

УДК 338.32.053.4

## УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ МЕДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММЫ ARENA

Ефимова И.Ю., Гусева Е.Н., Варфоломеева Т.Н., Повитухин С.А.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
Магнитогорск, e-mail: iefimova@list.ru

В статье рассматривается имитационная модель управления транспортными потоками предприятия, созданная в программе Rockwell Automation Arena 15.0. Представлен обзор программных средств имитационного моделирования для горнодобывающих предприятий. Описана имитационная модель движения самосвалов по маятниковым маршрутам в рудном карьере. В процессе решения поставленной задачи была использована методология структурно-функционального анализа для исследования связей, функций, структуры и особенностей организации транспортных потоков горнодобывающего предприятия. На основе методологии дискретно-событийного имитационного моделирования создана концептуальная модель движения транспорта на предприятии. Проанализированы альтернативы организации перевозок горных пород из карьера. Для исследования производственной задачи и поиска оптимального решения используется дискретно-событийное имитационное моделирование в программе Rockwell Automation Arena 15.0. На основе компьютерного эксперимента с имитационной моделью для выбора оптимальной альтернативы перемещения горных пород на горно-обогатительном предприятии получены результаты имитационного моделирования с подробными статистическими данными, описывающими основные параметры производительности системы: объем перевозимой горной породы; коэффициент использования транспортных средств; процент простоев техники и рабочих; среднее количество рейсов самосвалов и др. Выявлены и представлены места падения производительности системы: разработанная имитационная модель транспортных потоков медного месторождения позволяет исследовать состояния сложной системы в динамике, оптимизировать количество и характеристики транспортных средств, то есть найти рациональное управленческое решение проблемы.

**Ключевые слова:** транспортная система карьера, имитационная модель транспортных потоков, Rockwell Automation Arena

## MANAGEMENT OF TRANSPORT FLOWS OF COPPER DEPOSITS WITH THE USE OF IMITATION MODELING BASED ON ARENA PROGRAM

Efimova I.Yu., Guseva E.N., Varfolomeeva T.N., Povitukhin S.A.

Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk,  
e-mail: iefimova@list.ru

The article discusses the development of a simulation model for managing the transport flows of a mining enterprise in the Rockwell Automation Arena 15.0 program. An overview of simulation tools for mining enterprises is presented. A simulation model of the movement of dump trucks along pendulum routes in an ore open-pit mine is described. To solve the problem, a structural-functional analysis was used to study the structure, connections, functions and features of the organization of transport flows of the mining enterprise. On the basis of the methodology of discrete event simulation, a conceptual model of traffic on the enterprise was created. Analyzed the alternative organization of transportation of rocks from the quarry. To solve the problem, discrete-event simulation modeling is used in Rockwell Automation Arena 15.0. On the basis of a computer experiment with a simulation model for selecting the optimal alternative for rock movement in a mining and processing enterprise, simulation results were obtained with detailed statistical data describing the main parameters of the system's performance: the volume of rock transported; vehicle utilization; the percentage of downtime equipment and workers; the average number of flights of dump trucks, etc. Identified and presented the places of the system performance drop: the developed simulation model of the copper field's transport flows allows you to explore the state of a complex system over time, optimize the number and characteristics of vehicles, that is, find a rational management solution to the problem.

**Keywords:** career transport system, traffic flow simulation model, Rockwell Automation Arena

Моделирование транспортных потоков горнодобывающего предприятия является актуальной проблемой. Эффективная и стабильная работа по добыче и переработке полезных ископаемых во многом зависит от системы транспортировки минерального сырья. Транспортные потоки горных пород из карьера в отвал по маятниковым маршрутам, а также полный жизненный цикл, который включает перемещение медной руды от рудника к обогатительной фабрике, а за-

тем и к потребителю часто являются местом падения производительности горного предприятия.

Анализ затрат по добыче и переработке медной руды свидетельствует о том, что стоимость транспортировки горной породы достигает 35–65 % в себестоимости добычи полезного ископаемого. Очевидно, что создание эффективной системы транспортировки позволит сократить время доставки руды потребителям и снизить общие про-

изводственные затраты горнодобывающего предприятия. Однако зачастую исследование и имитационное моделирование логистики подобных процессов не проводится, а выбор способа транспортировки грузов, типов и количества технических средств выполняется в лучшем случае на основе собственного опыта работы или опыта других предприятий.

Управление материальными потоками добываемой породы на руднике – сложная задача. Требуется добыть и перевезти большой объем горных пород с минимальными для предприятия затратами. Ограничениями в задаче являются: количество транспортных средств и водителей. Кроме того, очевидно, что производственная система подвержена влиянию множества случайных факторов, которые негативно сказываются на производительности предприятия.

Задачи управления и моделирования транспортными потоками горнодобывающего производства встречаются в прикладных научных исследованиях достаточно часто. В настоящее время существуют математические методы решения таких проблем, к ним относятся: кинетические, гидродинамические, многокритериальная оптимизация; экспертная оценка; компьютерное моделирование [1–3]. Кинетические и гидродинамические модели исследуют плотность транспортного потока. Многокритериальная оптимизация сводится к выбору единственного наиболее значимого критерия и имеет множество приближений и допущений. Экспертное решение аналогичных задач также может не подойти в связи с индивидуальными особенностями топографии, рельефа, транспортных развязок каждого месторождения и условий его разработки. Многие российские и зарубежные ученые и инженеры считают, что задачи управления транспортными потоками трудно формализуемы, подвержены влиянию множества случайных факторов, а значит, наиболее эффективным методом их решения является имитационный эксперимент [4–6]. По этим причинам был сделан выбор в пользу методологии дискретно-событийного имитационного моделирования. Имитационная модель сложной системы имеет в своей основе математические закономерности, включает логику процессов, последовательность и динамику событий [7–9]. Кроме того, имитационное моделирование позволяет использовать случайные величины и события в модели, не усложняя эту модель для разработчика.

Рассмотрим процессы добычи и транспортировки медной руды на Михеевском месторождении Челябинской области. Предприятие занимается разработкой меди в гор-

ном массиве. Месторождение содержит запасы меди, золота, серебра и других пород. Залежи медной руды на месторождении достигают около четырехсот миллионов тонн. Добычу медной руды выполняют экскаваторами, которые вынимают горную породу из карьера и погружают ее в самосвалы. Затем самосвалы перевозят горную породу по маятниковым маршрутам карьера. Протяженность этих маршрутов меняется от пятисот метров до двух километров. Из-за перепада высот между карьером и местом разгрузки перевозка груза и обратный холостой рейс самосвала занимают разное время. Перед выгрузкой породы самосвалы должны выполнить маневры и развернуться задом к месту выгрузки. После возвращения в карьер самосвалы ожидают погрузки. Поскольку загрузка горной породы выполняется двумя экскаваторами, случаются простои самосвалов, связанные с очередью в этой позиции карьера. Простой также происходит в результате выполнения работ по подготовке забоя, расчистке подъездных путей бульдозерами.

Добычу медной руды на предприятии можно представить в виде спиралевидных маршрутов движения самосвалов в карьере (рис. 1). В месте добычи горной породы работают буровые установки. Они бурят скважины, в которые потом закладывают взрывчатое вещество для разрыхления горной массы. После рыхления породы экскаваторы грузят руду в самосвалы и доставляют ее к дробильному комплексу, расположенному в карьере на отметке 220 м. Разрыхленные породы самосвалы привозят на «Гирационную дробилку». С дробилки руда поступает на закрытый магистральный конвейер длиной около 1,5 км, который ведет к горно-обогатительной фабрике для дальнейшей обработки и обогащения. Пустая порода доставляется самосвалами к отвальному хозяйству, где бульдозеры складывают пустую породу. Там самосвалы разгружаются и возвращаются назад. Готовый концентрат с ГОКа поставляется на медеплавильный комбинат.

Чтобы обеспечить непрерывный поток перевозки медной руды, необходимо организовать параллельную работу транспорта. В начале производственного цикла в карьере располагаются экскаваторы, которые добывают горную породу и выполняют ее погрузку в самосвалы. Самосвалы перевозят вскрышные породы, передвигаясь между карьером и отвалами. Бульдозеры расчищают площадку и складывают породу в отвалах. Организация работ в случае поломки части самосвалов и сокращения единиц техники возможна за счет создания дополнительных съездов для самосвалов и уменьшения дистанции маятниковых маршрутов.

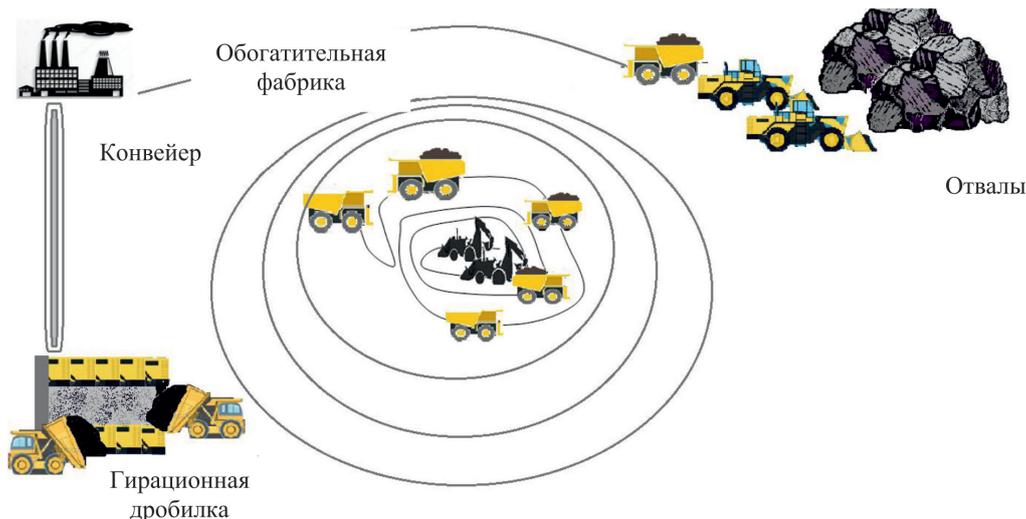


Рис. 1. Схема доставки горной породы из карьера

Большую часть транспортных потоков рудника составляет движение самосвалов от места добычи руды до отвалов породы. По своей сути такое движение представляет собой маятниковый маршрут – такой путь следования транспортного средства, который многократно повторяется между двумя пунктами перевозки грузов. Обратный ход маятникового маршрута самосвалов является холостым.

Потребители медной руды заинтересованы в своевременной доставке сырья в полном объеме. От сроков выполнения заказов потребителей, выполнения производственного плана напрямую зависит прибыль горнодобывающего предприятия. Однако существует ряд проблем, которые негативно влияют на надежность выполнения обязательств предприятием. Выход из строя транспортных средств генерирует риски, связанные с задержками выполнения поставок медной руды. К негативным факторам, влияющим на производительность системы, также относятся: простои транспортных средств, потери рабочего времени в связи с поломками техники, неблагоприятные погодные условия.

#### Материалы и методы исследования

Для решения поставленной задачи нами был использован структурно-функциональный анализ для исследования структуры, связей, функций и особенностей организации транспортных потоков горнодобывающего предприятия. Методология дискретно-событийного имитационного моделирования позволила создать концеп-

туальную модель движения транспорта на предприятии.

Стоит отметить, что сегодня существуют специализированные программные средства для моделирования бизнес-процессов горнодобывающих предприятий. К таким программам относятся: MINEFRAME, ГЕОМИКС, GEOVIA, Surpac, Datamine [10–12]. Эти программы позволяют создавать модели карьеров и дорог, управлять разработкой месторождений. Однако в большинстве подобных программ отсутствует модуль наблюдения за динамикой перевозок, который бы помог визуализировать транспортные потоки предприятия и собрать статистические характеристики о положении машин, их занятости, количественных характеристиках процессов загрузки, разгрузки, перевозки.

Имитационная модель процесса разработки месторождения была реализована в программе Arena версии 15.0 компании Rockwell Automation. Выбор данного программного средства определен наличием необходимых функций для реализации задачи, возможностью проследить динамику работы транспортной системы в разных временных интервалах (сутки, неделя, месяц), а также возможностью манипулировать количеством транспортных средств, задействованных в производстве, для поиска оптимального решения.

В программе Arena была создана имитационная модель для исследования поведения производственной системы в динамике. Требовалось выяснить оптимальную комбинацию экскаваторов-погрузчиков, само-

свалов, бульдозеров, которые могут перевозить до 20 000 м<sup>3</sup> горной породы в сутки. Входные данные для модели: количество самосвалов, экскаваторов, бульдозеров. Немаловажными были и технические характеристики транспортных единиц: дневной или месячный план выработки горной породы, грузоподъемность самосвалов, скорость перевозки груза, количество рейсов за смену, объем вскрышной породы, среднее время выполнения каждой операции, длина маршрута. Для экскаваторов были заданы параметры: емкость ковша, средняя скорость добычи горной породы, среднее время загрузки одного самосвала. Кроме того, в качестве входных данных для имитационной модели использовались такие данные:

– ежемесячная добыча горных пород составляет 30 000 т;

– самосвалы останавливаются на 5–10 с при каждом пересечении дорожной сети;

– скорость самосвала составляет 15 км/час.

Руда из карьера на обогатительную фабрику доставляется по крытому ленточному конвейеру. После обработки на фабрике обогащенная руда доставляется на железнодорожную станцию. Перевалка медной руды организована отдельным маневровым локомотивом. Фронтальный погрузчик на станции загружает вагоны с рудой, которые доставляются потребителям руды.

Логика имитационной модели приведена на рис. 2. В блоке Create, который в модели называется «Cycle for truck start», генерируются сущности, имитирующие водителей самосвалов. В модели приведены процессы: Loading – загрузка самосвала; Unloading – разгрузка самосвала.

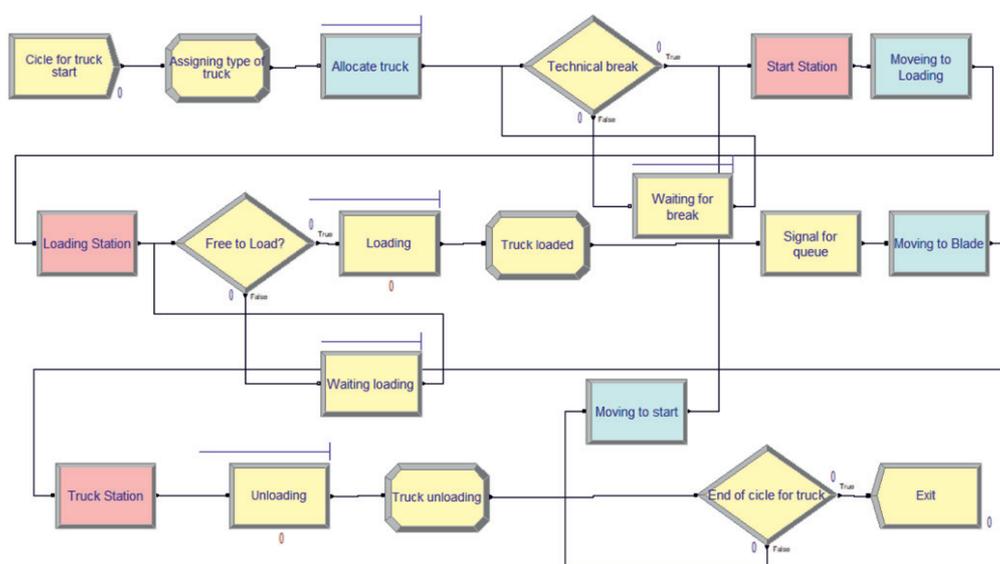


Рис. 2. Логика имитационной модели транспортных потоков рудника

– одновременная взрывная обработка 10 различных мест на горе;

– медные породы транспортируются из карьера на 15-тонных самосвалах;

– грузоподъемность 15-тонного самосвала 8,3 м<sup>3</sup>;

– горные породы загружаются в самосвалы экскаваторами;

– время, необходимое для загрузки медных пород в самосвал – 3,81 мин;

– время, необходимое для разгрузки горных пород на обогатительной фабрике – 3 мин;

– время, необходимое для разгрузки горных пород на месте захоронения, составляет 30 с;

В блоках Assign описываются атрибуты транспортных средств. Для самосвала: загруженный или пустой; объем перевозимой породы; количество ездки за смену и другие. Для процесса загрузки горной породы в самосвал организован стек, в котором проверяется занятость экскаваторов погрузкой и возможность обслуживания следующего подехавшего самосвала.

Для визуализации транспортных потоков в Арене применялись транспортеры – самосвалы, для которых были описаны спиралевидные дистанции, соединяющие места загрузки и выгрузки самосвалов [13–15]. Самосвалы выполняют маятниковые маршруты по карьеру от станции Loading до стан-

ции Blade. Станция Start выполняет роль технической площадки, на которой водители самосвалов начинают рабочую смену. Анимационная часть модели разрабатывалась с помощью панели Animate Transfer. Она позволяет установить положение ключевых мест остановки транспортеров – станций (Station), на которых реализуются основные процессы. Кроме того, были определены траектории передвижения самосвалов в карьере с помощью дистанций (Distance), а само транспортное средство было описано функциональным блоком Transporter. Для большей реалистичности в модель добавлена фотография карьера, на фоне которой и была размещена анимационная часть модели.

**Результаты исследования и их обсуждение**

Выходные данные (таблица), полученные в отчетах модели, позволили выявить: минимальную, максимальную и среднюю производительность транспортных средств, число ездов самосвала за смену, общий объем породы, перевозимый всеми самосвалами за смену, время регламентированных и нерегламентированных простоев, а также длину очереди на каждой операции.

Данные имитационного эксперимента показали, что коэффициент занятости самосвалов на карьере варьируется от 75% в ночное время до 86% в дневное время; бульдозеров 82–93%; экскаваторов 85–92% (рис. 3). Простои транспортных средств происходят отчасти по техническим причинам: подготовка забоя, расчистка путей к грузовому фронту, маневрирование техники. В среднем на них приходится от 4,2% до 5,1% рабочего времени.

Непредусмотренные простои возникают из-за плохой видимости, неблагоприятных погодных условий, экстренных поломок оборудования, а также нарушений трудовой дисциплины. Простои техники, связанные с рабочими, происходят чаще в ночные смены и составляют около десяти процентов времени. При безотказной работе двенадцати самосвалов суммарная производительность системы зависит в основном от расстояния между карьером и отвалами. При длине маршрута менее километра производительность системы около 10–11 тыс. м<sup>3</sup>, когда длина маршрута составляет около 2 км, производительность снижается до 4–6 тыс. м<sup>3</sup> в сутки.

Процент занятости и простоев техники

Время, в %	Самосвал		Бульдозер		Экскаватор	
	Среднее	Макс.	Среднее	Макс.	Среднее	Макс.
Время работы	75	86	82	93	85	92
Ожидание	17	31	3,0	2,5	3,1	21
Время ремонта	3,4	6,7	7,1	7,9	8,2	9,6
Время простоев	4,6	5,2	7,9	8,4	3,7	4,5

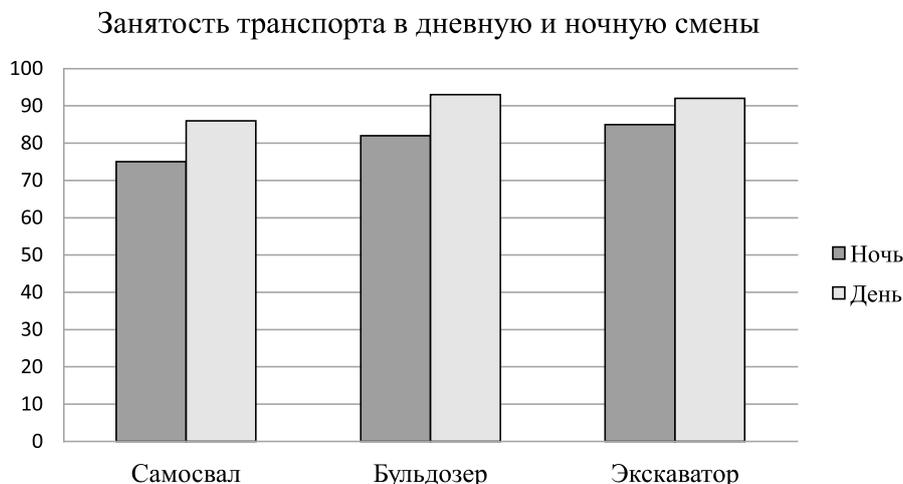


Рис. 3. Изменение занятости транспортных средств днем и ночью

### Заключение

Имитационная модель помогает определить оптимальные маршруты самосвалов, общую производительность предприятия, количество самосвалов, бульдозеров и экскаваторов для выполнения суточного производственного плана. Получив данные о частоте выходов из строя производственной техники, можно эффективнее контролировать транспортировку горных пород. Имитационное моделирование дает возможность прогнозировать свои производства, своевременно вносить коррективы в работу системы, управляя количеством машин, траекториями маршрутов, а значит, и сроками выполнения поставок. Для оптимизации транспортных потоков на предприятии мы рекомендуем выполнять регулярный мониторинг производственного плана, сравнивать его с фактическими возможностями предприятия, которые зависят от количества исправных единиц транспорта в системе и нерегламентируемых простоев рабочих и техники. При выходе из строя до двух самосвалов выполнение плана может быть реализовано путем сокращения длины маршрута от забоя до отвалов с помощью устройства временных съездов с верхних уступов карьера. При большем числе неисправной техники решением проблемы может стать аренда самосвалов, приобретение новых машин и оборудования.

На основании сравнения альтернативных вариантов имитационного эксперимента по моделированию транспортных потоков горнодобывающего предприятия были предложены альтернативы производственной деятельности карьера: 1) при нехватке самосвалов брать недостающие машины в аренду; 2) обходиться собственными транспортными средствами, устраивая более короткие траектории доставки руды – съезды. Внедрение рекомендаций по оптимизации транспортных потоков на карьере поможет повысить надежность выполнения производственного плана. Внедрение результатов имитационного эксперимента в практику работы карьера обеспечит выполнение поставок медной руды в срок, поможет контролировать и сократить простои рабочих, машин и оборудования минимум на 8,5%, поскольку мониторинг транспортных потоков предприятия, выявление и контроль мест падения производительности системы приведут к сокращению длительности простоев оборудования и машин, что

приведет к снижению производственных затрат, улучшит рыночные позиции горнодобывающего предприятия, обеспечит своевременное выполнение контрактов.

### Список литературы

1. Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А., Холодов Я.А., Шамрай Н.Б. Введение в математическое моделирование транспортных потоков. М.: МЦНМО, 2013. 427 с.
2. Мазурин Д.С. Комплексная методика моделирования транспортных систем на основе моделей динамического распределения потоков // Труды ИСА РАН. 2017. № 67. С. 3–12.
3. Павленко П.Ф. Моделирование системы адаптивного управления транспортными потоками // Наука, техника и образование. 2015. № 7 (13). С. 34–37.
4. Алиев А.С., Стрельников А.И., Швецов В.И., Шершевский Ю.З. Моделирование транспортных потоков в крупном городе с применением к московской агломерации // Автоматика и телемеханика. 2005. № 11. С. 113–125.
5. Аристов А.О. Модели организации движения транспортных потоков на основе дискретных структур // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 12. С. 662–675.
6. Гусева Е.Н. Математическое и имитационное моделирование. Электронное издание. Магнитогорск, 2017. [Электронный ресурс]. URL: <http://catalog.inforeg.ru/inet/GetEzineByID/314581> (дата обращения: 12.01.2019).
7. Lei Xu, Sheng Ye, Guilin Lu, Zhen Zhang. Modeling and Simulation of the Underground Mining Transportation System. International Conference, CFSM. 2011. P. 116–121. DOI: 10.1007/978-3-642-21802-6\_19.
8. Митюгин В.А., Фролов Н.А. Развитие теорий моделирования транспортных потоков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 6–1. С. 68–76.
9. Зеленина Л.И., Тутыгин Р.А. Моделирование транспортных потоков на основе теории равновесия // Естественные и технические науки. 2016. № 7 (97). С. 78–86.
10. Конохов В.Л. Имитационное моделирование системы подземного транспортирования // Математическое и имитационное моделирование сложных систем. 2010. № 3 (7). С. 43–53.
11. Твердов А.А., Никишичев С.Б., Жура А.В. Современные системы транспортировки полезных ископаемых и вскрышных пород // Горная промышленность. 2012. № 2. С. 96–100.
12. Журавлев А.Г., Скороходов А.В. Моделирование параметров транспортных систем глубоких карьеров // Черная металлургия. 2015. № 12. С. 22–26.
13. Ефимова И.Ю., Варфоломеева Т.Н. Компьютерное моделирование // Сборник практических работ. М., 2014. 67 р.
14. Guseva E.N., Efimova I.Yu., Varfolomeeva T.N., Movchan I.N. Discrete event simulation modelling of patient service management with Arena/ International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018. IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1015 (2018) [Electronic resource]. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/3/032095/pdf> (date of access: 12.01.2019).
15. Гусева Е.Н. Имитационное моделирование разработки рудника по добыче меди // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2013: Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. Одесса: Черноморье, 2013. Т. 11. № 4. С. 73–76.