

## К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ТОПОЛОГИИ СЕТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ШАХТ

*А. Г. Вагонова, докт. экон. наук, С. В. Салли, инж. (г. Днепропетровск, НГУ)*

*Розглянуто економіко-математичну модель вибору доцільного варіанту розвитку вугільної шахти, використання якої дозволить здійснювати обґрунтований вибір основних характеристик способів розкриття і підготовки запасів.*

Для решения задач, связанных с проектированием горных предприятий и их дальнейшим развитием, отечественными учеными еще в 70–80-е годы прошлого столетия были разработаны методы количественной оценки параметров горных предприятий на основе экономико-математического моделирования [1–6]. В те годы оптимизационные модели строились на основе критерия приведенных затрат. Как ограничения вводились требования по обеспечению заданных объемов производства или качества товарной продукции [4–6]. Вопросы закрытия неперспективных шахт, целесообразности поддержания мощности в задачах развития и размещения шахт не рассматривались.

Важность задачи оптимизации параметров вскрытия и подготовки шахтных полей обусловлена не только многообразием функциональных связей между отдельными технологическими звеньями, но и тем обстоятельством, что более 60% общей суммы капитальных затрат, направляемых на поддержание, и 70% – на реконструкцию (новое строительство), составляют затраты на горные работы. Если рассмотреть граф системы оптимизируемых параметров, то блоки, характеризующие вскрытие и подготовку, определяют множество альтернативных вариантов как отдельной шахты, так и всего шахтного фонда региона. Поэтому главным вопросом, возникающим при рассмотрении перспектив развития шахт, является обоснованный выбор основных характеристик способов вскрытия и подготовки, решение которого и является целью настоящей публикации.

Для решения поставленной задачи разработана экономико-математическая модель, основанная на теории графов и методах оптимального программирования. Главная особенность модели – возможность использования для ее решения потоковых алгоритмов стандартными методами.

При обосновании необходимости векторной оптимизации параметров шахт выбор того или иного метода в значительной мере условно предопределен фактором глубины. Это не случайно, так как во многих случаях необходимо исследовать и транспортные, и вентиляционные сети шахт.

Сетевые методы оптимизации в принципе позволяют совместно оптимизировать потоки груза и воздуха. Вместе с тем апробация метода показала, что если горные работы ведутся на одном горизонте и вентиляционные сети шахт, разрабатывающих, например, крутые пласты шахт, достаточно стабильны, то,

как правило, фактор вентиляции не сдерживает необходимый рост добычи. Однако синтез транспортных и вентиляционных потоков вызывает серьезные трудности при построении исходного мультиграфа, а недостаточно высокая сходимость задачи отражается на результате. По этой причине для выделения на исходном мультиграфе частичного подграфа с заданными свойствами предпочтение отдавалось транспортным алгоритмам.

Согласно [3] математическая задача формулируется следующим образом. В  $m$  пунктах (очистных забоях) добывается соответственно  $G_1, G_2, \dots, G_m$  тонн полезного ископаемого, которое требуется доставить в  $n$  пунктов потребления (в технологический комплекс на поверхности). В противоположном направлении – от поверхности к очистным и подготовительным забоям – подается свежий воздух. Исходя из этого, в конкретных горно-геологических и горно-технических условиях предполагается сооружение сети из любых технически оправданных капитальных и подготовительных горных выработок. Эту сеть можно формализовать в терминах теории графов следующим образом: каждой дуге поставить в соответствие горную выработку, а вершине – сопряжение горных выработок. На множество дуг  $B$  должны быть известны функции затрат  $C_{ij}$  (масса дуги) и пропускные способности  $R_{ij}$ . Кроме того, в вершинах  $A$  задаются интенсивности  $d$ . Пунктам производства (очистным забоям) соответствуют положительные интенсивности, пунктам потребления (технологическому комплексу) – отрицательные, перевалочным пунктам (сопряжениям горных выработок, бункерам) – нулевые. При этом в горных выработках возможны следующие варианты:

грузопоток угля  $x^{(1)}$  и поток воздуха  $x^{(2)}$ ;

только поток воздуха  $x^{(2)}$  (вентиляционные выработки);

только грузопоток угля  $x^{(1)}$  (выработки, нейтральные по вентиляции).

Исходя из этого, для каждой выработки задаются пропускные способности по углю  $R_{ij}^{(1)}$  и воздуху  $R_{ij}^{(2)}$  и соответствующие им интенсивности  $D_i^{(1)}$  и  $D_i^{(2)}$ .

Массы дуг будут представлять собой суммарные затраты на проведение, поддержание горной выработки, транспортирование по ней груза, проветривание, кондиционирование воздуха. Затраты на проведение и поддержание выработки в течение всего срока службы шахты зависят от площади ее поперечного сечения  $F$  и вида крепи  $K$ :

$$R_{ijk}^{\text{пр}} + R_{ijk}^{\text{под}} = f_{ijk}^K(F_{ij}).$$

Затраты на транспортирование груза определяются грузопотоком  $x^1$  и видом транспорта:

$$R_{ijk}^{\text{тр}} = \Phi_{ijk}^l(x_{ij}^{(1)}).$$

Затраты на проветривание определяются количеством проходящего по выработкам воздуха  $x^2$  и площадью поперечного сечения выработок  $F$ :

$$R_{ijk}^{\text{в}} = \Phi_{ijk}^k(x_{ij}^{(2)}, F_{ij}).$$

Затраты на кондиционирование рудничного воздуха определяются температурой воздуха  $\theta_j$ , проходящего по выработке, и его дебитом

$$R_{ijk}^{кп} = \eta_{ijk} (\theta_j, x^{(2)}).$$

Поскольку вид транспорта и тип крепи невозможно выразить аналитической зависимостью, для каждой дуги задается несколько сочетаний видов транспорта и крепи  $K$  и, следовательно, вершины  $i$  и  $j$  соединяются несколькими дугами, а исходный граф преобразуется в мультиграф.

Оптимизация параметров вскрытия и подготовки шахтного поля осуществляется для условий каждой конкретной шахты, но с учетом дополнительных ограничений по инвестициям и объему извлекаемых запасов.

С учетом изложенного экономико-математическая модель задачи имеет следующий вид.

Минимизировать функцию цели

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_t [C_{ijkt} x_{ijkt}^{(1)} + K_{ijkt}] \beta_t \rightarrow \min$$

при следующих ограничениях:

по полноте извлечения запасов в  $t$ -м году

$$x_{ijkt}^{(1)} \geq Z_{ijkt} \varepsilon_t;$$

по объему добычи в  $t$ -м году

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_t x_{ijkt}^{(1)} \geq D_t^n;$$

по инвестициям на поддержание мощности

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_t K_{ijkt} y_t \leq K_t;$$

по пропускной способности выработок

$$\sum_{k=1}^p x_{ij}^{(1)} \leq r_{ij}^{(1)}, \quad k = 1, 2, \dots, p;$$

$$\sum_{k=1}^p x_{ij}^{(2)} \leq r_{ij}^{(2)}, \quad k = 1, 2, \dots, p;$$

по непрерывности потоков груза и воздуха

$$\sum_{ij} x_{ijk}^{(1)} - \sum_{ij} x_{ijk}^{(1)} = d_i^{(1)};$$

$$\sum_{ij} x_{ijk}^{(2)} - \sum_{ij} x_{ijk}^{(2)} = d_i^{(2)}.$$

Условные обозначения, принятые в модели:  $C_{ijkt}$  – эксплуатационные затраты на добычу угля;  $K_{ijkt}$  – величина инвестиций на поддержание уровня добычи;  $\beta_t$  – коэффициент дисконтирования;  $Z_{ijkt}$  – балансовые запасы  $i$ -й шахты, подлежащие погашению при  $k$ -м варианте развития в  $t$ -м году  $j$ -го технологического звена;  $\varepsilon_t$  – коэффициент извлечения в  $t$ -м году;  $D_t$  – планируемый объем добычи в  $t$ -м году;  $y_t$  – доля инвестиции по каждому звену в  $t$ -м году;  $K_t$  – допустимый объем инвестиций.

В основу метода исследования на экстремум приведенной выше экономико-математической модели положена идея эволюционного моделирования и случайного поиска с «двойным возвратом» [4].

Выбор оптимальной структуры и параметров поддержания шахтного фонда начинается с установления положения стартовой точки  $X_0$ , которая определяет исходное состояние поисковой системы. Эта точка принимается центром гиперсферы радиуса  $R$ , и с помощью датчика случайных чисел осуществляется реализация  $n$ -мерного случайного вектора. В исследуемой области оптимизируемых параметров определяется случайная точка

$$X_{i+1} = X_i + \theta R_i^m; \quad i = 1, 2, \dots;$$

$$R_i^m = (r_{i1}^m, r_{i2}^m, \dots, r_{in}^m).$$

Если точка  $X_{i+1}$  удовлетворяет ограничениям модели, то она принимается в качестве стартовой. Если же все заданные  $S$  реализаций случайного вектора с проверкой ограничений не привели к успеху, то радиус гиперсферы  $R$  сокращается:

$$R^{m_{j+1}} = R^{m_j} k, \quad j = 0, 1, 2, \dots,$$

где  $k$  – параметр сходимости, устанавливаемый в зависимости от характера ограничений и размеров области поиска ( $k = 0,8 \dots 0,99$ ).

Число случайных проб варьируется в пределах  $15 < S < 35$ . После этого осуществляется следующая серия пробных испытаний случайных точек на новой поверхности гиперсферы сокращенного радиуса. Процесс вариации радиуса гиперсферы продолжается до соблюдения условия

$$R^{m_j} - R^{m_{j+1}} > K_R,$$

где  $K_R$  – критерий длины радиуса гиперсферы.

В противном случае по формуле

$$R^{m_{j+1}} = R^{m_j} / K \quad (j = 1, 2, \dots)$$

строится новая последовательность гиперсфер. При этом для каждого изменения радиуса гиперсферы вычисляют параметры случайных точек, проверяемых по ограничениям задачи. Если в ходе построения  $t$  гиперсфер стартовая точка  $X_0$ , удовлетворяющая заданным ограничениям, не определена,

то из последней  $S$ -й точки, лежащей на поверхности  $t$ -й гиперсферы, в случайном направлении производится «большой шаг»  $L$

$$L^k = (l_1^k, l_2^k, \dots, l_n^k);$$

$$R^k = R^m + L^k, \quad k = 0, 1, \dots, P.$$

Таким образом, полученная случайная точка  $R$  будет центром новой гиперсферы, а, следовательно, и очередного цикла поиска стартовой точки.

Собственно поиск осуществляется после того, как найдена стартовая точка, удовлетворяющая ограничениям. Из указанной точки в случайном направлении производится  $S$  пробных шагов, параметры которых (длина и их число) определяются сложностью функции цели и ограничений. Первый шаг из этой серии, приводящий к изменению функции цели, будет «рабочим», а полученная точка  $X_i$  – стартовой:

$$\tilde{X}_{i+1}, \quad \text{если } F(X_{i+1}) < F(X_i);$$

$$\bar{X}_{i+1}, \quad \text{если } F(X_{i+1}) \geq F(X_i) > F(\bar{X}_{i+1});$$

$$X_i, \quad \text{если } F(\bar{X}_{i+1}) > F(X_i), \quad i = 0, 1, \dots,$$

где  $\tilde{X}_{i+1} = X_i + H_i \theta_i$ ,  $\bar{X}_{i+1} = \tilde{X}_{i+1} - 2H_i \theta_i$ ,  $\theta_i$  – случайный вектор, равномерно распределенный в  $n$ -мерной единичной гиперсфере;  $H_i$  – величина пробного шага.

Если ни один шаг серии случайных проб не приведет к изменению функционала, то длина «малого шага» уменьшается:

$$H_i^{j+1} = H_i^{(j)} k,$$

где  $i=0, 1, 2, \dots$  – номер рабочего шага;  $j=0, 1, 2, \dots$  – номер вариации рабочего шага.

Если  $H_i < k_w$  ( $k_w$  – параметр длины «малого шага»), то из точки  $X_{i+1}$  в случайном направлении производится «большой шаг»

$$X_0 = X_{i+1} + L \theta,$$

где  $L$  – величина «большого шага», размер которого должен быть не меньше 3/4 области оптимизируемых параметров развития шахтного фонда.

Осуществление определенного числа случайных проб при неудачном «малом шаге» в обоих направлениях позволяет системе поиска приобрести глобальные свойства. Последние достигаются за счет того, что, сохраняя некоторое время этот шаг неизменным, система поиска поднимается «по склону» и преодолевает таким образом «хребет» функции цели, после чего с помощью «большого шага» выводится из системы локальных экстремумов в другую случайную область.

Основные этапы подготовки исходной информации для решения поставленной задачи на ЭВМ приведены ниже.

1. Построение по каждой  $i$ -й шахте мультиграфа вскрытия и подготовки шахтного поля. В соответствии с конкретными условиями и наличием сооружений на поверхности устанавливаются различные сочетания вскрываю-

щих и подготавливающих выработок, проведение которых целесообразно для поддержания мощности и развития шахты. На основе полученного набора технически возможных сочетаний горных выработок строится мультиграф, отражающий перспективы развития шахты. При этом ориентация дуг мультиграфа должна соответствовать предполагаемым направлениям движения потоков угля и воздуха.

2. Построение матрицы ориентации, которая является главной информационной базой о топологии сети, так как учитывает ориентацию дуг и последовательность исследования вершин исходного мультиграфа.

Матрица состоит из трех строк и столбцов, число которых равно числу дуг мультиграфа. При этом первая строка определяет порядковую нумерацию дуг, вторая – нумерацию вершин исходящих дуг и третья – нумерацию вершин входящих дуг.

3. Построение информационной матрицы. Она состоит из строк, число которых равно числу вершин. Число столбцов зависит от числа очистных забоев, бункеров, сопряжений, технологического комплекса на поверхности, производительности очистных забоев и потребности их в воздухе.

4. Построение матрицы условий, в которой число столбцов равно числу дуг, а число строк зависит от пропускных способностей дуг по грузу и воздуху, наличия или отсутствия потоков по дугам (отмечается соответственно знаками +1 и 0), сроков поддержания горных выработок.

5. Задание видов крепи, транспортных средств и другого горношахтного оборудования составляется в виде отдельных матриц, элементами которых являются технологические и стоимостные параметры.

6. Формирование возможных вариантов развития шахтного фонда производится на основе альтернативного графа оптимизируемых параметров.

7. Подготовка массива исходных данных и ввод информации в ЭВМ. На этом этапе задаются условия включения в процессе оптимизации поисковой системы «большого» и «малого» шагов, количественные параметры мультиграфа (число вершин и дуг, интенсивности источников, пропускные способности и другие параметры, характеризующие топологию сети).

Процесс оптимизации начинается с определения допустимого варианта развития шахтного фонда. При этом в целевой функции учитываются суммарные текущие издержки и единовременные затраты с учетом фактора времени за весь рассматриваемый период.

## **Выводы**

Определение экономически эффективных направлений воспроизводства фондов представляет собой задачу на отыскание оптимума в системе альтернативных решений, то есть связанную с выбором оптимальных вариантов. Для ее решения наиболее целесообразно использовать дискретные

модели путем замены непрерывных, нелинейных функций некоторой таблицей их значений в выбранных точках.

В соответствии с изложенными предпосылками разработана экономико-математическая модель выбора целесообразного варианта развития угольной шахты, использование которой позволит осуществлять обоснованный выбор основных характеристик способов вскрытия и подготовки запасов.

1. *Авдулов П. В.* Математическое программирование в горной промышленности. – М.: МГИ, 1970. – 279 с.

2. *Астахов А. С.* Линейное программирование в горном деле. – М.: Госгортехиздат, 1964. – 265 с.

3. *Резниченко С. С.* Математическое моделирование в горной промышленности. – М.: Недра, 1981. – 216 с.

4. *Салли В. И.* Экономико-математические методы и модели в планировании и управлении. – К.: Вища школа. – 1991. – 460 с.

5. *Устинов М. И., Набродов М. Н.* Алгоритмизация и программирование задач оптимизации параметров угольных шахт. – М.: Недра, 1971. – 161 с.

6. *Экономико-математическое моделирование в проектировании угольных шахт / А. М. Курносков, М. И. Устинов, И. П. Набродов и др.* – М.: Наука, 1969. – 208 с.