

УДК 004.942

## РАСЧЕТ ДОСТАТОЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ПОДЗЕМНОГО МЕДНО-ЦИНКОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Дёмин А.Г. (Санкт-Петербург)

### Предпосылки к созданию модели

Крупные рудники имеют сильную структурную и функциональную связность и параметры их работы трудно поддаются расчету. За последние несколько десятилетий накопился определенный опыт применения методологических подходов и моделей для расчета и оптимизации горнопроходческих систем. По укрупненной классификации — это методы:

- аналитический детерминированный, т.е. расчет по аналитическим формулам;
- аналитический вероятностный, в основном, теория массового обслуживания;
- графический, построение плана-графика работы рудника или графика откатки горизонтов;
- имитационное моделирование.

На практике такие методы не всегда использовались корректно. Существовали разные научные школы, которые могли придерживаться различных, в том числе и противоположных взглядов. Например, параметры больших многоуровневых рудников пытались рассчитывать как простые системы массового обслуживания, хотя в узлах большую роль играет управление техникой.

До сих пор в инструкциях по расчету необходимого числа технологического оборудования в рудниках основу составляют детерминированные формулы, хотя они не могут учесть влияние случайных процессов. Также норму добычи в рудниках определяют по плану-графику, хотя этот метод не отображает случайные процессы, а ведь они существенно влияют на величину межоперационных простоев. Возможные ошибки при применении этих методов достигают существенных величин.

В настоящее время важность корректного применения методов расчета существенно возрастает. Исходя из этого, необходимо выполнить анализ существующих программ и алгоритмов технико-экономического моделирования и оптимизации горнорудных работ.

### Описание бизнес-задачи

Заказчик – российское горно-металлургическое холдинговое предприятие, добывающее широкую гамму ценных металлов.

Основными целями создания имитационной модели (ИМ) являются:

- оптимизация транспортных потоков в рудниках;
- оценка эффективности использования и определение оптимального количества техники;
- оценка производительности рудника.

Созданная модель должна:

- определять оптимальное количество техники каждого типа, ее характеристики и загрузку;
- выявлять потенциальные «узкие места» в существующей схеме работы рудника;
- определять текущую и прогнозируемую загрузку оборудования с учетом типа производства, технологии добычи и задействованных ресурсов, оборудования;
- представлять результаты моделирования в виде анимации процесса, графиков, электронных таблиц;

- выполнять оптимизационные эксперименты для расчета маршрутов на основе входных данных;
- позволять вводить исходные данные, менять критерии оптимизации без применения средств программирования в оперативном режиме на сменный/суточный/недельный горизонты;
- проводить многократные эксперименты с корректировкой параметров согласно актуальным данным о работе рудника, с детализацией до смен, в условиях перемещающихся во времени и пространстве очистных работ;
- обеспечивать возможность автоматизированного обмена данными со специализированными информационными системами (MineShed, Surpac, Deswik, Micromine);
- прогнозировать сценарии развития событий, связанных с поломками, непредвиденными простоями, авариями, отсутствием персонала и т.д.;
- отрабатывать сценарии отказа и плановых остановок оборудования, техники с оценкой их влияния на работу рудника;
- отображать движение горной техники на трехмерной схеме, включая перемещение от мест стоянки до забоя и от забоя до рудоспуска;
- определять наиболее эффективные комбинации ресурсов и процессов, учитывая бюджеты, производительность оборудования, ограничения на рабочие смены, расписание работы оборудования;
- рассчитывать объемы добычи с использованием существующего и перспективного парка оборудования;
- проводить расчет маршрутов транспортировки по существующей транспортной схеме;
- визуализировать работу забоев, движение транспорта, заполненность перегрузочных площадок, движение поездов;

### Эксперименты в модели

Имитационный эксперимент позволяет задавать конфигурационные настройки модели, её параметры. Простой («что, если?») имитационный эксперимент, реализованный в рассматриваемой модели, позволяет инициализировать параметры модели на основе значений, введенных через интерфейс пользователя либо считанных из базы данных. После проведения одной итерации работы модели вычисленные и собранные статистические данные, представляющие выходы модели, отображаются для принятия решения о проведении следующей итерации.

Перед запуском эксперимента в модель загружаются следующие данные:

- атрибуты всех осей горных выработок;
- координаты рудоспусков;
- координаты конвейеров;
- календарный план добычи;
- плотность по подэтажам;
- количество оборудования по годам в шт.;
- характеристики оборудования.

Интерфейс модели позволяет изменить вручную следующие параметры имитационного эксперимента:

- продолжительность моделирования;
- количество машин для бурения камер;
- количество машин для бурения ортов;
- количество шахтных автосамосвалов (ШАС);

- количество погрузочно-доставочных машин (ПДМ);
- норма-часы технического обслуживания (ТО) по каждому виду техники;
- производительность каждой машины.

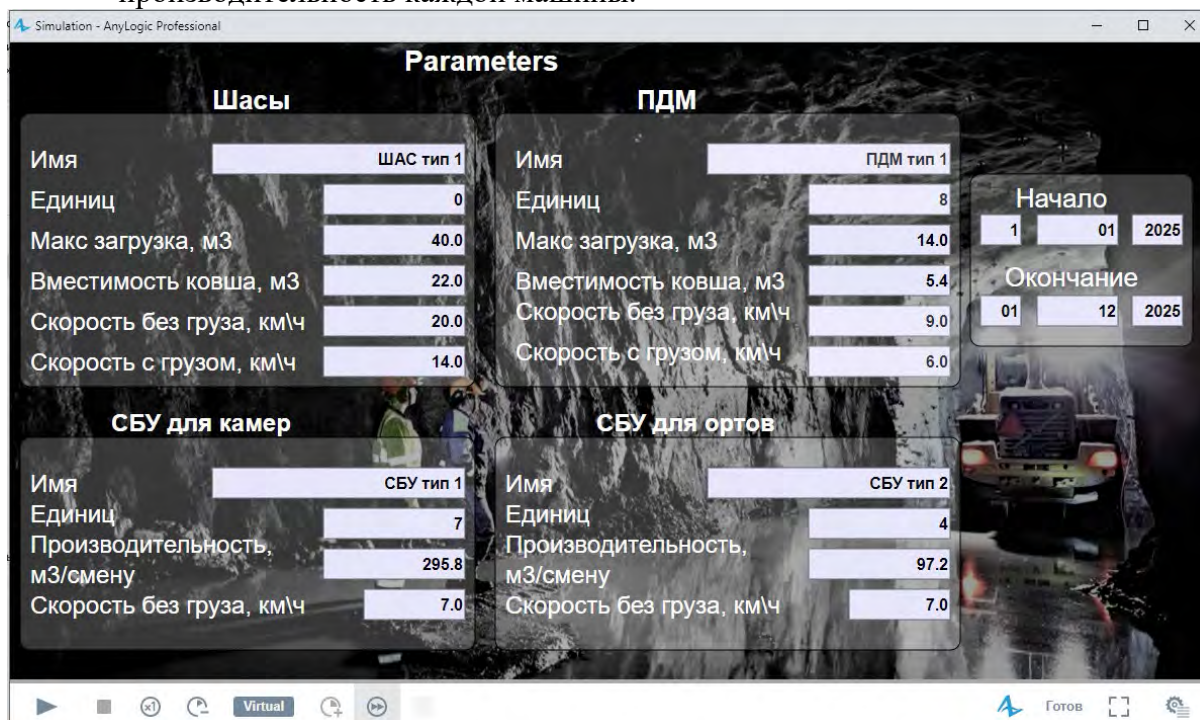


Рис.1. Пример экрана запуска имитационного эксперимента

Результатом работы имитационного эксперимента являются данные, представленные в виде таблицы в формате Excel, со следующими показателями по каждой единице техники:

- минимальная, максимальная и средняя производительность за смену и период моделирования;
- число рейсов за смену и период моделирования;
- тоннаж и объем рудной массы, перевозимый за смену и период моделирования;
- длительность периодов простоя оборудования;
- продолжительность выполнения производственных операций;
- графики зависимости производительности оборудования от длины транспортирования рудной массы по месяцам за период моделирования;
  - добыча (объем и масса) за моделируемый период;
  - статистика движения: пробеги с грузом и порожные, число циклов погрузки/разгрузки, объем перевезенной руды, средний вес и объем руды или породы в ковше;
- продуктивное время работы.

Кроме простого имитационного эксперимента модель так же содержит оптимизационный эксперимент, позволяющий определить оптимальное количество техники для выполнения заданного сценария.

### Структура модели

Модель работает в виде автономного Java-приложения, экспортированного из среды разработки моделей AnyLogic. В основе архитектуры имитационной модели лежат агентный и дискретно-событийный методы моделирования. Оба метода дополняют друг друга, определяя структуру и организацию имитационной модели как

программного продукта, воспроизводящего поведение моделируемой системы во времени.

Типы агентов представляют основные структурные элементы имитационной модели, описывающие подсистемы моделируемой системы:

- конвейерная сеть;
- дорожная сеть;
- подъёмный сосуд, предназначенный для транспортирования породы или руды на поверхность (СКИП);
- точка приема руды;
- точка приема породы;
- точка перегрузки;
- ШАС;
- Самоходная буровая установка (СБУ) по породе;
- СБУ по камере;
- ПДМ;
- рудоспуск.

Помимо классов агентов имитационная модель может включать Java-классы, которые описывают пассивные элементы моделируемой системы, такие как:

- блок породы — определяет характеристики горной массы породы;
- блок камеры — определяет характеристики участка руды при очистке.

Иерархическая модель создается путем добавления в агентов экземпляров других классов агентов. Это позволяет производить декомпозицию модели на любое количество горизонтов детализации. Имитационная модель представляет собой иерархическое дерево активных объектов, вложенных друг в друга.

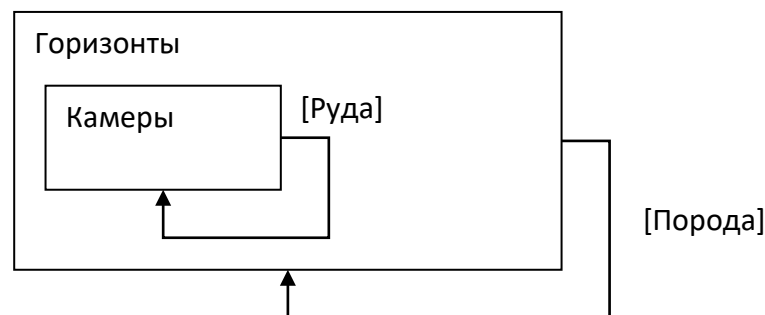


Рис. 2. Иерархия имитационной модели

### Результаты проекта

Разработанная имитационная модель рудника используется на месторождении для:

- прогнозирования и оценки эффективности новых технологических решений;
- анализа текущих и перспективных планов и графиков выполнения работ;
- выявления «узких мест» в транспортных потоках;
- определения скрытых резервов в существующих процессах и транспортных операциях;
- оценки влияния оптимизации (размеров парка оборудования, графиков смен и часов работы, технического обслуживания) на производительность месторождения;
- оценки риска возникновения аварийных ситуаций.

Технология интегрирована в общий процесс проектирования горных объектов.



Рис. 3. Фрагмент 3D-анимации работающей модели

Результатами выполнения проекта стали:

- верифицированная имитационная модель, созданная в соответствии с задачами заказчика, в которых реализована работа самоходного оборудования, рельсового транспорта и скиповых подъемников;
- возможность презентации технологических процессов рудника на 3D и 2D анимации;
- внедренная и переданная на сопровождение система имитационного моделирования;
- обеспечение надежного, контролируемого хранения и восстановления создаваемого исходного кода и наборов данных.

### Литература

1. Черненко В.Е., Малыханов А.А. Дискретно-событийное моделирование горной добычи в подземном калийном руднике // ИММОД-2013. – Казань, 2013.
2. Чудинов Г. В. Опыт разработки системы имитационного моделирования грузопотока в калийных рудниках – ПК «Рудопоток» // ИММОД-2011. – Санкт-Петербург, 2011.
3. Дёмин А.Г. Расчет цепи поставок на новое горнорудное месторождение в сложных условиях с использованием имитационного моделирования // ИММОД-2021. – Санкт-Петербург, 2011.
4. Дёмин А.Г. Производственное планирование на металлургическом предприятии на основе имитационного моделирования // Материалы конф. ИММОД-2019. – Екатеринбург, 2019.
5. Suslov S., Katalevsky D. Modeling and Simulation Toolset // Evolving Toolbox for Complex Project Management. – Auerbach Publications, 2019. – P. 417-450.
6. Суслов С.А. Имитационная модель – уже вполне обычная составная часть логистических проектов // Логистика. – 2012. – № 2.