https://doi.org/10.18503/SMTS-2022-12-2-62-73
ISSN 2949-0952 (Print)

УДК 622.684

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА КАРЬЕРА

Пыталев И.А.[1], Козловский А.А.[2], Полинов А.А.[3], Швабенланд Е.Е.[4], Якшина В.В.[1], Артюшин А.К.[1]*

[1] Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, гор. Магнитогорск, Россия
[2] Корпоративный центр подготовки кадров «Персонал», гор. Магнитогорск, Россия
[3] Горно-обогатительное производства ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», гор. Магнитогорск, Россия
[4] Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского, гор. Москва, Россия
* Контактное лицо: Andrey.Art.1999@mail.ru
vehicle@list.ru (П.И.А.), kadry@mmk.ru (К.А.А.), polinov.aa@mmk.ru (П.А.А.), shvabenland@vims-geo.ru (Ш.Е.Е.), v.v.yakshina@inbox.ru (Я.В.В.)

Аннотация. Спецификой горнодобывающих предприятий является постоянное изменение транспортной сети, которое связанно с развитием горных работ как в плане, так и по глубине. Карьерные автодороги имеют стационарные и врѐменные участки, где первые определяются генеральной схемой предприятия, а вторые местоположением карьера, отвалов, складов, пунктов перегрузки и других объектов инфраструктуры. Повышение эффективности ведения горных работ обеспечивается в результате оптимизации типа, количества подвижного состава и транспортной работы в условиях постоянного изменения дорог в карьере. В работе предложена имитационная модель позволяющая решать такие задачи. Модель создана на платформе AnyLogic. Представлена схема процесса моделирования работы экскаваторно-автомобильного комплекса. В процессе моделирования применены принципы системности, универсальности и масштабируемости. Использован агентный подход, подразумевающий моделирование каждого самосвала и экскаватора как отдельного самостоятельного объекта модели. Представленная в статье имитационная модель позволяет определить оптимальную врѐменную дорожную схему движения самосвалов. В статье описан эксперимент по выбору расположения врѐменного участка дороги для обеспечения оптимальной работы экскаваторно-автомобильного комплекса. В эксперименте учитываются последующие изменения дорожной сети, а также затраты на её строительство. В качестве модельного примера принят экскаваторно-автомобильный комплекс, состоящий из шести экскаваторов, с выгрузкой породы на одном пункте. Разработанная модель была использована для определения показателей эффективности экскаваторно-автомобильного комплекса на условном месторождении.

Ключевые слова: имитационное моделирование, экскаваторно-автомобильный комплекс, дорожная сеть, агентный подход, дискретно-событийный подход, AnyLogic, выбор подвижного состава, схема вскрытия, диспетчеризация, отвал, склад

© Пыталев И.А., Козловский А.А., Полинов А.А., Швабенланд Е.Е., Якшина В.В., Артюшин А.К., 2022

Поступила: 29 июля 2022; Принята к публикации: 14 октября 2022; Опубликована: 31 декабрь 2022

Для цитирования:

Пыталев И.А., Козловский А.А., Полинов А.А., Швабенланд Е.Е., Якшина В.В., Артюшин А.К. Имитационное моделирование работы экскаваторно-автомобильного комплекса карьера // Недропользование и транспортные системы. 2022. Т.12. №2. С.62–73. https://doi.org/10.18503/SMTS-2022-12-2-62-73

Это произведение доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

https://doi.org/10.18503/SMTS-2022-12-2-62-73
ISSN 2949-0952 (Print)

EXCAVATOR-AND-DUMP TRUCK COMPLEX SIMULATION

Ivan Pytalev[1], Andrey Kozlovskii[2], Andrey Polinov[3], Elena Shvabenland[4], Victoria Iakshina[1], Andrey Artiushin[1]*

[1] Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia
[2] Corporate training center "Personal", Magnitogorsk, Russia
[3] Mining and processing production of PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia
[4] All-Russian Scientific-research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky, Moscow, Russia
* Corresponding: Andrey.Art.1999@mail.ru
vehicle@list.ru (I.P.), kadry@mmk.ru (A.K.), polinov.aa@mmk.ru (A.P.), shvabenland@vims-geo.ru (E.Sh.), v.v.yakshina@inbox.ru (V.Ia.)

Abstract. The specificity of mining enterprises is the constant change in the transport network, which is associated with the development of mining operations, both in terms of and in depth. Career roads have stationary and temporary sections. Stationary sections are determined by the general scheme of the open pit, while temporary sites depend on the location of the open pit, dumps, warehouses, transfer points and other infrastructure facilities. An increase in the efficiency of mining operations is provided as a result of optimizing the type, number of rolling stock and transport work in the conditions of constant changes in the roads in the open pit. The paper proposes a simulation model that allows solving such problems. The model was created on the AnyLogic platform. A diagram of the process of modeling the operation of an excavator-and-dump truck complex is presented. In the modeling process, the principles of consistency, universality, and scalability are applied. An agent-based approach was used, which implies modeling each dump truck and excavator as a separate, independent object of the model. The simulation model presented in the article makes it possible to determine the optimal temporary road scheme for the movement of dump trucks. The article describes an experiment on choosing the location of a temporary section of the road to ensure optimal operation of the excavator-and-dump truck complex. The experiment considers subsequent changes in the road network, as well as the cost of its construction. As a model example, an excavator-and-dump truck complex consisting of six excavators was taken, with rock unloading at one site. The developed model was used to determine the performance indicators of the excavator-and-dump truck complex at a model mineral deposit.

Keywords: simulation modeling, excavator-and-dump truck complex, road network, agent-based approach, discrete-event approach, AnyLogic, optimization of rolling stock, opening cast, dispatching, dump, warehouse

© Pytalev I., Kozlovskii A., Polinov A., Shvabenland E., Iakshina V., Artiushin A., 2022

Received: June 29, 2022; Accepted: October 14, 2022; Published: December 31, 2022
For citation:
Pytalev I., Kozlovskii A., Polinov A., Shvabenland E., Iakshina V., Artiushin A. Excavator-and-Dump Truck Complex Simulation // Subsurface Management and Transportation Systems. 2022, Vol.12, No.2, pp.62-73. https://doi.org/10.18503/SMTS-2022-12-2-62-73

The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Введение

Современным решением повышения эффективности работы горнодобывающих предприятий является автоматизация и роботизация [1] всех процессов, в том числе, транспортной работы. Для оптимизации работы горнотранспортного оборудования, требуется механизм планирования и контроля большого количества процессов, протекающих на горном производстве. В отечественной и зарубежной практике для этого применяются информационные технологии, в том числе имитационное моделирование.

Имитационное моделирование на горнодобывающих предприятиях применяется уже не первое десятилетие [2]. В настоящее время каждое предприятие, которое заинтересовано в безопасном ведении горных работ, в снижении капитальных и эксплуатационных затрат, в повышении эффективности извлечения, доставки и обогащения полезного ископаемого, в той или иной степени использует информационные технологии. Кроме того, применение информационных технологий позволяет оптимизировать работу горнодобывающего предприятия уже на этапах проектирования с целью снижения рисков для рабочего процесса в период функционирования.

Известно множество компьютерных программ, позволяющих создавать имитационные модели разной направленности и эффективности [3]. Такие программы, зачастую, ориентированы на конкретные сферы деятельности производства или на способ проведения процесса моделирования.

Моделирование на горнодобывающих предприятиях обеспечивает прогнозирование процессов, происходящих в подработанном массиве [4], имитацию отдельных производственных процессов [5] и полное представление и имитацию работы горного оборудования и его отдельных механизмов [6–8].

Однако при создании моделей для экскаваторно-автомобильных комплексов горного производства пользователь сталкивается с особенностями горного производства. Основной сложностью при оптимизации работы экскаваторно-автомобильного комплекса является необходимость имитации изменения дорожной сети карьера по мере его развития.

Спецификой горнодобывающих предприятий является постоянное изменение транспортной сети, которое связанно с развитием горных работ как в плане, так и по глубине. При этом карьерные автодороги имеют стационарные и врѐменные участки, где постоянные участки определяются генеральной схемой предприятия, а врѐменные – местоположением карьера, отвалов, складов, пунктов перегрузки и других объектов инфраструктуры. Если постоянные участки существуют на протяжении всего времени функционирования карьера, то врѐменные участки создаются в процессе отработки карьера в соответствии с планами развития горных работ.

Для учёта этой особенности в имитационной модели необходимо либо упрощать её, либо, наоборот, детализировать. Анализ существующих имитационных моделей карьеров позволил выделить два типа моделей. В моделях первого типа учитываются особенности конкретного горнодобывающего предприятия, например, модели потоков горной массы [9, 10], модели, определяющие требуемое количество экскаваторов [11] и тому подобное. Второй тип моделей описывает более мелкие операции и события, происходящие на большинстве карьеров. К таким моделям относятся, например, модели движения отдельных самосвалов [12], описывающие состояние массивов горных пород [13] и так далее. Анализ существующих моделей карьеров позволяет сделать вывод о невозможности комплексного моделирования деятельности горнодобывающего предприятия без использования нескольких моделей нескольких типов. Необходимость построения моделей нескольких типов замедляет процесс моделирования, увеличивает вероятность ошибок, усложняет процесс сбора данных, их анализа и обобщения. Кроме того, для построения имитационных моделей разных типов необходимо использовать различные компьютерные программы.

Таким образом, наличие модели, которая позволит проводить комплексное моделирование всех перевозок на горнодобывающем предприятии без внесения существенных изменений в модель, позволит решить проблему повышения эффективности горных работ. Для реализации данного подхода авторы предлагают имитационную модель перевозок на горнодобывающем предприятии, в которой присутствует возможность создавать уникальную для каждого карьера дорожную сеть со своими характеристиками и параметрами экскаваторно-автомобильного комплекса.

В настоящее время для планирования горных работ используется несколько компьютерных программ, например, Alastri [14], K-MINE [15], ExtendSim [16], ГЕОМИКС [17] и другие. Они способны в достаточной степени описать работу горнотранспортного комплекса, однако в них практически невозможно производить в рамках одной итерации моделирования сложные эксперименты по взаимодействию автосамосвалов и экскаваторов при ведении горных работ.

Программная платформа AnyLogic [18] позволяет строить имитационные модели разного уровня обобщения и сложности, поскольку сочетает все современные парадигмы имитационного моделирования, включая дискретно-событийную и агентную. Кроме того, AnyLogic обладает следующими достоинствами, позволяющими упросить создание моделей и повысить эффективность экспериментов с ними:

- наличие библиотек готовых блоков модели из различных предметных областей, что позволяет ограничиться их настройкой для конкретных моделируемых систем. К таким блокам, например, относятся блоки, имитирующие движение транспортных средств;
- возможность 2D и 3D визуализации модели;
- использование встроенного объектно-ориентированного языка программирования Java для описания сложной логики поведения модели.

Агентная парадигма или подход к имитационному

моделированию подразумевает моделирование движения и поведения каждого самосвала и экскаватора как отдельного самостоятельного элемента модели. При этом в модели задаются только вариации поведения для всего парка самосвалов и экскаваторов. Множество действий каждого отдельного агента модели – автосамосвала или экскаватора определяет глобальное поведение моделируемой системы.

Новизна разработанной нами имитационной модели заключается в нескольких аспектах. Во-первых, впервые реализована возможность создания и динамического изменения врѐменных дорожных участков транспортной сети карьера при определённых условиях. Это позволит моделировать работу экскаваторно-автомобильного комплекса не только на отдельном участке, но и во всём карьере. Во-вторых, модель содержит авторские алгоритмы поведения автосамосвалов и экскаваторов, что уменьшает затраты времени на создание модели конкретного карьера и снижает требования к квалификации разработчиков такой модели.

Основными задачами, которые решает разработанная модель, являются:

- выбор оптимального местоположения врѐменных дорожных участков с учётом их изменчивости;
- определение оптимального число автосамосвалов и экскаваторов.

2. Описание модели

2.1. Идея модели и реализуемые требования

Идея разработанной модели заключается в моделировании экскаваторно-автомобильного комплекса на определённых врѐменных участках, либо на протяжении всего фронта работ по добыче полезных ископаемых. Кроме того, модель обладает возможностью автоматически изменять дорожную сеть карьера во время моделирования с учётом физических ограничений и требований нормативно-правовой документации.

Разработанная модель реализует следующие требования, вытекающие из необходимости исследования работы экскаваторно-автомобильного комплекса с учётом изменения карьерных автодорог:

1. возможность создания и редактирования сети карьерных дорог с учётом их последующего изменения со временем в рамках одного модельного эксперимента;
2. возможность изменения параметров парка автосамосвалов и экскаваторов;
3. возможность задавать длительность технологических простоев автосамосвалов и экскаваторов;
4. возможность автоматического или «ручного» управления маршрутами автосамосвалов, то есть возможность выбора режима диспетчерского управления;
5. в режиме автоматической диспетчеризации модель должна выбирать маршруты для порожних самосвалов и самосвалов, гружёных вскрышей или полезным ископаемым с учётом загруженности пунктов погрузки и выгрузки;
7. модель должна обеспечивать сбор и отображение статистических данных о работе экскаваторно-автомобильного комплекса;
8. модель должна учитывать климатические особенности места расположения карьера;
9. модель должна быть универсальной для различных горнодобывающих предприятий.

Реализация идеи и требований к имитационной модели позволяют оценивать и принимать обоснованные экономические и технологические решения для повышения эффективности функционирования горнодобывающего предприятия с минимальными затратами на построение и исследование модели.

2.2. Принципы модели

Разработанную модель предлагается использовать не для конкретного карьерного комплекса, а как основу универсального инструмента для горных предприятий с разными требованиями и задачами как к самой модели, так и к её результатам. Поэтому при разработке модели учитывался ряд принципов, соблюдение которых должно упростить использование модели.

Первым принципом является принцип системности. Экскаваторно-автомобильный комплекс карьера состоит из трёх взаимодействующих элементов: экскаватора, самосвала и дорожной сети карьера. В связи с этим возможно рассматривать карьер как систему, элементы которой взаимодействуют по определённым алгоритмам. Это позволяет собирать и накапливать статистические данные как по всем необходимым показателям работы карьера в целом, так и по работе отдельных её элементов, что позволяет, в частности, выявлять недостатки проекта карьера.

Второй принцип – принцип универсальности. Одинаковых карьеров не существует. Следовательно, дорожная сеть и этапы разработки у каждого карьера имеют особенности. Алгоритмы разработанной модели позволяют ограничиться вводом исходных данных для нового карьера, не изменяя структуру самой модели. В частности, для моделирования нового карьера необходимо задать соответствующую транспортную сеть карьера для разных этапов разработки моделируемого месторождения.

Третий принцип – принцип масштабируемости. Каждое горное предприятие имеет свой парк самосвальной и экскаваторной техники разных типов. Характерной задачей, которую приходится решать как при проектировании, так и в процессе эксплуатации, является оптимизация численности парка технических средств. Реализация принципа масштабируемости разработанной модели означает отсутствие необходимости корректировки алгоритмов управления маршрутами автосамосвалов и работой экскаваторов при изменении их численности.

Представленные три принципа, реализованные в разработанной модели, позволяют моделировать карьеры разной сложности с неоднородными как по количеству, так и по типам, парками самосвалов и экскаваторов.

2.3. Методика моделирования

Процесс работы с моделью для моделирования функционирования экскаваторно-автомобильного комплекса состоит из следующих этапов:

1. построение схем карьера и его дорожной сети для каждого этапа разработки с определением мест погрузки и разгрузки самосвалов;
2. выбор типов самосвалов и экскаваторов, указание их характеристик;
3. выбор метода диспетчеризации, указание продолжительности выполнения технологических операций;
4. проведение непосредственного моделирования работы экскаваторно-автомобильного комплекса;
5. сбор полученных результатов и их анализ;
6. редактирование дорожной сети в случае необходимости;
7. повторение пунктов 4, 5, 6 до получения требуемых показателей работы карьера.

Модель автоматически определяет маршруты автосамосвалов до пунктов погрузки или выгрузки на основании данных о дорожной сети карьера.

Дорожная сеть карьера создаётся в соответствии с его схемой вскрытия, а также с учётом данных о количестве полос на дороге, перекрёстках, ограничениях скорости, дорожных знаках, местах погрузки и выгрузки, их расположении и высотных отметках. Дорожная сеть карьера создаётся с использованием элементов разметки пространства AnyLogic: «Путь», «Узел», «Прямоугольный узел» и «Сетевой порт».

На **рис. 1** представлен пример 3D-схемы карьера, на которой показаны внутренние и внешние уступы по горизонтам, линии съезда на нижние горизонты и пути движения самосвалов.

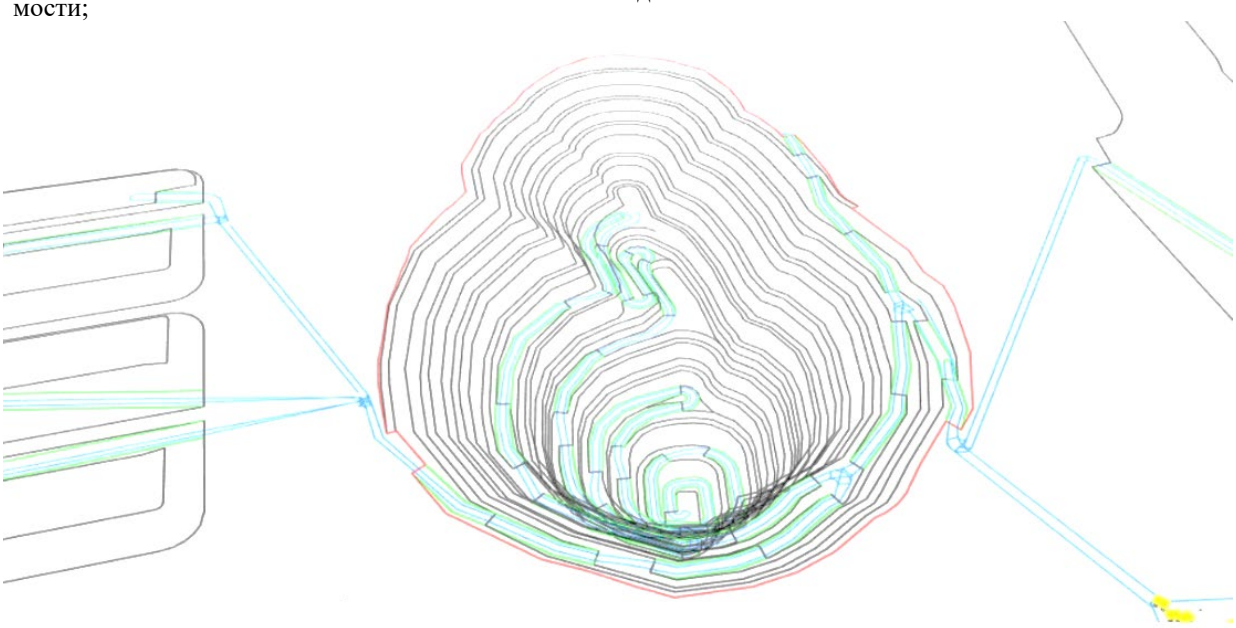


Рис. 1. Представление карьера в имитационной модели
Fig. 1. Open pit representation in a simulation mode

В процессе работы модели собирается статистика о работе каждого самосвала и экскаватора. В настоящее время реализован сбор основных статистических показателей, которые возможно экспортировать во внешнюю базу данных или в электронную таблицу для дальнейшего анализа.

2.4. Алгоритм моделирования

Разработанная модель имитирует процесс работы и взаимодействия автосамосвального парка с парком экскаваторов на протяжении заданного периода времени функционирования карьера. Моделируется процесс разработки карьера по блокам и горизонтам добычи. Модель учитывает все простои и задержки.

В упрощённом виде процесс моделирования работы экскаваторно-автомобильного комплекса заключатся в следующем алгоритме, представленном в схематичном виде, изображённом на **рис. 2**.

Все шаги алгоритма, кроме первого, моделируют работу комплекса на протяжении одного этапа добычи. Под этапом добычи понимается интервал времени между моментами проведения взрывов при буровзрывных работах на карьере. После таких работ, в первую очередь, меняется «рельеф» и дорожная сеть, а во-вторую – рабочая зона. Для учёта эти изменений в модели производится корректировка схемы дорожной сети и расположения мест погрузок в карьере. В процессе моделирования производится переход с каждого этапа на следующий до завершения всех этапов отработки заданного объёма горной массы.

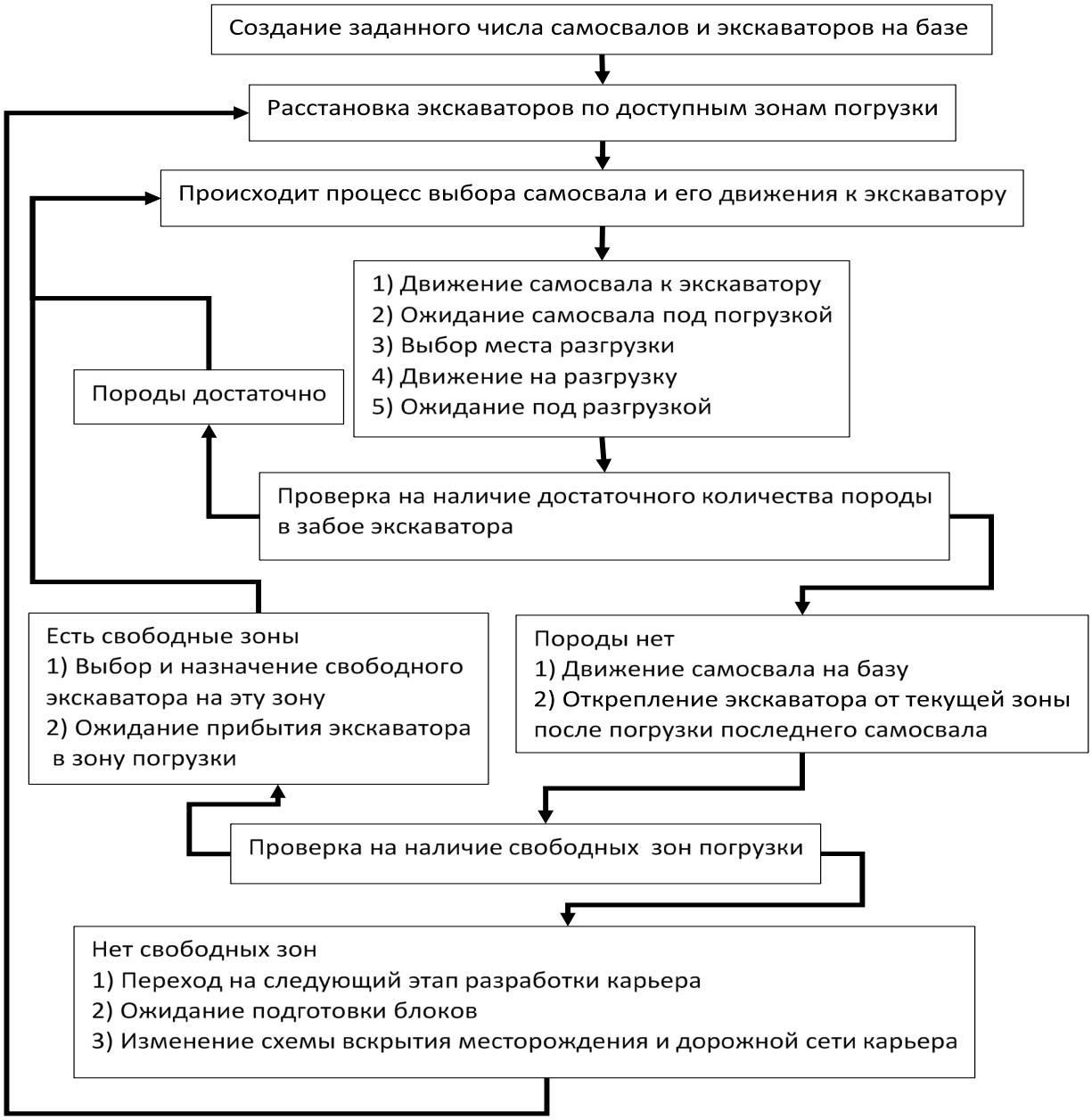


Рис. 2. Схема процесса моделирования работы экскаваторного-автомобильного комплекса
Fig. 2. Scheme of modeling excavator-and-dump truck complex

Моделирование экскаваторно-автомобильного комплекса выполняется не только в соответствии с нормативно-правовой базой, но и с требованиями пользователя модели. Благодаря наличию в модели визуализации работы карьера, в частности движения самосвалов, появляется возможность определять проблемные участки дороги или недостатки проекта карьера.

3. Исходные данные и план эксперимента

Эксперименты с моделью проводились с целью оценки влияния отличных друг от друга вариантов врѐменного участка на производительность экскаваторно-автомобильного комплекса.

Для этого в модели были созданы два варианта врѐменной дороги. Всего в эксперименте моделировались три последовательных этапа развития врѐменного участка дороги (**рис. 3**).

В качестве модельного примера принят экскаваторно-автомобильный комплекс, в состав которого входят шесть экскаваторов. Выгрузка породы осуществляется на одном пункте.

В качестве карьерного самосвала выбран БелАЗ серии 7540 [19]. Средняя продолжительность погрузки самосвала принята равной 4 мин., выгрузки – 0.5 мин.

Коэффициент загруженности кузова 0.95. Скорость движения порожнего самосвала – 25 км/ч, гружёного – 20 км/ч.

Технические характеристики автосамосвалов являются параметрами блока имитационной модели TransporterFleet (рис. 4), а затраты времени на погрузочно-разгрузочные операции параметрами блока MoveByTransporter (рис. 5).

Длительность шага модельного времени составляет 1 секунду. Период моделирования зависит от момента окончания отработки обозначенных зон общего объёма 400 000 м^3 горной массы.

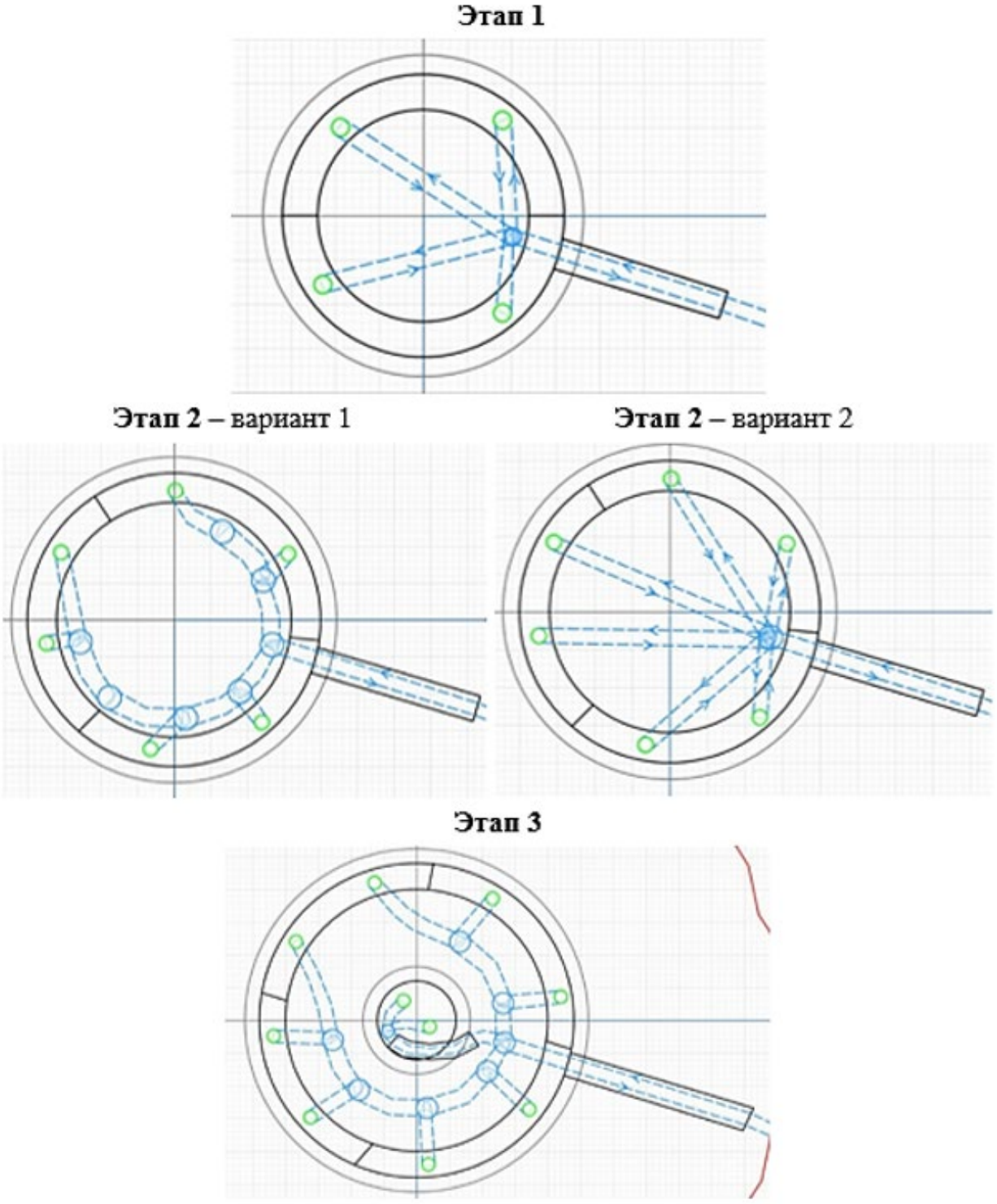


Рис.3. Варианты схемы врѐменной автодороги моделируемого карьера
Fig. 3. Variants of the temporary road scheme in the simulated open pit

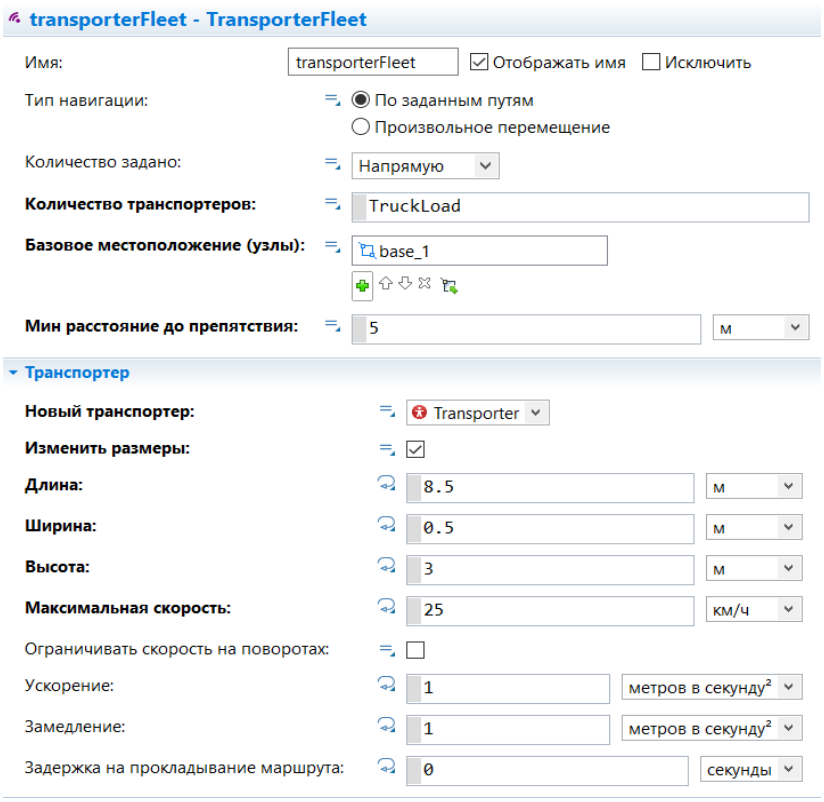


Рис.4. Данные в блоке модели TransporterFleet, определяющего параметры парка автосамосвалов
Fig. 4. Data in the TransporterFleet block that defines the dump truck fleet parameters

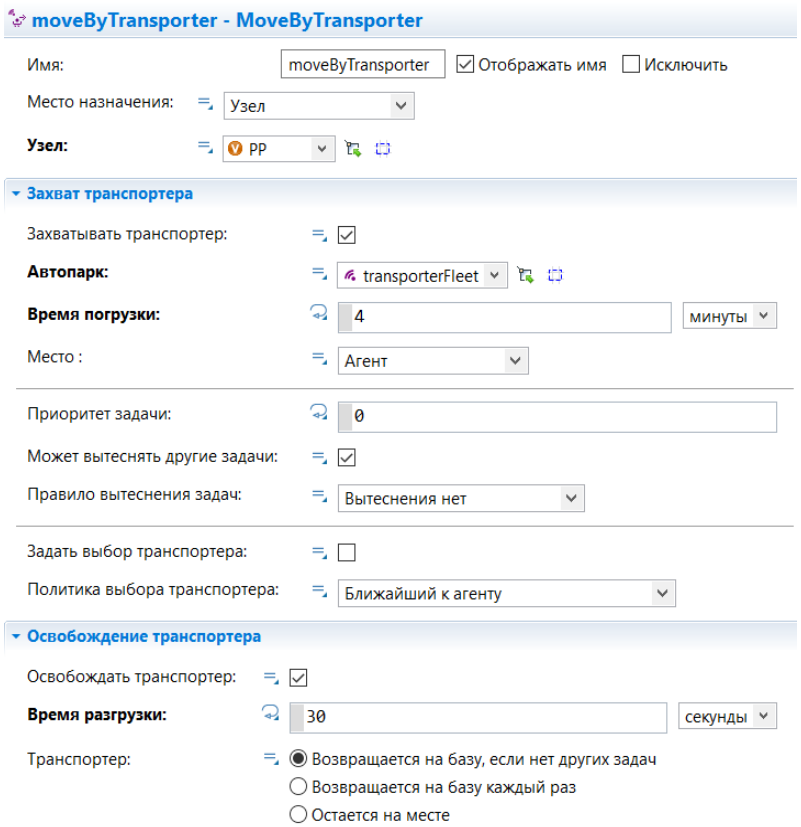


Рис.5. Данные в блоке MoveByTransporter, определяющего параметры движения автосамосвалов
Fig. 5. Data in the MoveByTransporter block that defines the parameters of the dump trucks movement

Цель экспериментов заключалась в обосновании численности парка автосамосвалов при различных вариантах схемы врѐменной автодороги карьера. Численность парка в каждом эксперименте изменялась вручную в интервале от 12 до 24 автосамосвалом с шагом в 3 автомобиля.

4. Результаты

В результате экспериментов была установлена производительность экскаваторно-автомобильного комплекса. Число рейсов самосвалов для вывоза всей потребной горной массы составило 28071 для обоих вариантов. На графике (**рис. 6**) показано время, которое потребовалось самосвалам для транспортирования горной массы из карьера. Не учитывались затраты времени на буровзрывные работы, планировку и строительство новых автодорог.

Выявлена зависимость времени на перемещение горной породы от количества автосамосвалов. На графике показано время, которое необходимо для перемещения заданного объёма горной массы парком автосамосвалов различной численности. С увеличением числа самосвалов возрастает время, необходимое на транспортировку горной массы. Это связано с ограничением пропускной способности транспортной сети. С увеличением количества самосвалов, увеличилось число заторов на перекрёстках, что привело к снижению эксплуатационной скорости самосвалов и увеличению времени их оборота.

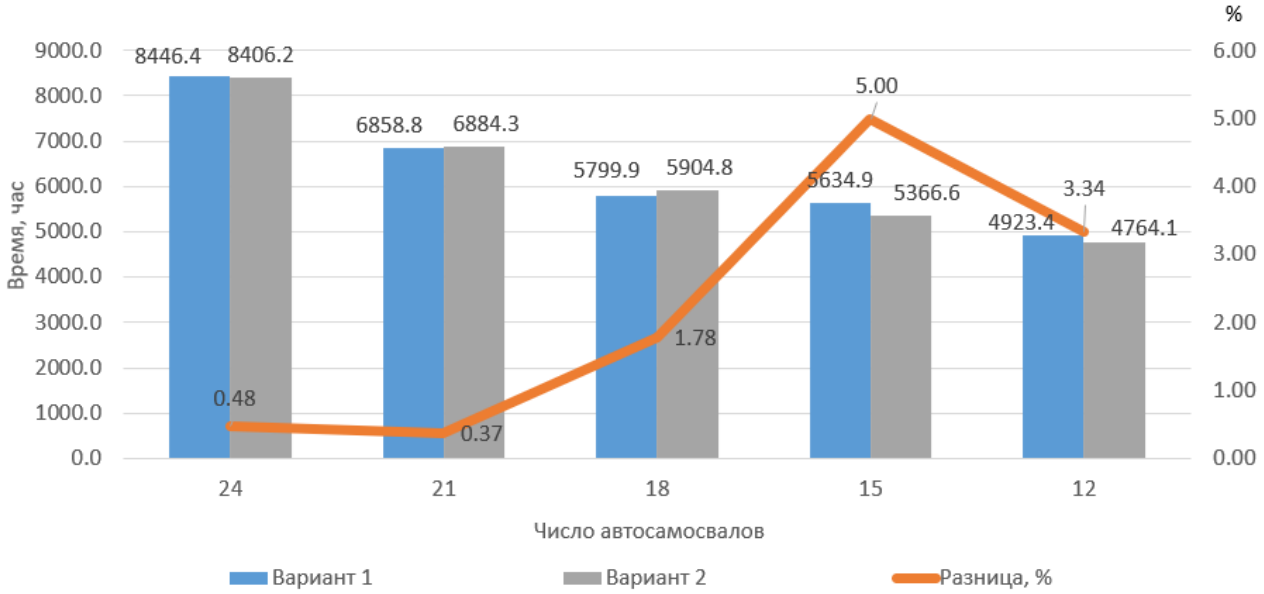


Рис.6. Зависимость затрат времени на перевозку горной массы от числа автосамосвалов
Fig. 6. The dependence of the time spent on the transportation of rock mass on the number of dump trucks

Время движения самосвалов от пункта выгрузки до пункта погрузки и от погрузки – до выгрузки показано на **рис. 7**. Время движения самосвалов в гружёном состоянии для обоих вариантов дороги имеет различия менее одного процента. Это свидетельствует о том, что при движении автосамосвалов от мест погрузки до мест выгрузки в обоих вариантах возникает меньше задержек из-за меньшей загруженности дороги. При движении автосамосвалов от пункта разгрузки до погрузки затраты времени на движение различаются для первого и второго вариантов. Разница по вариантам вызывается скоплением самосвалов на развилке во втором варианте.

Средняя эксплуатационная скорость самосвалов показана на **рис. 8**. Разница между вариантами не превышает 6%. Однако при движении на погрузку в варианте 15-и самосвалов эта разница составляет 22%, что связано с возникновением заторов во втором варианте схемы движения.

Анализ результатов моделирования показывает, что отсутствует значительная разница между исследуемыми вариантами размещения дороги. Незначительные различия между вариантами связаны с возникновением заторов автосамосвалов во втором варианте. Однако при должном контроле и организации движения эти задержки могут быть устранены.

Следует отметить, что первый и третий этапы изменения дороги одинаковы в обоих вариантах. Их влияние на второй этап будет заключаться в затратах на строительство дорог. В первом варианте дорога второго этапа была спроектирована с учётом последующего понижения добычных работ. Это позволяет начать более раннюю подготовку участка для буровзрывных работ. Во втором варианте дорога уже проложена в первом этапе, что позволяет быстрее приступить к работе по транспортировке горной массы. Таким образом, из двух вариантов схемы следует выбирать тот, который предпочтительнее с экономической точки зрения и затраченного на строительство дорог времени.

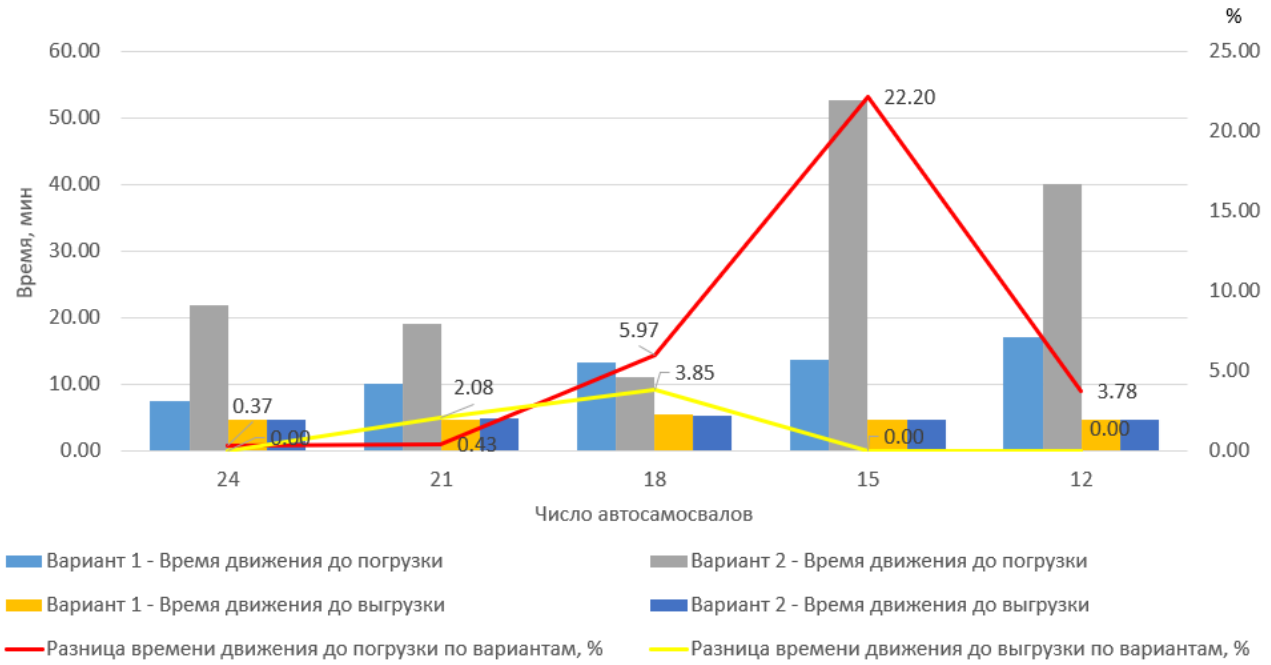


Рис.7. Среднее время движения автосамосвалов
Fig. 7. Average driving time of dump trucks

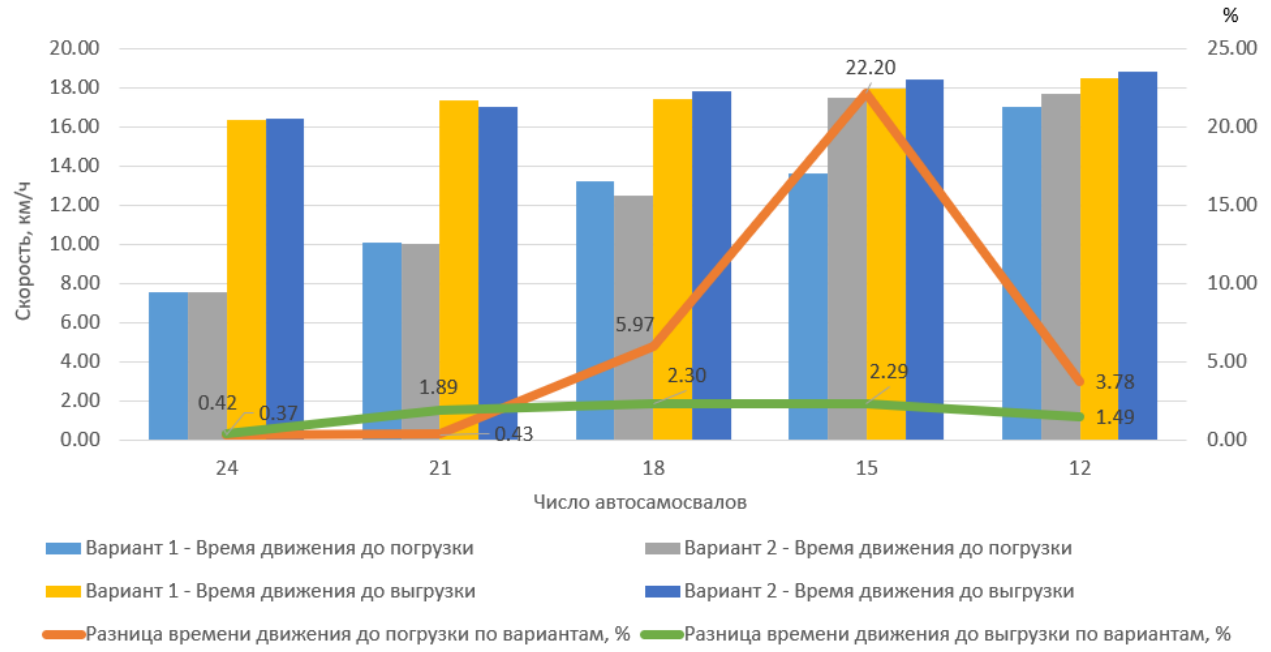


Рис.8. Средняя эксплуатационная скорость автосамосвалов
Fig. 8. Average operating speed of dump trucks

5. Заключение

Анализ результатов исследования показывает необходимость разработки имитационных моделей для комплексного исследования перевозок на горнодобывающем предприятии. Использование таких моделей будет способствовать снижению инвестиционных и капитальных затрат на приобретение и эксплуатацию автосамосвалов, а также поможет в выборе оптимального расположения врѐменных и стационарных участков дорог.

Разработанная модель была использована для определения показателей эффективности экскаваторно-автомобильного комплекса на условном месторождении. Показано, что в модели возможно выявлять скрытые проблемы при проектировании карьерных автодорог, рассчитывать оптимальную численность

парка самосвалов и экскаваторов.

Основными ограничениями разработанной модели являются недостаточный учёт расходов топлива, а также регулирование скорости движения самосвала с учётом продольного профиля карьерных автодорог. Кроме того, не учитываются операционные затраты, порядок взаимодействия горного и транспортного оборудования, влияние качества автомобильных дорог, особенности двигателей и трансмиссии автосамосвалов.

Совершенствование разработанной имитационной модели авторы предполагают проводить в направлении включения в её состав алгоритма диспетчеризации работы автосамосвалов, результатом которого будет оптимальное распределение самосвалов между экскаваторами с целью сокращения суммарного простоя элементов экскаваторно-автомобильного комплекса. Предполагается, что в результате сокращения простоев самосвалов в ожидании погрузки повысится эффективность работы экскаваторно-автомобильного комплекса. Также предлагается добавление алгоритмов по проведению системы капитальных горных выработок для доступа к рудным телам и алгоритмов ремонтно-сервисного обслуживания самосвалов и экскаваторов. Это позволит определять длительность работы не только экскаваторно-автомобильного комплекса, но и всего карьера в целом.

Перспективным направлением развития исследования авторы считают проведение серии экспериментов и сравнение результатов разработанной модели с реальными результатами работы карьера. Такие эксперименты позволят оценить эффективность применения разработанных алгоритмов анализа и принятия решений на горных предприятиях.

Список литературы

1. Corke P., Roberts J., Cunningham J., Hainsworth D. Mining Robotics. // Springer Handbook of Robotics / B. Siciliano. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. pp. 1127-1150. https://www.doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_50.
2. Kozlova O. Experience in Application and Development Prospects of Simulation Modeling in Mining // Ugol'. 2022. № 05. pp. 42–45. https://www.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-5-42-45.
3. Программы имитационного моделирования [Электронный ресурс]. URL: http://simulation.su/static/rusoft.print (дата обращения: 20.07.2022).
4. Rybak J. M., Kongar-Syuryun C., Tyulyaeva Y., Khayrutdinov A. M., Akinshin I. Geomechanical Substantiation of Parameters of Technology for Mining Salt Deposits with a Backfill // Mining Science. 2021. Vol. 28. pp. 19-32. https://www.doi.org/10.37190/msc212802.
5. Eremenko V. A. Stress state modeling of Coaxial Three-Level Open Stopping in Map3D // Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2018. Vol. 11. pp. 5–17. https://www.doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-0-5-17.
6. Сидоров С.А. Моделирование нагруженности гидромеханической трансмиссии карьерного самосвала // Наука и техника. 2006. № 1. С. 51–53.
7. Багров Д.А. Блочная модель карьерного поля при имитационном моделировании горных работ с использованием экскаваторно-автомобильного комплекса оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. № 5. С. 76–78.
8. Кузнецов И.С. Исследование технологических параметров экскаваторно-автомобильного комплекса методом имитационного моделирования // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2018. Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 22–23 ноября 2018 года. С. 112.1–112.8.
9. Кузнецов И.С. Имитационное моделирование системы экскаватор-самосвалы // X Всероссийская, научно-практическая конференция молодых учёных с международным участием «Россия молодая». Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 24–27 апреля 2018 года. С. 31601.1–31601.5.
10. Выдрин В.А., Богданова А.Ю. Имитационное моделирование экскаваторно-автомобильного комплекса с использованием типовых элементарных блоков // Россия молодая. / Под ред. К.С. Костикова. Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 20–23 апреля 2021 года. С. 31604.1–31604.4.
11. Sinoviev V. V., Starodubov A. N., Kravchuk S. V., Grechishkin P. V. Development of Simulation System for Organizational and Technical Options of Coal Mining Industry // Vestnik of Kuzbass State Technical University. 2018. Vol. 18.No. 2. pp. 30–37. https://www.doi.org/10.26730/1999-4125-2018-2-30-37.
12. Ососков Д. В., Ляхомский А. В. Моделирование работы карьерных электросамосвалов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2017. Т. 21. № 3. С. 72–78.
13. Adigamov A. E., Yudenkov A. V. Stress-strain Behavior Model of Disturbed Rock Mass with Regard to Anisotropy and Discontinuities // Mining Informational And Analytical Bulletin (Scientific And Technical Journal). 2021. No.8. pp. 93–103. https://www.doi.org/10.25018/0236_1493_2021_8_0_93.
14. Alastri. Программное обеспечение для планирования открытых горных работ [Электронный ресурс]. URL: https://www.alastri.com/ru/ (дата обращения: 19.07.2022).

15. K-MINE. Комплексные решения для горнодобывающей промышленности [Электронный ресурс]. URL: https://k-mine.com/ (дата обращения: 17.07.2022).
16. ExtendSim. Chemical Engineering, Mining Operations, & Process Flows [Электронный ресурс]. URL: https://extendsim.com/solutions/industries/rate (дата обращения: 17.07.2022).
17. ГЕОМИКС®. Горно-геологическая информационная система [Электронный ресурс]. URL: https://geomix.ru/ (дата обращения: 18.07.2022).
18. AnyLogic Simulation Software [Электронный ресурс]. URL: https://www.anylogic.com/ (дата обращения: 21.07.2022).
19. BELAZ-7540 Series Mining Dump Trucks [Электронный ресурс]. URL: https://belaz.by/en/products/products-belaz/dumpers/dump-trucks-with-hydromechanical-transmission/dump-truck-series-7540/ (дата обращения: 21.07.2022).

References

1. Corke P., Roberts J., Cunningham J. and Hainsworth D. 2008. Mining Robotics. B. Siciliano and O. Khatib (eds), *Springer Handbook of Robotics*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1127–1150.
2. Kozlova O. 2022. Experience in Application and Development Prospects of Simulation Modeling in Mining. *Ugol'*, No. 05, pp. 42–45. (In Russ.).
3. *Simulation programs*. http://simulation.su/static/ru-soft.print (Accessed 20 July 2022).
4. Rybak J. M., Kongar-Syuryun C., Tyulyaeva Y., Khayrutdinov A. M. and Akinshin I. 2021. Geomechanical Substantiation of Parameters of Technology for Mining Salt Deposits with a Backfill. *Mining Science*, Vol. 28, pp. 19–32.
5. Eremenko V. A. 2018. Stress State Modeling of Coaxial Three-Level Open Stopping in Map3D. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, Vol. 11, pp. 5–17. (In Russ.).
6. Sidorov S.A. 2006. Stress Loading Simulation of Hydro-Mechanical Transmission of Dump Truck. *Science & Technique,* No. 1, pp. 51–53. (In Russ.).
7. Bagrov D.A. 2008. Block Model of an Open Pit Field in Simulation Modeling of Mining Operations Using an Excavator-and-Dump Track Complex. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal),* No. 5, pp. 76–78. (In Russ.).
8. Kuznecov I.S. 2018. Study of Technological Parameters of the Excavator-and-Dump Track Complex by Simulation Modeling, *Natural and intellectual resources of Siberia. Sibresurs 2018*. Kemerovo, T. F. Gorbachev State Technical University, C. 112.1–112.8. (In Russ.).
9. Kuznecov I.S. 2018. Simulation Modeling of the Excavator-and-Dump Truck System, *Proceedings of the X All-Russian, scientific, and practical conference of young scientists with international participation "Young Russia"*. Kemerovo, T. F. Gorbachev State Technical University, C. 31601.1 - 31601.5. (In Russ,).
10. Vydrin V.A. and Bogdanova A.Ju. 2021. Simulation Modeling of an Excavator-and-Dump Track Complex Using Standard Elementary Blocks. K.S. Kostikov (ed.), *Young Russia. Proceedings of the XIII All-Russian scientific-practical conference with international participation*. Kemerovo, T. F. Gorbachev State Technical University, pp. 31604.1–31604.4. (In Russ.).
11. Sinoviev V. V., Starodubov A. N., Kravchuk S. V. and Grechishkin P. V. 2018. Development of Simulation System for Organizational and Technical Options of Coal Mining Industry. *VKSTU*, Vol. 18, No. 2, pp. 30–37. (In Russ.).
12. Ososkov D.V. and Lyachomsky A.V. 2017. Modeling of All-Electric Haul Truck Operation. *Vestnik of the Ufa State Aviation Technical University*, Vol. 21, No. 3, pp. 72–78. (In Russ.).
13. Adigamov A. E. and Yudenkov A. V. 2021. Stress-strain Behavior Model of Disturbed Rock Mass with Regard to Anisotropy and Discontinuities. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal),* No. 8, pp. 93–103. (In Russ.).
14. *Alastri. Intergrated Open-Pit Mine Planning Software*. https://www.alastri.com/ru/ (Accessed 19 July 2022).
15. *K-MINE. End-to-End Solution for Mining Industry*. https://k-mine.com/ (Accessed 17 July 2022).
16. *ExtendSim. Chemical Engineering, Mining Operations, & Process Flows*. https://extendsim.com/solutions/industries/rate (Accessed 17 July 2022).
17. *GEOMIX®. Mining and Geological Information System*. https://geomix.ru/ (Accessed 18 July 2022).
18. *AnyLogic Simulation Software*. https://www.anylogic.com/ (Accessed 21 July 2022).
19. *BELAZ-7540 Series Mining Dump Trucks*. https://belaz.by/en/products/products-belaz/dumpers/dump-trucks-with-hydromechanical-transmission/dump-truck-series-7540/ (Accessed 21 July 2022).