

УДК 622.015, 519.876.5**К ВОПРОСУ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ
ПЛАНИРОВАНИИ РАБОТЫ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО
КОМПЛЕКСА**

Апухтин Р. В., студент гр. ИИби-231, III курс

Научный руководитель: Кузнецов И. С., к.т.н.

Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева
ФИЦ угля и углехимии СО РАН**Аннотация**

В работе представлена имитационная модель функционирования экскаваторно-автомобильного комплекса (ЭАК) открытых горных работ, предназначенная для анализа и повышения эффективности карьерного транспорта. Модель воспроизводит полный технологический цикл автосамосвалов, учитывает очереди, загрузку экскаватора, параметры трассы, транспортные условия и стохастическую изменчивость операций. Проведённые расчёты позволяют выявлять узкие места, определять рациональное количество автосамосвалов, оценивать производительность комплекса и прогнозировать её изменение при варьировании горнотехнических параметров. Дополнительно реализована система интеллектуальной обработки результатов моделирования, обеспечивающая поддержку принятия решений и формирование цифрового двойника ЭАК.

1. Введение

Открытая добыча полезных ископаемых остаётся основой минерально-сырьевой базы России, а эффективность карьерного транспорта остаётся одним из ключевых факторов конкурентоспособности горных предприятий. На работу экскаваторно-автомобильных комплексов существенно влияют:

- параметры взаимодействия экскаватора и автосамосвалов;
- параметры трассы;
- изменчивость свойств горной массы и условий разработки.

Современные цифровые технологии, такие как телеметрия, автоматизированная диспетчеризация, системы позиционирования, цифровые двойники позволяют создать новые возможности для анализа и оптимизации работы карьерных комплексов. Имитационное моделирование позволяет исследовать функционирование ЭАК в условиях неопределённости, оценивать влияние горнотехнических факторов и принимать обоснованные решения по организации работ.

2. Постановка задачи

Цель исследования: создание инструмента для анализа и прогнозирования производительности ЭАК на основе имитационного

моделирования и интеллектуальной обработки данных.

Для достижения цели решены задачи:

1. Разработка имитационной модели технологического цикла ЭАК.
2. Проведение расчётов для оценки влияния горнотехнических параметров на производительность.
3. Формирование базы данных результатов моделирования.
4. Построение прогностической модели для оценки производительности комплекса.
5. Оптимизация параметров ЭАК с целью повышения эффективности транспортных операций.

3. Описание имитационной модели

Использована стохастическая дискретно событийная имитационная модель, позволяющая учитывать очереди, занятость оборудования, случайные задержки и повторяющиеся циклы транспортирования. Такой подход обеспечивает реалистичное воспроизведение работы карьерного транспорта в изменчивых горнотехнических условиях.

Технологический цикл автосамосвала включает:

1. ожидание в забое;
2. манёвры и позиционирование для погрузки;
3. погрузку экскаватором;
4. транспортирование гружёного автосамосвала;
5. ожидание и манёвры для разгрузки;
6. разгрузку;
7. порожний ход к забою.

В модели учитываются следующие ресурсы:

- экскаватор как основной производственный ресурс;
- позиции погрузки и разгрузки;
- очереди автосамосвалов;
- ограничения площадок и транспортных коммуникаций.

Параметры модели включают:

- количество автосамосвалов и их характеристики;
- характеристики экскаватора;
- параметры трассы;
- параметры взаимодействия всех элементов.
- свойства горной массы.

В качестве источников данных можно использовать хронометраж, телеметрия, паспорта техники. Что позволит определить взаимодействие параметров модели.

Модель воспроизводит непрерывный цикл работы ЭАК, что позволяет оценивать систему в квазистационарном режиме и анализировать влияние изменения параметров на загрузку экскаватора, образование очередей и производительность всего комплекса.

4. Вычислительный эксперимент

Расчёты проводились на интервале, соответствующем суточному циклу

- время рейса;
- длительности операций;
- количество выполненных рейсов;
- объём вывезенной горной массы.

Результаты моделирования формируют базу данных, содержащую параметры технологического процесса и итоговые показатели работы комплекса. Полученные данные обеспечивают возможность последующего анализа и позволяют оценивать влияние расстояния транспортирования, объёма ковша, скорости движения и других факторов на производительность, что в дальнейшем позволяет построить прогностическую модель и выявить закономерности, влияющие на производительность.

[illegible]

На основе данных моделирования построена модель прогнозирования производительности ЭАК. Она позволяет:

- вводить только параметры трассы, чтобы получить прогноз по наиболее эффективному экскаватору и более подходящих к нему автосамосвалов;
- оценивать ожидаемую производительность при изменении параметров;
- выявлять наиболее значимые факторы;
- использовать модель как элемент цифрового двойника карьерного комплекса.

Нахождение оптимальных параметров

Параметры трассы

Забойный участок

Длина участка: 380

Радиус кривизны: 175

Продольный уклон: 57

Карьерный участок

Длина участка: 750

Радиус кривизны: 100

Продольный уклон: 79

Рассчитать

Вместимость ковша экскаватора: 56
Паспортное время цикла экскаватора: 59,5483662493212
Средний угол поворота экскаватора: 120
Коэффициент экскавации: 0,575
Средний размер фракции куска породы: 0,36
Геометрическая вместимость кузова: 19,8
Вместимость кузова с шапкой: 269,5
Грузоподъемность автосамосвала: 450
Эксплуатационная масса автосамосвала: 360
Минимальный радиус разворота автосамосвала: 9,62945537766587
Время на подъем кузова: 11
Время на опускание кузова: 14
Скорость движения при выполнении маневровых работ: 2,5
Коэффициент использования грузоподъемности: 1,2
Основное удельное сопротивление движению на забойном участке: 401
Основное удельное сопротивление движению на карьерном участке: 390
Основное удельное сопротивление движению на траншейном участке: 150
Средневзвешенный продольный уклон отвального участка: 0
Основное удельное сопротивление движению на отвальном участке: 401
Расстояние между осями автосамосвала: 1,5
Количество автосамосвалов: 15
Суточная производительность ЭАК: 4433,07224244769

Рисунок 2 – Пример работы приложения

В итоге работы прогностической модели имитационный модуль позволяет определять рациональное количество автосамосвалов, параметры работы экскаватора и транспортных операций. Это обеспечивает снижение простоев, повышение загрузки оборудования и рост производительности.

6. Научная новизна, практическая значимость и общий вывод

Разработанный подход к анализу и оптимизации работы экскаваторно-автомобильных комплексов представляет собой современную интегрированную методологию, объединяющую имитационное моделирование, интеллектуальную обработку данных и концепцию цифровых двойников. Такая совокупность инструментов обеспечивает комплексное исследование функционирования карьерного транспорта, позволяет выявлять узкие места и факторы потерь, определять рациональные параметры работы ЭАК и проводить виртуальные эксперименты для оценки последствий различных управленческих решений. Формирование цифрового двойника транспортного комплекса создаёт основу для прогнозирования производительности, анализа рисков и оптимизации горнотранспортных процессов в условиях изменяющейся производственной среды.

Практическая значимость подхода заключается в возможности его внедрения в систему оперативного и стратегического управления горнодобывающим предприятием. Использование имитационной модели и интеллектуальных методов анализа данных способствует повышению эффективности открытых горных работ, снижению простоев техники, улучшению планирования и повышению устойчивости технологических процессов. Такой подход поддерживает развитие цифровых технологий в горной промышленности и обеспечивает переход к более гибким и технологически продвинутым системам управления производством.

7. Список литературы

1. Гудфеллоу, Я., Бенджио, И., Курвилль, А. "Глубокое обучение". —

М.: ДМК Пресс, 2017. — 652 с.

2. Стародубов, А.Н., Зиновьев, В.В., Кадочигова, А.Н., Каплун, А.В. «Система имитационного моделирования очистных горных работ» // Сборник трудов конференции IMMOD-2023. — 2023. — С. 509–515. УДК 004.942; 622.3. URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/immod-2023-509-515.pdf> (дата обращения: 29.01.2026)

3. Кудрявцев, Е.М. "GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем". — М.: ДМК Пресс, 2004. — 320 с.: ил. (Серия «Проектирование»). ISBN 5-94074-219-X.

4. Кузнецов, И.С. "Оптимизация параметров карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов с учетом внеплановых простоев" // диссертация, Кузбасский государственный технический университет, 2022. <https://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2022/kuz/aut.pdf> (дата обращения: 15.11.2025)

5. Шолле, Ф. "Глубокое обучение на Python". — СПб.: Питер, 2018. — 400 с.: ил. — (Серия «Библиотека программиста»). ISBN 978-5-4461-0770-4. — ББК 32.973.2-018.1. — УДК 004.43.