

О МОДЕЛЯХ И МЕТОДАХ ОПТИМИЗАЦИИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.М. Валуев

Московский государственный горный университет
Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 6, МГГУ.
E-mail: valuev.online@gmail.com

Ключевые слова: задачи управления, методы оптимизации, планирование, природно-технологические комплексы, горная промышленность

Аннотация: В докладе рассматриваются характерные черты и типы задач управления горнопромышленными системами как природно-технологическими комплексами. Анализируются важные для управления особенности процессов горного производства: протекание в нестационарной качественно и количественно неоднородной природной среде, многоуровневость и комплексная взаимозависимость задач управления ими. Выделяется смешанный, дискретно-непрерывный характер задач управления в отношении переменных управления и состояния и времени, обосновывается применение формализма гибридных систем и декомпозиционного построения методов оптимизации. Рассмотрен опыт решения задач управления воздухораспределением на шахтах, перспективного и оперативного планирования открытых горных работ и нерешенные проблемы в этой области.

1. Введение

Сфера горного производства отличается от большинства других сфер хозяйственной деятельности, во-первых, общими чертами функционирования природно-технологических комплексов (ПТК), во-вторых, индивидуальными особенностями (в т.ч. особенностями подземной и открытой добычи полезных ископаемых).

В отношении первой группы особенностей отметим протекание процессов в неоднородной природной среде, информация о характеристиках которой не отличается высокой точностью. Отсюда следует, что линейные модели, вполне адекватные для других приложений теории управления, для ПТК заведомо вносят высокую ошибку и могут совершенно не соответствовать существу моделируемых процессов. В то же самое время, нелинейные зависимости в задачах управления в силу грубости исходной информации должны быть основаны на сравнительно простых формах аппроксимации рядов данных. Следует подчеркнуть, что зачастую наиболее важным вопросом является представление *качественной* неоднородности и нестационарности природной среды. Отсюда вытекает, что управляемые процессы в ПТК наиболее естественно рассматривать как *гибридные системы*.

Собственные особенности горного производства состоят, прежде всего, в их привязке к необратимо изменяющейся в результате производственных процессов среде. В

частности, при открытой добыче полезных ископаемых ее пространственные элементы могут проходить последовательность состояний: нетронутый массив горных пород – область ведения горно-капитальных, добычных, вскрышных работ – выработанное пространство – область внутреннего отвалообразования – рекультивированная территория. Все эти изменения касаются не только условий для собственно извлечения горных пород или отвалообразования, но и транспортирования горной массы. В этом смысле в подавляющем большинстве случаев задачи планирования горного производства должны быть динамическими (и, в наибольшей общности, учитывающими не только количественную, но и качественную динамику работ).

Кроме того, так или иначе, нужно принять во внимание иерархичность, многоуровневость производственных процессов и управления ими – черту, которая в таком масштабе не проявляется в обрабатывающей промышленности. Решения задач планирования с меньшим временным горизонтом по необходимости привязываются к тем параметрам производственной системы, которые определяются на больших временных горизонтах. Например, транспортные процессы – организуемые в малом временном масштабе – привязываются к средствам их осуществления, например, капитальным траншеям (на карьерах) или транспортным штрекам и стволам (на шахтах), которые служат долгие годы. А с другой стороны, возможность проведения (проходки) таких выработок в определенные плановые сроки зависит от горных работ за период, предшествующий этим срокам. Кроме взаимосвязи задач управления по вертикали существуют и горизонтальные связи. Например, планирование очистных работ связано с управлением шахтной вентиляционной системой (ШВС) и другими системами жизнеобеспечения.

Наконец, характер решений имеет смешанный дискретно-непрерывный характер. Например, обуренный блок горной массы за короткое время подготовки и осуществления массового взрыва обращается в развал взорванной породы. В результате выбора границ такого блока и даты взрыва изменяются текущие границы ведения горных работ. В то же время экскавация этого развала занимает несколько недель и ее планирование ведется по коротким временным промежуткам (обычно сменам) в объемах – непрерывных переменных.

Все перечисленные особенности делают актуальным развитие специализированных подходов к построению и расчету моделей управления процессами горного производства. И действительно, существуют и применяются около полувека некоторые специальные постановки задач оптимизации и методы их решения. К этой области относятся, например, оптимизационные методы определения конечных границ открытой разработки на основе применения специализированных вариантов динамического программирования к блочным моделям месторождения и карьера [1-3]. Данные методы имеют строгое обоснование. Большинство методов этого рода, однако, относятся к области инженерной математики и представляют собой лишь эвристики. Даже показывая приемлемые результаты при решении частных задач, они не могут быть перенесены на другие, при том, что разнообразие таких задач весьма велико.

Вместе с тем можно отметить тот благоприятный факт, что комбинаторная природа некоторых задач управления в горной отрасли не приводит к тому необозримому множеству вариантов, который имеет место в задачах теории расписаний. Кроме того, размерность задач в отношении непрерывных переменных хотя и может быть довольно высока, но отнюдь не превышает возможности современных реализаций методов оптимизации.

В силу этого существует большая потребность в развитии специализированных методов теории управления на основе модификации и комбинации методов более универсального характера, ориентированных на решение целых классов возникающих задач с учетом их принципиальных особенностей. На это указывает, в частности, то, что после

длительного периода односторонней ориентации на человеко-машинный диалог (иначе говоря, на поддержанный компьютерными средствами «метод проб и ошибок») на недавних международных научных форумах проявился интерес к развитию методов смешанного целочисленного программирования [4]. В настоящем докладе основное внимание привлекается к опыту решения характерных типов задач управления процессами горного производства, как в работах автора и его коллег, так и в некоторых промышленных программных комплексах моделирования и планирования горного производства.

2. Задачи и методы управления шахтными вентиляционными системами

В данной области решаются задачи управления:

- a) оперативного управления воздухораспределением [5];
- b) управления развитием ШВС в соответствии с планом развития горных работ [6];
- c) управления стационарным режимом ШВС [7].

Рассмотрим последнюю задачу.

Воздухораспределение в шахтной вентиляционной системе (ШВС), т.е. значения величин расхода воздуха (с учетом направления) на дугах сети, $q_j, j \in J$, подчиняется системе сетевых уравнений Кирхгофа первого и второго рода

$$(1) \quad \sum_{i \in \Gamma^+(j)} q_i - \sum_{i \in \Gamma^-(j)} q_i = 0, \quad j \in J,$$

$$(2) \quad - \sum_{i \in I(k)} (r_i q_i | q_i |) + \sum_{i \in I(k) \cap L} (H_i(q_i, u_i)) = 0, \quad k \in K,$$

где K — множество независимых контуров, L — множество дуг, содержащих главные вентиляторные установки (ГВ). Управляемыми величинами служат: 1) сопротивления ветвей из множества $R \subset J$, содержащих регуляторы расхода воздуха (РРВ), и 2) управляемые параметры ГВ $u_i, i \in L$, подчиняющиеся соответственно ограничениям

$$(3) \quad 0 < r_{\min j} \leq r_j \leq r_{\max j}, \quad j \in R, \quad u_{\min i} \leq u_i \leq u_{\max i}, \quad i \in L.$$

Целями регулирования ШВС являются: 1) обеспечение требуемого проветривания, при котором величины расхода воздуха в ветвях-потребителях ($i \in P$) лежат в заданных пределах; и заданы направления потоков воздуха в некоторых дугах, потенциальных диагоналях ($i \in D$), обеспечивающие отсутствие запрещенного последовательного проветривания; т.е. выполнение условий

$$(4) \quad 0 \leq q_i, \quad i \in D, \quad q_{\min i} \leq q_i \leq q_{\max i}, \quad i \in P,$$

и 2) минимум суммарной потребляемой ГВ мощности. В связи с этим рассматриваются две задачи определения значений величин $r_j, j \in R, u_i, i \in L$, подчиняющихся ограничениям (3). Первая задача – минимизировать максимальную невязку в ограничениях (4), вторая – минимизировать суммарную мощность

$$(5) \quad \sum_{i \in L} N_i(q_i, u_i) \rightarrow \min$$

при условии соблюдения условий (3), (4). Вторая задача решается в том случае, если из решения первой задачи получены значения параметров регулирования и соответствующее им воздухораспределение, для которых выполнены все ограничения (суммарная невязка сведена к нулю).

Предложенный в [7] метод решения задачи можно рассматривать как специфический вариант метода возможных направлений для задачи с ограничениями-неравенствами, считая сетевые уравнения лишь средством задания функций, описы-

вающих ограничения, в виде неявных зависимостей от переменных управления. Более точно, однако, рассматривать этот метод как гибридный, сочетающий черты метода возможных направлений и метода проекции градиента. При таком представлении работа метода идет в пространстве векторов, составленных из всех переменных управления и значений расхода воздуха в ветвях сети. Сетевые уравнения задают в этом пространстве поверхность S , причем точки любой касательной гиперплоскости задаются величинами, число которых равно количеству переменных управления (можно считать, что эти величины — приращения переменных управления относительно точки касания). В касательной гиперплоскости решается задача определения направления спуска по типу метода возможных направлений и делается шаг в направлении спуска. Затем делается шаг в данном направлении (градиентная фаза) и полученная точка гиперплоскости проецируется на поверхность S (фаза восстановления связей). Операция проектирования есть не что иное как расчет воздухораспределения при заданных значениях параметров — переменных управления. Такая двухфазная схема повторяется на каждой итерации. Метод соответствует общей схеме, изложенной в статье [8]. Преимущество такого описания метода заключается в том, что могут быть рассмотрены варианты, когда операция проектирования выполняется приближенно, с контролируемой точностью, зависящей от близости к точке оптимума.

С помощью описанного метода решались серии задач регулирования для различных моментов времени для ряда шахт Донбасса. Размерности задач: число вентиляторов 1, 2 и 4, число потребителей воздуха 16-30, число ветвей сети 390-470. При решении первой задачи до нуля удавалось уменьшить максимальную невязку порой при начальном ее значении 2-3 куб. м/с. При решении второй задачи удается за 3-5 итераций уменьшить расчетную потребляемую мощность на 1-3%.

3. Задачи и методы проектирования и перспективного планирования открытых горных работ

3.1. Возможности и ограничения дискретных моделей

Дискретные модели имеют бесспорную применимость как средства предварительной оценки таких важнейших характеристик, как конечные границы и конечная глубина открытой разработки, а возможно, и производственная мощность проектируемого карьера. Могут быть предварительно решены такие вопросы, целесообразно ли отрабатывать месторождение одним или несколькими карьерами и с какой глубины карьер может распадаться на несколько котлованов. Дискретная форма модели позволяет формальным образом, без использования человеческой интуиции и опыта породить такие варианты. Методы динамического программирования для решения таких задач известны давно [1-3] и реализованы в промышленных программных комплексах, в т.ч. самых новых [9].

Однако все получаемые решения опираются лишь на информации о форме залежи (отдельных пластов или рудных тел), качестве полезного ископаемого, а также физико-механических свойствах пород. Последние определяют возможную крутизну бортов и тем самым — возможную форму карьера, а также энергозатраты по циклу горных работ, а первые — ценность полезного ископаемого, которое будет извлечено за весь срок разработки при определенных конечных границах. На основании этих данных блокам, на которые делится массив горных пород, присваивается определенная экономическая оценка — положительная для рудных блоков и отрицательная для породных. Задача состоит в поиске устойчивой конфигурации борта в конечном положении, для которого

суммарная ценность блоков внутри него максимальна. Однако оценки блоков являются весьма условными – затраты на транспортные работы не могут быть с приемлемой точностью оценены без знания расположения транспортных коммуникаций и отвалов, в т.ч. внутренних. Сама возможность проведения требуемых путей транспортирования никак не вытекает из полученного решения. Наконец, разновременность затрат тем более никак не учитывается.

Поэтому рациональная организация принятия таких проектных решений включает последующую детализацию предварительного проекта, позволяющего существенно уточнить оценки блоков. Однако при повторении расчета конечных границ с новыми оценками новое решение может существенно отличаться от предыдущего.

В отличие от такого полезного, но сугубо предварительного принятия решения по отработке месторождения без каких-либо предварительных соображений о форме карьера применение дискретных методов при текущем и оперативном планировании предлагает бесспорно реализуемые решения. В этом случае вместо абстрактных прямоугольных блоков выбираются блоки, привязанные к текущему положению горных работ и соответственно искривленные. Но тем самым существенным образом сокращается набор плановых вариантов, а полученное решение может оказаться весьма далеким от оптимального.

Представляется, что дискретные модели, но иного типа, могут быть наиболее приемлемы в условиях средних и малых карьеров небольшой глубины. В этом случае многочисленные экскаваторы или иные выемочные машины работают практически независимо друг от друга и соответственно имеют много вариантов отработки своего участка. В этом случае не имеет смысла использовать искривленные блоки, т.к. набор возможных вариантов мало зависит от предыдущего положения горных работ. Условие транспортной доступности в этом случае мало связано с кривизной границ выработанного пространства (о чем речь пойдет ниже), зато требует, чтобы к вогнутым участкам границ вели достаточно широкие проходы. Способ представления таких ограничений в задачах оптимизации на блочной модели далеко не очевиден, требуется работа в этом направлении.

Вместе с тем нужно отметить, что формальные методы поиска как бы оптимальных – по отношению к некоторым вручную задаваемым приоритетам – контуров отработки для сравнительно непродолжительных (в сравнении с периодом отработки месторождения) этапов реализованы в некоторых промышленных программных комплексах. Однако полученные решения страдают тем же недостатком, что и рассчитанные по блочной модели конечные контуры карьера, – большинство технологических ограничений в них никак не учтены. Соответственно, ликвидация их нарушений требует ручного исправления, что во многом обесценивает результаты такой формальной оптимизации.

Наконец, протекание технологических процессов, в т.ч. и как результат определенных алгоритмов оперативного управления, может быть промоделировано на блочных моделях [10].

3.2. Модели в непрерывных переменных и методы оптимизации для них

Поиск принципиальных рациональных вариантов открытой разработки, о которых шла речь выше не может быть сведен к решению каких-либо задач в непрерывных переменных, и таким образом, описанные выше задачи оптимизации на блочной модели залежи и карьера играют важную роль. Однако более детальная проработка найденных вариантов, и в первую очередь решение вопроса о транспортировании руды и вскрышных пород, требует моделей, представляющих возможные конфигурации карьера с учетом применяемых технологий открытых горных работ, для чего дискретные модели

мало подходят. Вопрос организации транспортирования затрагивает и работы по экскавации горной массы, поскольку горизонтальные или слабо наклонные площадки, на которых располагаются экскаваторы, служат также для перевозки горной массы, соответственно их форма должна обеспечивать такую возможность для выбранного вида транспорта.

Здесь возможны два подхода. Первый, перспективный, но систематически не применявшийся, основан на погоризонтном описании формы карьера без привязки к какому-либо варианту направления развития горных работ. В самом принципиальном виде эта форма может быть охарактеризована следующей квазидинамической системой

$$(6) \quad dx_l / ds = \cos \varphi_l, \quad dy_l / ds = \sin \varphi_l, \quad d\varphi_l / ds = k_l,$$

$$(7) \quad x_l(S_l) = x_l(0), \quad y_l(S_l) = y_l(0), \quad \varphi_l(S_l) = \varphi_l(0),$$

$$(8) \quad |k_l| \leq R_{\min}^{-1},$$

$$(9) \quad \rho(x_l(s), y_l(s); x_l(s'), y_l(s')) \geq g, \quad s, s' \in [0, S_l], \quad |s - s'| \geq \pi R_{\min},$$

$$(10) \quad \rho(x_l(s), y_l(s); x_{l+1}(s'), y_{l+1}(s')) \geq d_l, \quad s \in [0, S_l], \quad s' \in [0, S_{l+1}], \quad l = 1, \dots, L-1.$$

характеризующей набор бровок уступов в горизонтальной проекции – гладких несамопересекающихся линий ограниченной кривизны, не превышающей R_{\min}^{-1} и не образующих петель ширины менее g , таких, что между l -й и $(l+1)$ -й линией имеется площадка ширины не менее d_l (это расстояние складывается из горизонтальной проекции откоса уступа и ширины горизонтальной площадки). Конечномерная аппроксимация такой системы путем представления линий в виде замкнутых ломаных [11] позволяет приближенно свести задачу оптимизации на модели (6)-(10) к задаче нелинейного программирования с квазидинамической структурой ограничений, позволяющей [12, 13] применять декомпозиционные методы типа [14], разработанные первоначально для оптимизации динамических систем с дискретных временем. Эта возможность была успешно продемонстрирована [15] на примере оптимизации этапных контуров для Экибастузского месторождения для варианта его разработки одним карьером в соответствии с проектом [16]. Важно подчеркнуть своеобразие структуры соотношений конечномерной задачи: – количество аппроксимированных ограничений (9), (10) квадратично зависит от размерности вектора управления, что требует применения специальных приемов. Следует отметить также, что при расчетах залегание угля было представлено чрезвычайно укрупненно, в виде границ укрупненных пластов, без учета качества.

Препятствием для дальнейшего развития данного подхода является с одной стороны, характер принятия управленческих решений относительно развития горных работ, которые в современных условиях редко затрагивают период более нескольких лет. Для этих случаев приемлемым является и описанное ниже секторное представление положений горных работ.

В плане его реализации препятствиями являются, прежде всего, сложности в использовании модели залежи, которая должна быть приведена к адекватному уровню детализации, а с другой стороны, качественная разнородность природной среды. В частности, значения d_l , в модели (5)-(10) зависящие только от номера уступа, т.е. от глубины, в действительности могут зависеть, причем не обязательно непрерывным образом, от всех трех координат. Кроме того, что особенно для условий нагорных карьеров, контуры на отдельных уступах могут оказываться незамкнутыми. Все эти соображения говорят в пользу разработки моделей более сложной, гибридной структуры, где переключения отдельных элементов, в отличие от обычных гибридных систем, происходят не во времени, а в пространстве.

В общем случае, такая событийно-переключаемая система (СПС) представляет собой набор взаимосвязанных подсистем, описываемых однопараметрическими семейств-

вами векторов состояния, причем область определения каждого параметра $t^{(r)}$ разбивается на сегменты $[T^{(r)}(k^{(r)} - 1), T^{(r)}(k^{(r)})]$, на которых описывается системой обыкновенным дифференциальным уравнением относительно $t^{(r)}$,

$$dx^{(r)}(t^{(r)}, k^{(r)})/dt^{(r)} = f^{(r)}(d^{(r)}(k^{(r)}), x^{(r)}(t^{(r)}, k^{(r)}), u^{(r)}(t^{(r)}, k^{(r)})),$$

а границы сегментов определяются условиями переключений – достижения фазовым вектором $x^{(r)}(t^{(r)}, k^{(r)})$ одного из групп многообразий переключения –

$$r_{i(r,s)}^Y(d^{(r)}(k^{(r)}), x^{(r)}(T^{(r)}(k^{(r)}), k^{(r)}) = 0, \quad s \in S^{(r)}(k^{(r)}),$$

$$r_{i(r,s)}^Y(d^{(r)}(k^{(r)}), x^{(r)}(T^{(r)}(k^{(r)}), k^{(r)}) < 0, \quad s \notin S^{(r)}(k^{(r)}).$$

Переключения приводят к изменениям, в общем случае

$$d^{(r)}(k^{(r)} + 1) = D^{(r)}(S^{(r)}(k^{(r)}), d^{(r)}(k^{(r)}), v^{(r)}(k^{(r)})),$$

$$x^{(r)}(T^{(r)}(k^{(r)}), k^{(r)} + 1) = X^{(r)}(S^{(r)}(k^{(r)}), d^{(r)}, x^{(r)}(T^{(r)}(k^{(r)}), k^{(r)}), v^{(r)}(k^{(r)})).$$

Частный случай однопараметрических СПС — событийно-переключаемые процессы (СПП) — исследован в общем виде, установлены условия оптимальности и предложена общая схема построения методов оптимизации [17, 18]. Ниже рассматривается применение формализации СПП к задачам текущего и оперативного планирования.

Секторное представление положений горных работ было предложено для задач годового планирования И.Б. Табакманом вместе с эвристическим алгоритмом решения таких задач [19] и применялось впоследствии в нашей стране и за рубежом [20-22]. Положение горных работ на каждом уступе описывается посекторно, система секторов может быть разной на разных уступах. Простая модель текущих границ карьера приводится к виду

$$x_{ij} \leq x_{i-1l} + d_{ijl} - D_{i-1}, \quad i = 2, \dots, N, \quad j \in I_0(i), \quad l \in I_1(i, j),$$

$$|x_{ij} - (x_{i, j-1} - L_{ij})| \leq D_0, \quad j \in I_0(i), \quad j > 1, \quad i = 1, \dots, N,$$

где N – количество уступов, $I_0(i)$ – множество секторов i -го уступа, $I_1(i, j)$ – множество секторов $(i-1)$ -го уступа, смежных с j -м сектором i -го уступа, d_{ijl} – положение в верхнем секторе, соответствующее началу в нижнем секторе, L_{ij} – опережение (или отставание) начального положения в $(j-1)$ -ом секторе i -го уступа по отношению к положению в его j -м секторе. Возможны и более сложные модели, явно учитывающие ограничения на кривизну, с нелинейными ограничениями, но по набору аргументов эти ограничения имеют почти те же свойства: в каждое входит не более трех управляемых величин. Структура основного набора ограничений и определяет специфику задач планирования.

Примером применения этого подхода является решение задач оптимизации развития горных работ для сложноструктурного Нерюнгринского угольного месторождения в рамках комплексного исследования по теме: «Разработка и оценка комплексных технологий открытой добычи и сжигания углей при селективной отработке сложноструктурных месторождений Восточной Сибири и Дальнего Востока». Эффект оптимизации оказался весьма значительным, при различных постановках задачи получались совершенно разные решения, что видно из таблиц 1 и 2.

Таблица 1. Результаты решения задач оптимизации развития горных работ для разреза «Нерюнгринский» за период 1999-2003 г.

Задача	Уголь всего, тыс. т	В том числе		Вскрыша, млн. м ³	Золь- ность, %	Кэфф. вскрыши, м ³ /т
		СС	К9			
Максимизация добычи коксуемого угля	41824	21223	20601	36,45	17,38	8,71
Минимизация коэффициента вскрыши	35803	18265	17538	16,96	17,19	4,74
Минимизация вскрыши при заданном объеме угля	38655	19597	19057	23,69	17,29	6,13

Таблица 2. Минимизация отклонения текущего коэффициента вскрыши от среднего в контуре 2000-2003 гг.

К _{вскр} =5,6 м ³ /т							
Год	Уголь всего, тыс. т	В т. ч.		Вскрыша, тыс. м ³	Золь- ность, %	Кэфф. вскрыши, м ³ /т	Подвига- ние фрон- та горных работ, м
		СС	К9				
1	7730	3511	4218	43288	17,16	5,60	97
2	7708	3421	4286	43167	17,51	5,60	87
3	7817	3507	4309	43779	17,60	5,60	98
4	7496	3257	4239	41983	17,50	5,60	98
К _{вскр} =5,8 м ³ /т							
Год	Уголь всего, тыс. т	В т. ч.		Вскрыша, тыс. м ³	Золь- ность, %	Кэфф. вскрыши, м ³ /т	Подвига- ние фрон- та горных работ, м
		СС	К9				
1	8395	3808	4586	48691	17,12	5,80	97
2	8352	3655	4697	48445	17,57	5,80	98
3	8095	3553	4541	46953	17,59	5,80	100
4	8005	3519	4486	69368	17,51	8,67	116

4. Задачи и методы текущего и оперативного планирования открытой угледобычи и смежных процессов

4.1. Модели и методы дискретного оптимального управления

Традиционные задачи текущего и оперативного планирования, прежде всего для крупных карьеров, в наиболее адекватной форме представляют собой задачи дискретного оптимального управления. Плановый период делится на этапы, как правило, одинаковой продолжительности (например, декада или неделя – на сутки или смены). Основными управляемыми переменными являются объемы извлечения горной массы по интервалам $u_i(k)$, а кроме того, объемы отгрузки извлеченной горной массы по направлениям $u_{ij}(k)$ (например, полезного ископаемого, – для отправки потребителям или на склад), если такая дифференциация имеет место [23]. В некоторых случаях необходимо вводить переменные иного рода – пороговые значения основного качественного показателя, определяющие направление отгрузки. В частности, забои могут содержать забалансовую «полукондиционную» руду, которая может быть использована только в смеси с более качественной, и при недостатке последней частично складывается, а частично отправляется на отвал. Наконец, возможно совместное определение параметров процесса добычи и обогащения, например, плотность среды разделения. Переменными

состояния являются суммарные объемы за k этапов, а также состояния складов (объем полезного ископаемого или средние значения его качественных показателей), если они используются.

На основе систематизации результатов проведенных исследований были выполнены классификации моделей – с позиций характерных условий [24-26] и в отношении взаимосвязи критериев и ограничений, выражающих требования к объему и качеству выпускаемой продукции и показатели эффективности [27].

Решение большинства поставленных таким образом задач не представляет существенных сложностей, хотя в силу наличия многих немонотонных зависимостей, характеризующих обрабатываемые запасы полезного ископаемого возможна многоэкстремальность и получение глобального экстремума проблематично. Опыт решения характерных задач такого рода, его вычислительные аспекты затронуты в работе [14].

За ряд лет были сформулированы и решались задачи текущего и оперативного планирования открытой угледобычи для условий различных карьеров. В задаче оперативного планирования для условий разреза «Богатырь» имелось заданное разделение горной массы в угольных блоках на уголь и внутреннюю вскрышу («селекцию»). Задача состояла в «равномеризации» суточной производительности по углю при обеспечении ограничений на зольность в суточных объемах, обеспечении заданного графика профилактик и планово-предупредительных ремонтов экскаваторов и соблюдении плана горных работ за месяц. По сравнению с результатами, полученными при использовании разработанного программного комплекса, основанного на эвристических методах, при оптимизации по методу работы [14] достигалась значительно большая степень равномеризации плана, как по значению критерия, так и по значению максимального отклонения. Так, для плана на август 1991 года пик добычи был снижен на 13,5 тыс. т, или на 10,4% от среднесуточного значения. Вместе с тем традиционная форма задачи дискретного оптимального управления не позволяет выполнять совместную оптимизацию добычных и вспомогательных (профилактических) работ, иначе говоря, варьировать сроки профилактик и планово-предупредительных ремонтов (ППР), которые не были начаты к началу планового месяца. Для решения такой задачи ее нужно формулировать как задачу оптимизации событийно-переключаемого процесса.

Результат решения других задач приведены в таблице 3.

Таблица 3. Заголовок таблицы печатается нежирным шрифтом размером 10 пунктов и при необходимости может быть продолжен на следующей строке с выравниванием по левому и правому краям области печати заголовка.

Тип задачи	Объект	Основные результаты
Оперативное планирование качества углетококов — совместное определение показателей добычи и обогащения	Разрез «Нерюн-гринский»	Обосновано увеличение выхода конечной продукции (концентрата коксующегося угля) на 0,5–1,0%, повышение прибыли системы «карьер — обогатительная фабрика» на 2–4%
Оперативное планирование качества углетококов в комплексе с электростанциями	Разрез «Восточный»	Обосновано увеличение выхода электроэнергии на 1–3% и снижение затрат по всему циклу получения электроэнергии на 2–4%
Обоснования параметров организационной системы «разрез — обогатительная (сортировочная) фабрика»	Разрез «Тугнуйский»	Показано, что в условиях Тугнуйского разреза за счет оперативного планирования нагрузок на экскаваторы возможно снизить колебания по зольности на 44%, а по засоренности видимой породой на 13,7%.
Оптимизации эксплуатационных кондиций на железную руду, поступающую с нескольких рудников	Железорудные карьеры Алжира	Обоснована возможность увеличения использования запасов руды за счет регулирования эксплуатационных кондиций

4.2. Модели событийно-переключаемых процессов в задачах текущего и оперативного планирования

Развитие технологии открытой угледобычи, осмысленный с позиций задач управления в работе [28], а также включение в модель в качестве управляемых, а не заранее назначаемых переменных таких величин, как сроки выполнения планово-предупредительных ремонтов и вспомогательных работ, моменты смены направления отгрузки, переключения режимов секций усреднительных складов и т.п., привело к обобщению формы рассматриваемых моделей. Новая форма модели, учитывающая не только количественную, но и качественную динамику производственной системы, была впервые для задач планирования сформулирована в работе [29] на основе обобщения формы описания переключаемого процесса, предложенной в [30]. Введение нового класса моделей позволило пересмотреть и обобщить ранее выполненную классификацию моделей [31].

Особенность предложенной классификации является то, что все модели сводятся к очень небольшому количеству базовых соотношений, таких, как типовые уравнения динамики для «накопителей» (угольных блоков, секций складов, партии угля в процессе ее формирования), ограничения на взаимное положение горных работ и иных работ, связанных отношениями строгого и нестрогого предшествования, условие распределения производственных (расстановка горных машин, распределение транспортных машин между грузопотоками). Решаемая задача состоит из соотношений модели, целевого функционала и ограничений, связывающих целевые показатели, такие, как объем и качество угля (отдельных товарных сортов). Нет необходимости явно выписывать все модели – построена методика генерации модели по значениям классификационных признаков.

Далее, были развиты вариационные методы анализа таких систем, позволившие установить специфические условия оптимальности (порядка переключений) в форме, близкой к условиям принципа максимума Понтрягина [32]. Вместе с дальнейшим развитием декомпозиционного подхода это позволяет распространить основные конструкции численных методов типа [14] на новый класс задач.

5. Заключение

Представленный в докладе обзор задач управления процессами горного производства, применяемых для их формализации и решения моделей и оптимизационных методов показывает, что для ряда классов задач разработаны адекватные подходы, реализуемые (и уже реализованные) в программных комплексах и отдельных компьютерных программах. Эти подходы и средства их реализации апробированы применительно к условиям ряда горных предприятий, занимающих важное место в горной промышленности России и мира, показали в значительном ряде случаев свою практическую эффективность.

Вместе с тем, в промышленных программных комплексах моделирования и планирования горного производства оптимизационные модели и методы применяются очень ограниченно, и при этом чаще всего не строго обоснованные методы, а эвристики принятия управленческих решений с помощью таких программных средств преобладает низкоуровневый диалог, т.е. по существу метод проб и ошибок, часто в очень обременительном для пользователей виде. Причина здесь лишь отчасти состоит в большей сложности решения нелинейных задач по сравнению с линейными, необходимости

реализовать для их решения целый арсенал методов нелинейной оптимизации (в сравнении с проверенным симплекс-методом) и обеспечить удобные средства для выбора метода, а то и целой последовательности методов.

Другой причиной ограниченного применения оптимизационных моделей является их недостаточная адекватность или недостаточная универсальность, неучет ряда существенных условий сложного и многообразного горного производства. Необходимость вносить вручную поправки к плановым решениям, рассчитанным формальными методами, но на основе грубых моделей, обесценивает практическое значение оптимизационных методов. На наш взгляд лучшим путем постепенного преодоления этого препятствия является развитие моделей, более точно передающих дискретно-непрерывный характер процессов в неоднородной пространственно-временной среде и в то же самое время не настолько сложных, чтобы невозможно было решать на их основе задачи управления. Некоторые направления такого развития были сформулированы в данном докладе.

Список литературы

1. Коробов С.Д. Анализ методов проектирования границ карьеров с использованием ЭВМ // Горный журнал. 1981 № 4. С. 59-62.
2. David M., Dowd P.A., Korobov S.D. Forecasting departure from planning in open pit design and grade control // Proceedings of the XII-th APCOM Symposium. Denver, Colorado, USA, April 1974.
3. Lerchs H., Grossman I.F. Optimum design of open-pit mines // The Canad. mining and metallurg. bull. 1965. Vol. 58, No. 633. P. 47-54.
4. Proceedings of the Twentieth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection MPES 2011 / Ed. by A. Zharmenov, R.Singhal, S.Yefremova. Almaty, October 12–14, 2011. Almaty, 2011. 1859 p.
5. Пучков Л.А., Бахвалов Л.А. Методы и алгоритмы автоматического управления проветриванием угольных шахт. М.: Недра, 1992. 399 с.
6. Ушаков В.К. Математическое моделирование надежности и эффективности шахтных вентиляционных систем. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 1999. 182 с.
7. Валуев А.М., Ушаков В.К. Модель и метод решения задачи оптимального воздухораспределения в шахтной вентиляционной сети // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2008. Т. 12, Вып. 3. С. 454-456.
8. Валуев А.М. Гибридный декомпозиционный метод в задачах оптимизации с ограничениями общего вида // Сб. трудов/ВНИИСИ. Модели и методы оптимизации. М., 1990. С. 10-19.
9. Наговицын О.В., Лукичев С.В., Алисов А.Ю. Решение задач проектирования и планирования открытых горных работ в системе MINEFRAME // Записки Горного института. 2012. Т. 198. С. 49-54.
10. Багров Д.А. Блочная модель карьерного поля при имитационном моделировании горных работ с использованием экскаваторно-автомобильных комплексов оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. №5. С. 76-78.
11. Валуев А. М. Моделирование пространственного распределения горных работ на карьерах: инженерный и аппроксимационный подход // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 1. С. 298-300.
12. Валуев А.М. Комбинированные декомпозиционные схемы для оптимизации динамических и иерархических систем // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2005. Т. 12, Вып. 3. С. 708-711.
13. Валуев А.М. Декомпозиционные методы в задачах управления производством на карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 0В10. С. 151-157.
14. Валуев А.М. Численный метод для многошаговых задач оптимизации с пошаговым вычислением направлений спуска // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1987. Т. 27, № 10. С. 1474-1488.
15. Валуев А.М. О применении дискретного оптимального управления для решения задач определения контуров рабочей зоны карьера // Открытая разработка угольных месторождений: Межвуз. сб. науч. тр. Кемерово, 1987. С. 62–67.

16. Исследовать и обосновать порядок разработки Экибастузского месторождения на длительную перспективу во взаимосвязи со схемой вскрытия рабочих горизонтов и структурами комплексной механизации, провести опытно-промышленную проверку и внедрение предложений на разрезах объединения: Отчет по х/д теме ТО-2-236. Т. 1 / М.И.Варийчук, В.В.Манкевич, В.И.Супрун и др.; рук. П.И. Томаков / НГР 80022226. М.: МГИ, 1982. 191 л.
17. Valuev A.M. Control problem for event-switched processes // *Acta Universitatis Apulensis*. 2005. No. 10. P. 7-18.
18. Валуев А.М. Формализация и вариационный анализ класса гибридных систем, моделирующих переключаемые производственные процессы // Труды 4-й Международной конференции по проблемам управления. Москва, 26-30 января 2009 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2009. С. 116-124.
19. Табакман И.Б. Принципы построения АСУ на карьерах. Ташкент: Фан, 1977. 140 с.
20. Валуев А. М. Метод и программа оптимизации рабочей зоны угольного разреза // Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня. 2003. № 8. 22 с.
21. Табакман И.Б., Турецкий А.З. Имитационно-оптимизационные методы планирования работ в карьерах. Ташкент: Фан, 1991. 116 с.
22. Melamud A., Young D.S. Optimizing Interdependence of Operating Cost // *Proc. of the 24th International Symposium on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industries*. 1993. Vol. 2. P. 75-82.
23. Фрейдина Е.В., Третьяков А.С., Дворникова А.Н. Модели оптимального текущего планирования раздельной добычи технологических сортов полезного ископаемого при совместном их залегании // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1985. №5. С.74-80.
24. Резниченко С.С., Валуев А.М. Моделирование и оптимизация планирования добычных работ и качества полезных ископаемых при комплексном освоении месторождений // Всесоюзная научно-техническая конференция «Технология и техника открытых горных разработок при извлечении полезных ископаемых»: Тезисы докладов. М.: МГИ, 1988. С. 54-59.
25. Фрейдина Е.В., Третьяков А.С., Молотилев С.Г. Методы текущего планирования горных работ на карьерах. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1988.
26. Reznichenko S.S., Valuev A.M. Simulation of mining dynamics for middle- and short-term open pit production planning // *Mine Planning and Equipment Selection: Proceedings of the third international symposium*. Istanbul, 18-20 October 1994. P. 93-97.
27. Кушнир М.А. Организация текущего планирования открытых горных работ в диалоговом режиме. Дис...к.э.н. М.: МГИ, 1989.
28. Истомина В.В., Резниченко С.С. О гибких технологиях добычи и переработки минеральных ресурсов на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 1993. Вып. 5-6. С. 20-24.
29. Valuev A.M. On the substantiation of technological solutions for open pits via production planning simulation // *Mine Planning and Equipment Selection: Proceedings of the fifth international symposium*. Sao Paulo, 22-26 October 1996. P. 91-95.
30. Velichenko V.V. Catastrophe Control Problem // *Fuzzy Logic and Intelligent Technology in Nuclear Science: Proceedings 1st Internat. FLINS Workshop, Mol (Belgium), 14-16 September 1994*. World Scientific. 1994. P. 117-121.
31. Валуев А. М. К унификации моделей внутригодового планирования открытой угледобычи с учетом организационного фактора // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. № 9. С. 37-44.
32. Valuev A.M. A new model of resource planning for optimal project scheduling // *Mathematical Modelling and Analysis*. 2007. Vol. 12, No. 2. P. 255-266.