\%$); ремонт гидросистемы автосамосвала ($K_i \approx 29,90\%$); ожидание погрузки ($K_i \approx 28,20\%$).

3) Результатом решения задачи – «Разработать программно-методическое обеспечение для определения оптимальных параметров ЭАК с учетом внеплановых простоев» является:

- Определены целевые функции оптимизации параметров ЭАК, которые устанавливают связь между входными параметрами: 27 параметров горно-технических условий (множество R_{gt}), 2 параметра физико-механических свойств горных пород (множество R_{fm}), 8 параметров горных машин (множество R_{gm}), 1 параметр ЭАК (множество R_{EAK}) и откликом: эксплуатационной производительностью ($Q_{ЭАК}$), удельными затратами на погрузку и транспортирование горной массы (C).

- Разработано программно-методическое обеспечение, позволяющее оценивать эксплуатационную производительность ЭАК, а также удельные затраты на погрузку и транспортирование горной массы и выбирать оптимальные параметры ЭАК посредством имитационного моделирования совместной работы горных машин с учетом их ВП.

- Определены оптимальные параметры ЭАК для условий угольного разреза ООО «СП Барзасское товарищество», позволяющие повысить суточную эксплуатационную производительность ЭАК на 41,8%, а также сократить затраты на погрузку и транспортирование горных пород на 10,7%, и повысить значение критерия оптимизации на 39,1%. Сформированы рекомендации по использованию горных машин для забоя №44: экскаватор Hitachi EX-5500, автосамосвалы БелАЗ-7557 или Caterpillar-777D и БелАЗ-7513 или Caterpillar-785D; для забоя №32: экскаватор Caterpillar 7295, автосамосвалы БелАЗ-7513 или Hitachi EH 3000, БелАЗ-7518 и БелАЗ-7531 или Komatsu HD-830E.

Направление дальнейших исследований заключается в:

- 1) Расширении функционала программно-методического обеспечения для повышения эффективности выбора оптимальных параметров ЭАК за счет учета параметров буровзрывных работ, а также показателей надежности горных машин, изменяющихся в зависимости от условий их эксплуатации и срока службы.

- 2) Исследовании и оптимизации параметров ЭАК при автоматизации и роботизации горных машин, в том числе при совместной работе ЭАК и комплекса глубокой разработки пластов (КТРП) при добыче угля открыто-подземным способом.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

- 1) Кузнецов, И. С. Исследование влияния внеплановых простоев горных машин на добычу угля открыто-подземным способом методом имитационного моделирования / И. С. Кузнецов, В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов // Уголь. – 2020. - №9. – С. 10-13.

2) **Кузнецов, И. С.** Компьютерная система имитационного моделирования для оптимизации параметров экскаваторно-автомобильных комплексов / **И. С. Кузнецов**, В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов // ГИАБ. – 2022. – № 6-1. – С. 304-316.

3) Зиновьев, В.В. Исследование человеко-машинного управления автосамосвалами в составе экскаваторно-автомобильного комплекса применением имитационного моделирования / В.В. Зиновьев, **И.С. Кузнецов**, А.Н. Стародубов // Уголь. – 2021. – №7. – С. 9-12.

4) **Кузнецов, И. С.** Повышение точности и достоверности идентификации законов распределения хронометражных данных при моделировании экскаваторно-автомобильного комплекса / **И. С. Кузнецов**, В. В. Зиновьев, А. В. Кузнецова // Вестник КузГТУ. – 2021. – №3. – С. 113-119.

Публикации, индексируемые в международной базе Scopus:

5) **Kuznetsov, I. S.** Minimization of coal mining machines downtime in coal mining by opened-underground mining method on simulating model / **I. S. Kuznetsov**, V. V. Sinoviev, A. N. Starodubov // E3S Web of Conferences 174, 01049 (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017401049> Vth International Innovative Mining Symposium. – pp. 1-7.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

6) Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661173 «Система имитационного моделирования для оптимизации параметров карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов с учетом внеплановых простоев» / **И.С. Кузнецов** и др.; правообладатель ФИЦ УУХ СО РАН. – заявка № 2022619692, заявл. 31.05.2022; зарегистр. 16.06.2022. – 1 с.

7) Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021663272 «Компьютерная система имитационного моделирования для исследования параметров безлюдной открыто-подземной геотехнологии» / **И.С. Кузнецов** и др.; правообладатель ФИЦ УУХ СО РАН. – заявка № 2021662261, заявл. 06.08.2021; зарегистр. 13.08.2021. – 1 с.

Публикации в прочих научных изданиях:

8) **Кузнецов, И. С.** Имитационная модель открытых горных работ / **И. С. Кузнецов** // IX Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых с международным участием «Россия молодая». – Кемерово: КузГТУ, 2017. – С. 0403004.1-0403004.5.

9) **Кузнецов, И.С.** Дискретно-стохастическая модель пространственно-временного взаимодействия элементов систем угледобычи открытым способом / **И. С. Кузнецов** // II Международная научно-практическая конференция «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте». – Кемерово: КузГТУ, 2018. – С. 111-113.

10) **Кузнецов, И. С.** Анимационное представление работ экскаваторно-автомобильного комплекса / **И.С. Кузнецов**, В.А. Крамаренко // XI Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых с международным участием «Россия молодая». – Кемерово: КузГТУ, 2019. – С. 30109.1-30109.6.

11) **Кузнецов, И. С.** Исследование влияния простоев горных машин на добычу угля открыто-подземным способом на имитационной модели / **И.С. Кузнецов** // Инновационный конвент. Департамент молодежной политики и спорта Кемеровской области «Кузбасс: образование, наука, инновации». – Кемерово: КемГУ, 2019. – С. 13-18.

12) **Кузнецов, И. С.** О многовариантности выбора комплекта горных машин и организации работ в забое при открытой добыче угля / **И. С. Кузнецов, В. В. Зиновьев, А. В. Кузнецова** // IV Международная научно-практическая конференция «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте». – Кемерово: КузГТУ, 2020. – С. 201-207.

13) **Кузнецов, И. С.** О выборе критерия и алгоритме оптимизации для выбора комплекта горных машин в составе экскаваторно-автомобильного комплекса / **И. С. Кузнецов, П.И. Николаев** // XIII Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых с международным участием «Россия молодая». – Кемерово: КузГТУ, 2021. – С. 095030.1-095030.8

14) **Кузнецов, И. С.** Разработка методики выбора параметров горных машин в составе экскаваторно-автомобильного комплекса / **И.С. Кузнецов** // XIII Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых с международным участием «Россия молодая». – Кемерово: КузГТУ, 2021. – С. 010603.1-010603.5

15) **Кузнецов, И. С.** Специализированная компьютерная система имитационного моделирования для исследования параметров открыто-подземной геотехнологии / **И. С. Кузнецов, В. В. Зиновьев, П. И. Николаев, А. В. Кузнецова** // Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика». – Санкт-Петербург: АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», 2021. – С. 243-249.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в следующем:

[1, 2, 3] – разработка аналитико-имитационной модели функционирования ЭАК с учетом внеплановых простоев, проведение вычислительных экспериментов, обработка результатов;

[4] – идентификация законов распределения периодичности возникновения и продолжительности вероятностных простоев, а также продолжительности процессов ЭАК;

[5, 10] – проведение экспериментов, обработка результатов;

[12] – обоснование количества вариантов сочетаний параметров ЭАК;

[13] – обоснование выбора эвристического алгоритма и критерия оптимизации, проведение вычислительных экспериментов, обработка результатов;

[15] – разработка программно-методического обеспечения для выбора оптимальных параметров ЭАК с учетом внеплановых простоев горных машин.

Подписано в печать 15.07.2022 г. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman». Уч.-изд. л. 1,0
Тираж 100 экз. Заказ №346
Издательский центр Кузбасского государственного технического
университета имени Т.Ф. Горбачева
650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а