

---

**ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРНОЙ ДОБЫЧИ  
В ПОДЗЕМНОМ КАЛИЙНОМ РУДНИКЕ****В.Е. Черненко, А.А. Малыханов (ООО «Амальгама»)****Задача моделирования подземного калийного рудника**

В период с мая по август 2013 года компания «Амальгама» разработала имитационную модель подземных калийных рудников для консультационного проекта компании Эрнст энд Янг СНГ Б.В. Имитационная модель создавалась для поиска последовательности выполнения производственных операций, обеспечивающей максимальную производительность горной выработки.

В модели учитывается выработка очистных камер комбайнами, транспортировка самоходными вагонами породы от комбайнов к рудоспускным шахтам, сыпание породы на конвейер и ее транспортировка до скипового подъемника по системе конвейеров и бункеров. Также моделируются горно-подготовительные работы, вспомогательные операции (бурение дегазационных шпуров, установка вентиляции, перенос якоря и т.п.), работа маркшейдеров и техническое обслуживание оборудования по расписанию.

Особенностью моделируемой системы является большое число параметров, нелинейно влияющих на показатели работы всей системы. Так, значительное влияние на объем выработки может оказывать порядок выработки очистных камер, выполнение вспомогательных операций, а также проведение горно-подготовительных работ параллельно с очистными.

Имитационное моделирование уже зарекомендовало себя как эффективный инструмент поддержки принятия решений в горно-добывающей отрасли [1,2], однако существующие решения не удовлетворяли требованиям заказчика ввиду невозможности моделирования всех требуемых аспектов системы.

**Проблема производительности имитационной модели рудника**

В моделируемой системе выделяются два типа процессов:

непрерывные процессы – наполнение и опустошение бункеров, перемещение породы по конвейерам, выработка породы комбайнами;

дискретные процессы – обслуживание оборудования, маршрутизация самоходных вагонов, проведение технологических операций, выполнение ремонтов по расписанию.

Имитационная модель разрабатывалась в многоподходной среде имитационного моделирования AnyLogic 6[3]. Очевидно, что дискретные процессы можно моделировать, используя агентный и дискретно-событийный подходы, а непрерывные – с помощью системной динамики. Однако первые прикидки показали, что моделирование одного года работы рудника (26 комбайнов и 56 конвейеров) при использовании системно-динамических элементов среды AnyLogic займет более 5 часов.

В то же время одним из требований заказчика была возможность проведения сценарного анализа за приемлемое время. Для каждого рудника консультанты Эрнст энд Янг СНГ Б.В. планировали проводить более 500 экспериментов. Поэтому скорость работы модели при использовании системно-динамического подхода была неприемлемо низкой.

В связи с этим было принято решение о моделировании непрерывных процессов только с помощью дискретно-событийного подхода.

### Предложенный подход к моделированию калийного рудника

Моделирование дискретных процессов работы рудника не представляет сложности в среде AnyLogic 6: маршрутизация моделируется с помощью алгоритмов на графах, расписание работ и обслуживание оборудования – с помощью динамических событий.

Основной задачей стало моделирование непрерывных процессов с использованием только дискретно-событийного подхода. Рассмотрим пример системы транспортировки извлекаемой породы (рис. 1).

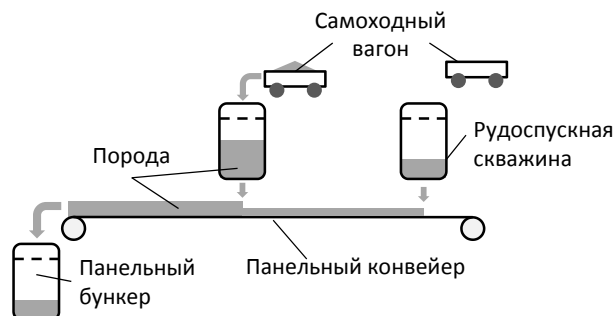


Рис. 1. Пример участка моделируемой системы

Система состоит из бункеров, конвейера и самоходного вагона, периодически подъезжающего к бункеру и ссыпаящего в него породу. Даже в приведенном, простом, примере возможно большое количество различных состояний. Например, при наполнении бункера ссыпание породы из вагона прекращается и возобновляется только после освобождения заданного объема. Рассмотрим такой пример более подробно (рис. 2).

В рассматриваемом примере скорость разгрузки самоходного вагона – 2 т/мин, а скорость разгрузки рудоспускной скважины – 1 т/мин, объем скважины – 20 т, и в начальный момент времени скважина полна. Ситуации А и Б отличаются только уровнем возобновления разгрузки самоходного вагона – 15 т и 14 т соответственно.

В ситуации А разгрузка самоходного вагона начнется через пять минут после его прибытия. Однако еще через 5 минут разгрузка прекратится, так как скважина заполнится. Возобновление разгрузки станет возможным только на 15 минуте и займет еще 1 минуту. Таким образом, полная разгрузка самоходного вагона займет 16 минут.

В ситуации Б из-за снижения уровня возобновления разгрузки опустошение самоходного вагона займет всего 12 минут. Такое различие времени разгрузки самоходного вагона существенно влияет на производительность выработки породы.

Приведенный пример является иллюстрацией одной из сложных и нелинейных зависимостей, которые необходимо моделировать. Также данный пример иллюстрирует идею предложенного подхода к моделированию непрерывных процессов дискретными событиями – расчет ближайшего времени изменения состояния системы и пересчет параметров ее работы в зависимости от событий двух типов:

изменение характера непрерывного процесса (например, окончание ссыпания, переполнение бункера, освобождения объема до уровня начала ссыпания);

наступление событий, порожденных дискретными процессами (например, прибытие самоходного вагона к бункеру или остановка конвейера по расписанию).

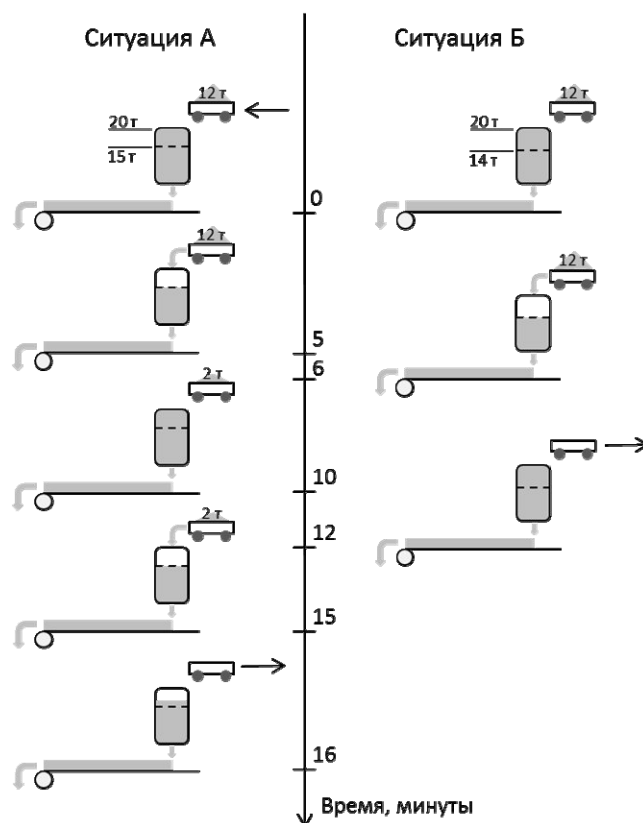


Рис. 2. Пример последовательности событий при разгрузке самоходного вагона

#### Реализация предложенного подхода

Все классы моделируемой подсистемы, участвующие в моделировании непрерывного перемещения породы, могут относиться к следующим типам:

«Источник» – является источником породы, осуществляющим ее разгрузку,

«Приемник» – является приемником породы, принимающим разгружаемую породу.

В среде AnyLogic были реализованы два интерфейса, соответствующих приведенным типам: `Loader` и `Acceptor`. Интерфейс в среде AnyLogic – набор функций, которыми должен обладать класс, реализующий этот интерфейс. Процесс взаимодействия источника и приемника показан на рисунке 3 в виде диаграммы последовательности.

При начале выгрузки породы источник регистрируется у приемника, вызывая функцию `addLoader`. Затем с помощью функции `getMaxLoadingSpeed` источник получает информацию о том, какова максимально возможная скорость выгрузки породы. После этого источник учитывает полученное ограничение, вычисляет фактическую скорость выгрузки и уведомляет об изменении скорости выгрузки приемник, вызывая функцию `onLoadingSpeedChanged`. При изменении условий выгрузки (например, бункер переполнен, и разгрузка возможна только со скоростью выгрузки из бункера) приемник узнает, какова максимальная скорость разгрузки источника с учетом появившихся ограничений, вызывая функцию `getMaxUnloadingSpeed(limit)`. После этого приемник уведомляет источник об изменении скорости выгрузки вызовом функции `onUnloadingSpeedChanged`. При окончании выгрузки породы приемник уведомляется о смене скорости выгрузки на нулевую с помощью функции `onLoadingSpeedChanged`. После этого источник сообщает о покидании приемника, вызывая функцию `removeLoader`.

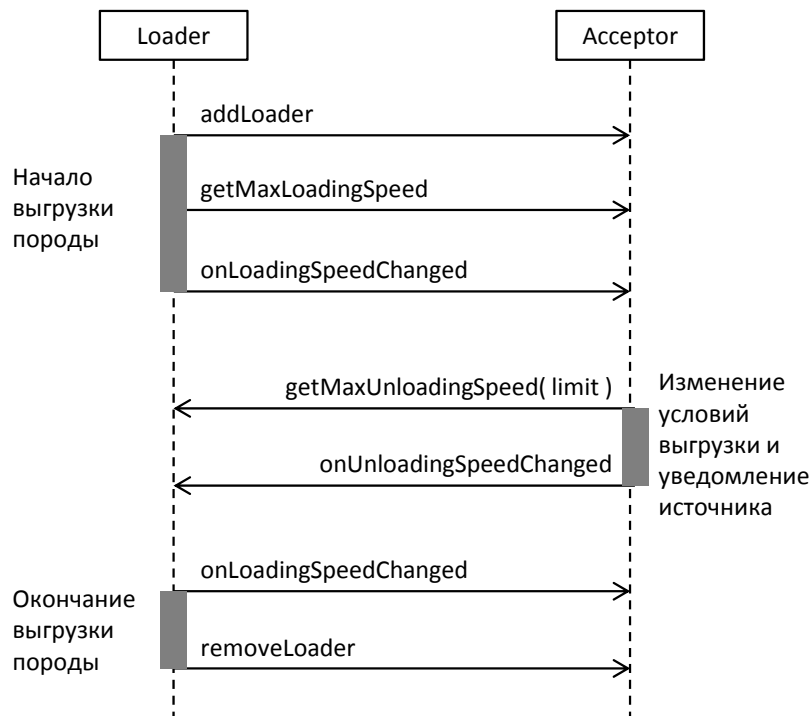


Рис. 3. Диаграмма взаимодействия источника и приемника

Интерфейсы позволили структурировать предметную область и унифицировать процесс взаимодействия элементов модели. При моделировании системы транспортировки руды классы «Конвейер» и «Бункер» реализуют оба интерфейса – «Источник» и «Приемник», а класс «Самоходный вагон» – только интерфейс «Источник».

Класс «Бункер» – один из основных классов разработанной модели калийного рудника. Фрагмент логики работы этого класса в среде AnyLogic показан на рис. 4 в виде диаграммы состояний.

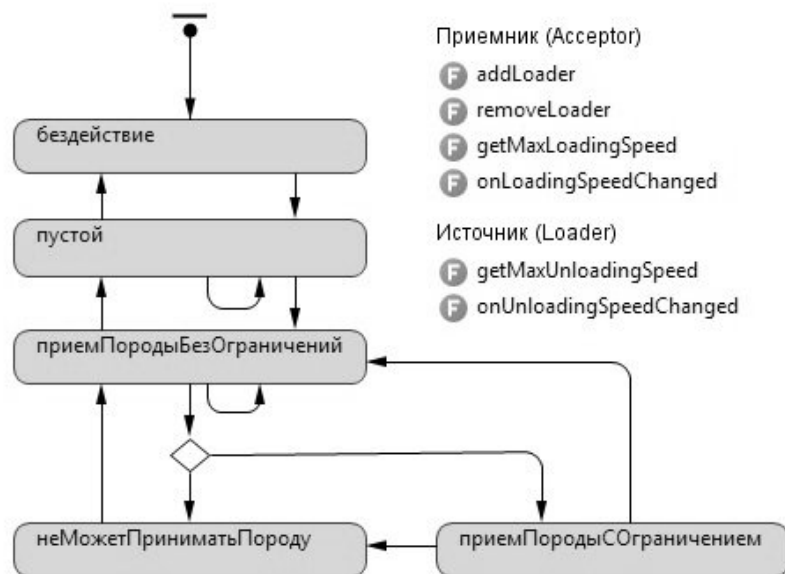


Рис. 4. Фрагмент логики класса «Бункер»

Выводы

Дискретно-событийное моделирование непрерывных процессов работы калийного рудника позволило обеспечить приемлемую производительность модели (1 год модельного времени за 15 минут), что, в свою очередь, позволило успешно провести сценарный анализ в рамках консультационного проекта.

Важным результатом консультационного проекта стали предложения по улучшению процессов горной добычи, обеспечивающие увеличение выработки на 12–15% без вложений в закупку нового оборудования.

Реализация полностью дискретно-событийной модели калийного рудника значительно более трудоемка по сравнению с использованием системной динамики, однако только она позволяет добиться приемлемой производительности без потерь точности моделирования.

Высокая трудоемкость реализации подсистемы транспортировки породы и большая вероятность ее повторного использования обусловили целесообразность разработки библиотеки для моделирования бункерно-конвейерных систем в среде AnyLogic.

### Литература

1. **Чудинов Г.В.** Опыт разработки системы имитационного моделирования грузопотока в калийных рудниках – ПК «Рудопоток» // Имитационное моделирование. Теория и практика: Сб. докл. Пятой юбилейной всероссийской научно-практической конференции ИММОД-2011. Том 2. – СПб.: ОАО «ЦТСС», 2011. – С.311–315.
2. Lei Xu, Sheng Ye, Guilin Lu, Zhen Zhang. Modeling and Simulation of the Underground Mining Transportation System // International Conference, CESM. – 2011. – Pp. 116–121.
3. Многоподходное имитационное моделирование // TheAnyLogicCompany URL: <http://www.anylogic.ru/multimethod-modeling/> (дата обращения: 20.09.2013)