

СОСТАВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ АГЕНТОВ С ЦЕЛЬЮ ПОДДЕРЖАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ДОБЫВАЕМОЙ РУДЫ НА ВХОДЕ ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

С.Е. Левин, А.С. Тихонова, В.Р. Малина, Д.И. Лоскутов,
О.А. Рабинович, О.В. Курпатов (ООО «Динамические системы»)

Описан метод шихтования потока добываемой руды, следующего на аглофабрику. Результат достигается при помощи алгоритма поиска оптимального расписания движения транспортных агентов горнодобывающего производства. Представленное решение использует комбинацию генетического алгоритма и методов имитационного моделирования. Приведены результаты численных экспериментов, демонстрирующие процесс оптимизации шихтования в зависимости от требований производства к концентрации и/или количеству поставляемой на аглофабрику руды.

Ключевые слова: модель, имитационное моделирование, математическое моделирование, оптимизация, расписание, генетический алгоритм, оптимизация управления, шихтование.

Оптимизация работы горнодобывающего предприятия

Авторы статьи опираются на тот факт, что горнодобывающее предприятие заинтересовано в оптимизации процесса производства. Критериями оптимизации могут выступать как наращивание объемов производимого продукта, так и снижение издержек: и то и другое позволяет увеличить чистую прибыль.

В разрезе горнодобывающих предприятий критериями оптимизации, как правило, являются:

- увеличение ежедневного объема добываемой руды;
- уменьшение простоев транспортных средств, которые участвуют в перемещении руды по системе шахт;
- поддержание концентрации добываемой руды на некотором конкретном уровне, что важно для последующего процесса обогащения добытого сырья на обогатительной фабрике;
- избавление от промежуточных складов.

Во время вывоза сырья разного качества, забираемое специальными транспортными агентами из различных точек рудника, смешивается в некоторых узлах системы шахт, образуя руду с новой, усредненной концентрацией. Транспортными агентами при этом выступают любые транспортные средства, используемые для перемещения руды. Процесс такого смешивания руды называется шихтованием.

Управлять этим процессом можно путем нахождения оптимального расписания, по которому перемещаются транспортные агенты, также можно влиять на параметры добытой породы на выходе добывающего предприятия, и, соответственно, на входе обогатительного производства.

Традиционно смешивание происходит при погрузке руды с разной концентрацией в одно и то же транспортное средство или на промежуточном складе с принудительным перемешиванием. Шихтование, осуществляемое в процессе транспортировки руды при помощи транспортных агентов, позволяет обойтись без промежуточных складов, тем самым оптимизируя затраты на производстве.

Моделирование производственного процесса

Производственные процессы обладают сложной внутренней структурой, строгое математическое описание которой составляет отдельную трудоемкую задачу. Существуют разные подходы к математическому моделированию,

такие как статистические модели, описания системы в виде аналитических уравнений (в том числе дифференциальных с запаздыванием), нейронные сети и др.

Использовать для моделирования шихтования аналитические уравнения не всегда возможно, так как не все зависимости внутри производства поддаются формальному математическому описанию. Нейронные сети, широко распространенные в последнее время, также не будут эффективны, так как в данном случае крайне важно иметь возможность осознанно влиять на моделируемые процессы добычи руды. Из-за работы по принципу черного ящика алгоритмы на основе нейронных сетей не представляют такой возможности.

Поэтому в ходе решения задачи оптимизации для горнодобывающего производства выбрано имитационное моделирование [1-4] как инструмент построения функции приспособленности [5].

Имитационная модель – это логико-математическое описание исследуемого процесса, при котором он представляется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему, не требуя формального определения взаимосвязей между ее частями. Достаточно описать набор событий, которые создаются одними объектами системы, а также «реакцию» других объектов системы на возникновение этих событий.

Примерами таких событий в рамках поставленной задачи являются добыча руды в забое, выгрузка некоторого количества руды в рудоспуск, перемещение руды из одного транспортного средства в другое. При построении модели должны быть учтены особенности физических процессов, лежащих в основе реального производства, включая факторы, влияющие на добычу руды. Созданная модель может быть проиграна во времени столько раз, сколько потребуется, что позволяет использовать ее выход в качестве функции приспособленности («фитнес»-функции) при решении задачи оптимизации процесса шихтования.

Имитационная модель, описывающая процесс транспортировки руды, позволяет, во-первых, рассчитать итоговое количество и качество добытой руды, которая отправляется на аглофабрику, во-вторых, может являться основой для проведения экспериментов с расписанием, призванных ответить на вопрос, как изменится результат добычи руды при изменении расписания.

Модель описывает каждый из процессов горнодобывающего предприятия: начиная от забоя с известной концентрацией добываемой руды, перемещаемой транспортными средствами, такими как погрузочно-доставочные машины, шахтные автосамосвалы, вагонетки, проходя через конвейерные системы, дробильные установки, руда в конечном итоге выходит к вагонам поездов, следующих на аглофабрику.

Каждый из процессов в модели имеет свое отдельное логико-математическое описание, а также описание взаимодействия друг с другом. Это означает, что на каждом этапе возможно наблюдать за перемещением руды, зная, какие ее концентрация и количество находятся на данном участке системы шахт, что позволяет сделать прогноз о том, какие именно показатели руды будут на выходе в конкретный момент времени, и в некоторой степени решает проблему информированности о свойствах поступающей руды.

Составление оптимального расписания движения транспортных агентов

Большинство существующих методов оптимизации требуют аналитическое представление зависимости выходных данных от входа, а некоторые также накладывают требование гладкости на оптимизируемую функцию [6]. Так как для описания процесса производства было выбрано имитационное моделирование, аналитическая зависимость параметров руды на выходе модели от расписания, поступающего на вход, не описана. Эвристические алгоритмы не накладывают требований на оптимизируемую функцию, кроме ее существования в каждой точке пространства поиска решения [5], поэтому для построения оптимального расписания выбран генетический алгоритм (рис. 1).

Решаемая задача должна быть формализована таким образом, чтобы её можно было закодировать в виде вектора генов, где каждый ген является некоторым объектом. В качестве гена рассматривается расписание для конкретного транспортного агента. Расписанием является последовательность задач, выполняемая транспортом при перемещении руды. Задача – это операция, включающая забор руды с одного узла, ее транспортировку на другой узел и выгрузку на нем. Таким образом необходимо оптимизировать последовательность узлов погрузки и выгрузки руды.

В работе были использованы следующие критерии оптимальности.

1. Минимизация отклонения от плана производства концентрации руды и ее объема на выходе ($\min_divergence$):

$$f(x) = - amount_{div}^2 - \left(\frac{amount_{plan}}{conc_{plan}}\right)^2 * conc_{div}^2.$$

Здесь $amount_{div}$ – отклонение от планового объема руды, $amount_{plan}$ – плановый объем руды, $conc_{div}$ – отклонение от требования на качество руды, $conc_{plan}$ – плановая концентрация руды.

2. Максимизация объема добываемой руды при соблюдении требований к ее концентрации (\max_amount):

$$f(x) = amount_{fact} - \left(\frac{amount_{plan}}{conc_{accept\ div}}\right) * conc_{div}.$$

Здесь $amount_{fact}$ – фактический объем руды, полученный за смену, $conc_{accept\ div}$ – максимально допустимое отклонение концентрации от плана.

3. Максимизация смен, в течение которых можно получить требуемое производством количество и качество руды (\max_days):

$$f(x) = e^{days} - conc_{last}.$$

Здесь $days$ – число дней, в течение которых удалось соблюсти требования производства на качество и объем руды, а $conc_{last}$ – концентрация в последнюю смену. Последнее слагаемое необходимо для лучшей сходимости алгоритма.

Гибридный алгоритм как средство оптимизации работы предприятия по добыче руды

Описанные генетический алгоритм и метод имитационного моделирования являются решениями поставленных задач оптимизации и математического описания производственных процессов соответственно. Однако использование каждого из методов по-отдельности не удовлетворяет запросам оптимизации процесса шихтования руды. Поэтому было принято решение объединить их в гибридный алгоритм, включающий в качестве модулей оба этих решения. На рис. 2 схематично изображена работа гибридного алгоритма.

Совместное использование математической модели, описывающей процесс производства, и алгоритма поиска оптимального расписания позволит подобрать план смены по добыче породы таким образом, чтобы выполнить требования к отгружаемой за рабочую смену руде.

Для этого модель производства должна, в том числе описывать функцию, включающую величину отклонения от требований на добычу руды («фитнес»-функцию). Эта

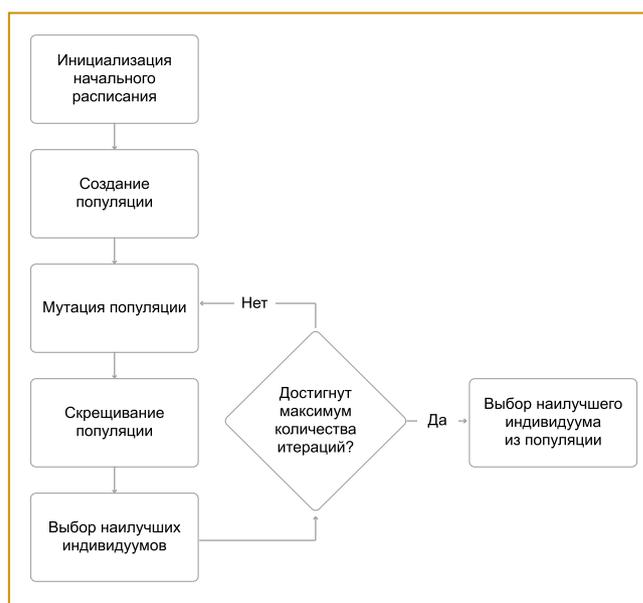


Рис. 1. Шаги генетического алгоритма

функция будет использоваться алгоритмом поиска расписания в качестве критерия оптимальности. Алгоритм оптимизации в свою очередь передает в модель производства сгенерированные расписания, которые по результатам моделирования позволяют получить информацию о параметрах добытого сырья на выходе, соответствующую данному расписанию. Эти параметры сравниваются с требованиями производства, вычисляется отклонение фактических (с точки зрения моделирования) показателей от плановых, на основании этого отклонения строится функция приспособленности.

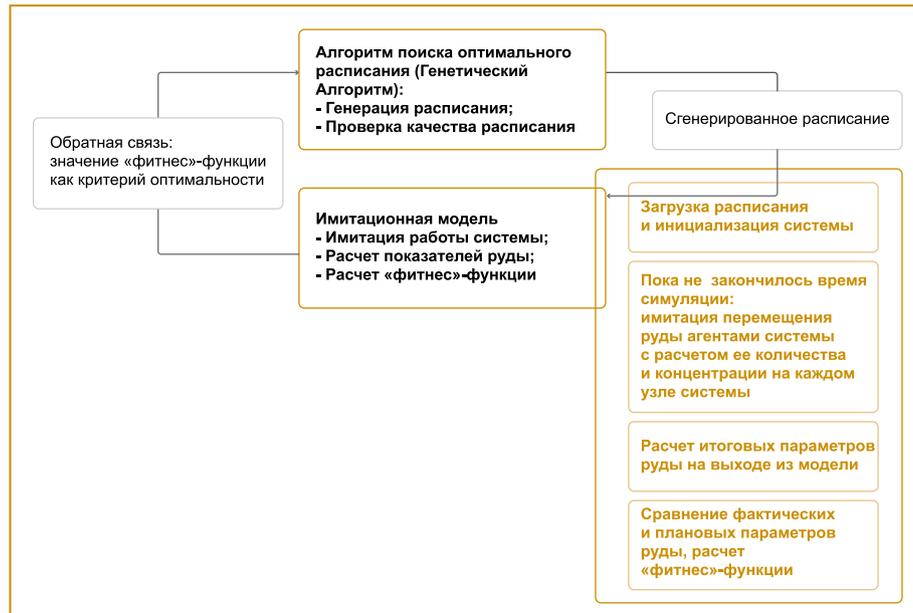


Рис. 2. Схема комплексной работы алгоритма поиска оптимального расписания и имитационной модели

Реализация имитационной модели

В статье представлена имитационная модель, описывающая процесс шихтования на реальном руднике, где осуществляется добыча фосфатов. Модель разработана на базе математической библиотеки MADA, входящей в состав программной платформы PhoenixDS (<https://www.dynasystems.ru>). Часть этой модели представлена на рис. 3.

Рудник представляет собой группу забоев, от которых по системе шахт руда доставляется до одного из четырех выходов, являющихся центральными рудоспусками. В качестве элементов системы были созданы следующие компоненты.

- Забой – склад, на котором происходит добыча руды с определенной скоростью. Каждый забой характеризуется

некоторой концентрацией породы, свойственной данному участку рудника, некоторым пределом объема руды, доступного для добычи на данном участке, и пределом вместимости склада, на котором хранится сырье до момента транспортировки в следующие узлы системы. В качестве примера реализации забоя с помощью среды разработки Simulink Matlab приведен рис. 4.

- Погрузочно-доставочная машина (ПДМ) – вид транспортной техники, которая может самостоятельно загружать и выгружать руду и транспортировать ее между узлами системы. Характеризуется объемом вмещаемой руды, скоростью погрузки, разгрузки и средним временем перемещения между узлами системы.

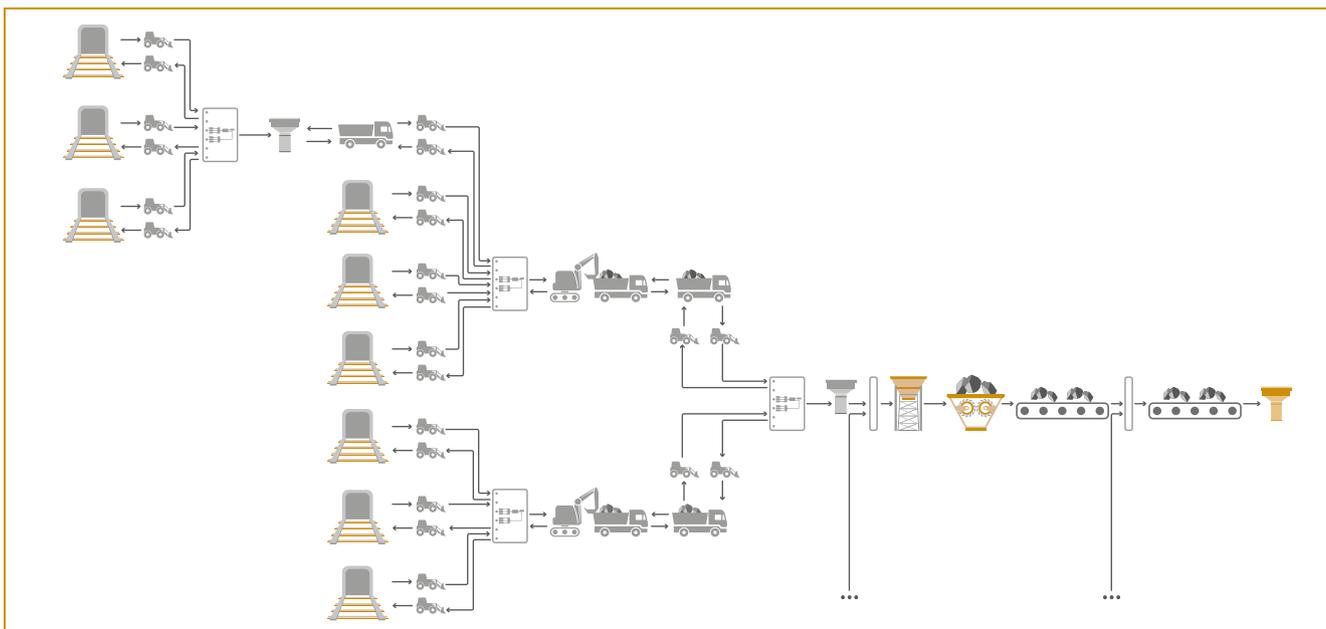


Рис. 3. Схема одной из частей имитационной модели горно-добывающего рудника

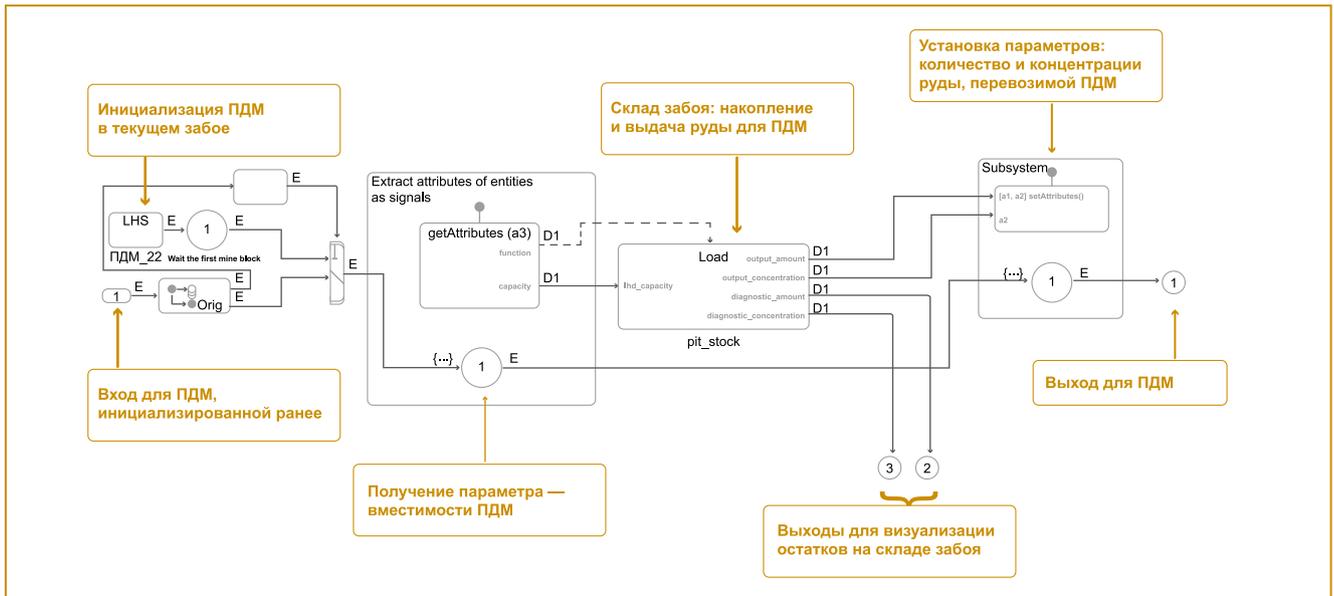


Рис. 4. Логико-математическое описание Забоя в программе Simulink Matlab

- Вагонетка – вид транспортной техники, обладающей большой вместительностью, способной перемещать руду между узлами системы. Для загрузки и разгрузки требуются вспомогательные устройства. Считаем, что в вагонетке происходит смешивание руды с разной концентрацией. Характеризуется объемом вмещаемой руды и средним временем перемещения между узлами системы.

- Шахтный автосамосвал (ШАС) – вид транспортной техники, способный перемещать руду между узлами системы, а также разгружать сырье. Для загрузки в ШАС необходимо вспомогательное устройство. Считаем, что в ШАС происходит смешивание руды с разной концентрацией. Характеризуется объемом вмещаемой руды, скоростью выгрузки и средним временем перемещения между узлами системы.

- Вибрационное доставочно-погрузочное устройство (ВДПУ) – устройство погрузки в транспортную технику, которая не может выполнять загрузку руды самостоятельно. Характеризуется своей пропускной способностью, то есть скоростью погрузки.

- Опрокид – устройство разгрузки для транспортных средств, не способных разгружать руду самостоятельно. Характеризуется своей пропускной способностью.

- Рудоспуск – горная выработка, предназначенная для транспортировки руды под собственным весом из одного узла системы в другой, находящийся ниже. Характеризуется своей пропускной способностью и максимальной вместительностью.

- Конвейер – устройство транспортировки руды между узлами системы. Характеризуется своей пропускной способностью и максимальной вместительностью.

- Бункер дробилки – устройство передачи руды в дробилку. Характеризуется своей пропускной способностью и максимальной вместительностью.

- Дробилка – устройство измельчения больших кусков породы. Характеризуется своей пропускной способностью и максимальной вместительностью.

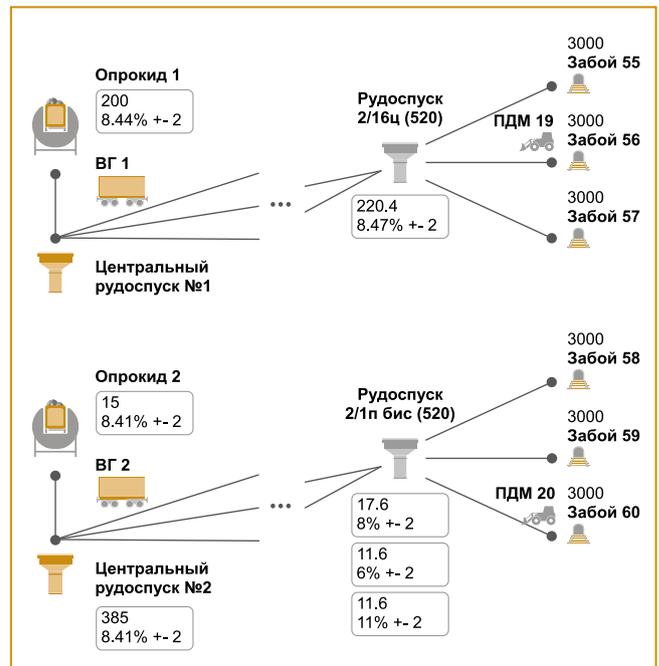


Рис. 5. Демонстрация модели системы шахт рудника.

Модель описывает схему движения руды от каждого места подрыва породы (забоя) до выхода к поездам до обогатительной фабрики, соответствующую реально существующей системе шахт. Модель представлена в виде направленного графа с логическими узлами в качестве вершин. Перемещение руды от одного узла до другого выполняется за время, соответствующее параметрам элемента, выполняющего перемещение. На вход модель принимает информацию о:

- начальной конфигурации системы, показывающей, в том числе, в каком узле изначально начинается движение каждый транспортный компонент системы;
- параметры каждого из элементов;
- расписание движения транспортных агентов.

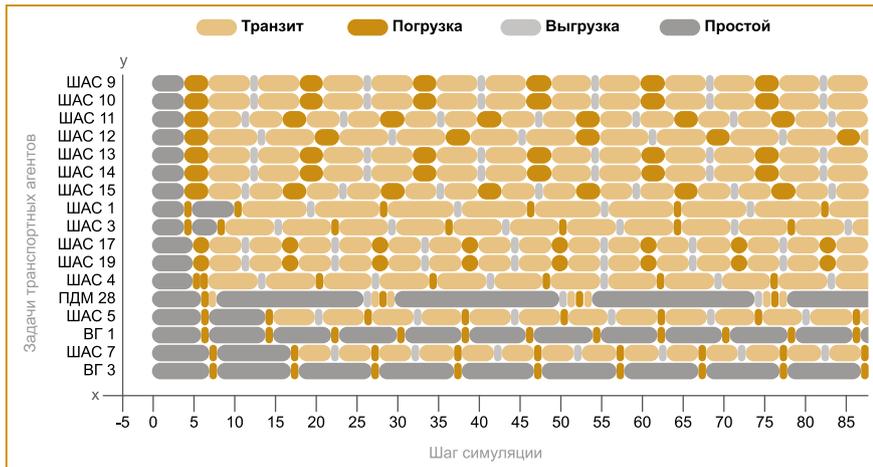


Рис. 6. Оптимальное расписание в виде диаграммы Ганта.

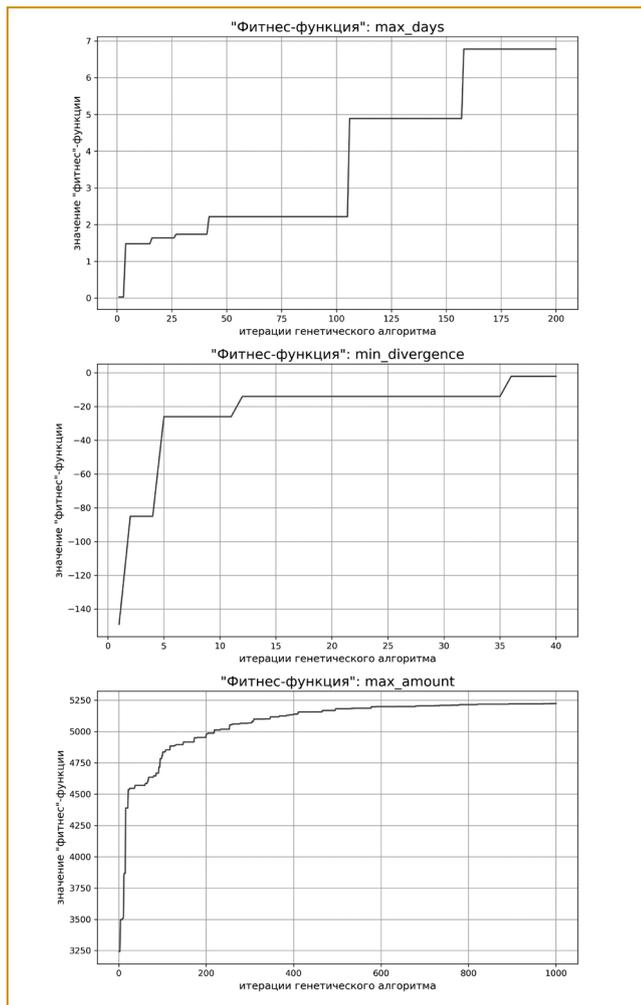


Рис. 7. Графики сходимости «фитнес»-функций:
1) max_days, 2) min_divergence, 3) max_amount

Таблица. Наилучшие параметры для поиска оптимального расписания в зависимости от «фитнес»-функции

| «Фитнес»-функция | Число итераций, ед. | Время расчета, мин |
|------------------|---------------------|--------------------|
| max_days | 200 | 13...20 |
| min_divergence | 40...80 | 3...20 |
| max_amount | 1000 | 45...70 |

На каждом этапе симуляции модель показывает количество и концентрацию руды в каждом логическом элементе системы в соответствии с временем, прошедшим с момента начала симуляции. Схема модели (рис. 5), а также оптимальное расписание в виде диаграммы Ганта (рис. 6) доступны для пользователей в режиме визуализации.

Для проверки корректности работы предложенного решения система добычи руды была независимо смоделирована в среде разработки Simulink Matlab [7]. При сравнении двух реализаций результаты моделирования полностью совпали.

Результаты поиска оптимального расписания

Число итераций генетического алгоритма выбирается в зависимости от «фитнес»-функций (таблица). Графики роста «фитнес»-функций для каждого из критериев оптимизации представлены на рис. 7. В результате экспериментов были найдены варианты расписания, позволяющего увеличить объем добываемой руды до 10% от необходимого плана при сохранении требований на концентрацию добываемого сырья. Оптимальное расписание отображается в виде диаграммы Ганта в режиме визуализации.

Заключение

Предложенное решение контролирует поток руды, следующий на аглофабрику, что позволяет выполнять шихтование на колесах без применения складов усреднения. Продукт позволяет в динамике наблюдать за процессом симуляции движения агентов. Таким образом обеспечивается возможность визуально оценить непротиворечивость и качество предложенного расписания.

Генетический алгоритм и имитационное моделирование, примененные по отдельности, не дают необходимых производственных результатов. Гибридное решение позволяет добиться увеличения производственных мощностей для горнодобывающих предприятий. Отметим, что данное решение может быть использовано для оптимизации работы других производств, элементы которых подчиняются заранее заданному расписанию, например при:

- 1) проектировании и анализе работы транспортных систем: аэропортов, автомагистралей, портов и пр.;
- 2) проектировании и анализе производственных систем: металлургия, нефтехимия, угольная промышленность и пр.

В ходе работы был создан продукт на базе математической библиотеки MADA (<https://www.dynasystems.ru>), который предлагает пользователю самостоятельно задать настройки запуска, такие как характеристики транспортных объектов, цели расписания, требования производства. Пользователь может рассчитать параметры добываемой руды в конце смены в зависимости от начальной конфигурации и построить оптимальное расписание,

в соответствии с которым будут перемещаться транспортные агенты. Поддерживаются различные критерии оптимизации, а также существует возможность добавления новых критериев, учитывающих специфику конкретного производства.

Приведенное решение позволило описать и оптимизировать процесс добычи фосфатов на примере реального производства. Численные эксперименты показали возможность построения расписания, которое в зависимости от требований позволяет как увеличить количество добываемого сырья на величину до 10% от плана при соблюдении требуемого качества, так и максимально соответствовать (с отклонением до 0,5%) заданному плану на количество и концентрацию руды. Продукт обеспечивает нахождение оптимального расписания, в том числе при отсутствии в логистической производственной цепочке складов усреднения, что дает возможность существенно снизить производственные затраты.

Список литературы

1. Рыжиков Ю. И. Имитационное моделирование и теория очередей. СПб: ФГУП ЦНИИТ, 2007, 47-57с.
2. Эльберг М. С., Цыганков Н. С. Имитационное моделирование: учеб. пособие, Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017, 128с.
3. Строгалев В. П., Толкачева И. О. Имитационное моделирование. М.: МГТУ им. Баумана, 2008, 697-737с.
4. Черняков М. К. Моделирование и проектирование производственных процессов и систем, Новосибирск: НГТУ, 2020, 94с.
5. Емельянов В. В., Курейчик В. В. и Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования, Москва: Физматлит, 2003, 432с.
6. Васильев Ф. П. Методы оптимизации, Москва: МНЦМО, 2011.
7. Цисарь И. Ф. Matlab Simulink. Компьютерное моделирование экономики, М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008.

Лоскутов Дмитрий Игоревич — магистр, старший инженер-математик, Тихонова Анна Сергеевна — магистр, инженер-математик, Малина Владислава Родославовна — бакалавр, инженер-математик, Рабинович Олег Александрович — руководитель подразделения R&D, Левин Самуэль Евгеньевич — д-р физ.-мат. наук, генеральный директор, Курпатов Олег Викторович — д-р техн. наук, первый зам. генерального директора, ООО «Динамические системы».