

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВСКРЫТИЯ ШАХТНЫХ ПОЛЕЙ

Брестский государственный технический университет  
г. Брест, Республика Беларусь

Задачу проектирования вскрытия шахтного поля можно сформулировать следующим образом. Построить оптимальную сеть вскрывающих выработок, характеризующихся сечением, креплением, применяемым видом транспорта, грузопотоками, обеспечивающих производственную мощность шахты по руде при минимальных капитальных вложениях и эксплуатационных затратах. Причем выбранный вариант технического решения с экономической точки зрения должен обеспечивать минимум капитальных вложений и текущих эксплуатационных затрат.

Основная идея решения подобных задач сводится к синтезированию оптимальной схемы вскрывающих выработок из общей сети, включающей в себя наиболее полный набор технически допустимых вариантов. Задача синтеза интерпретируется экономико – математической моделью выделения на мультиграфе частичного подграфа, определяющего оптимальную сеть  $G=(Y,V)$  вскрывающих выработок, осуществляющую выполнение необходимых технологических функций с наименьшими затратами [1].

В качестве критерия можно принять следующую целевую функцию

$$\min \sum_{ijk} f_{ijk}(x_{ijk}^1, x_{ijk}^2, \dots, x_{ijk}^n) = \sum_{(ijk) \in V} f_{ijk}(x_{ijk}^1, x_{ijk}^2, \dots, x_{ijk}^n) \quad (1)$$

при ограничениях

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq x_{ijk}^1 \leq r_{ijk}^1 \\ \dots \dots \dots \\ 0 \leq x_{ijk}^n \leq r_{ijk}^n \end{array} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{array}{l} \sum_j \sum_k x_{ijk}^1 - \sum_j \sum_k x_{jik}^1 = 0 \\ \dots \dots \dots \\ \sum_j \sum_k x_{ijk}^n - \sum_j \sum_k x_{jik}^n = 0 \end{array} \right\} i \in \{i / d_i = 0\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{array}{l} \sum_j \sum_k x_{ijk}^1 = d_i^1 \\ \dots \dots \dots \\ \sum_j \sum_k x_{ijk}^n = d_i^n \end{array} \right\} i \in \{i / d_i \neq 0\} \quad (4)$$

где  $x_{ijk}^1, \dots, x_{ijk}^n$  – грузопотоки n-го вида груза (горной массы) для каждой ij-й выработки при k-м варианте сочетания в ней параметров (различные сечения, типы транспорта и т. п.) из общего количества сочетаний K,  $k \in [1, K]$ ;

$r_{ijk}^1, \dots, r_{ijk}^n$  – пропускная способность для n-го вида груза ij-й выработки при k-м сочетании в ней параметров;

$d_i^1, \dots, d_i^n$  – интенсивность (производительность) i-го источника по n-му виду груза.

$f_{ijk}(x_{ijk}^1, \dots, x_{ijk}^n)$  – стоимостная функция, зависящая от потоков  $n$ -го вида груза по  $ij$ -й выработке.

Ограничения (2) определяют условие, что величина грузопотоков  $x_{ijk}^1, \dots, x_{ijk}^n$  не должна превышать соответствующих пропускных способностей  $r_{ijk}^1, \dots, r_{ijk}^n$ .

Ограничения (3) выражают условие непрерывности потока. Для вершин с нулевой интенсивностью  $d_i = 0$  количество входящего в вершину  $i$  потока  $\sum_j \sum_k x_{ijk}$  равно исходящему из нее потоку  $\sum_j \sum_k x_{jik}$ .

Ограничения (4) характеризуют вершины источники ( $d_i > 0$ ) или вершины стоки ( $d_i < 0$ ).

В качестве критерия можно использовать функцию

$$F_i = C_i^{nod} + C_i^{mp} + a(K_i) + E_n (C_i^{np} + C_i^{ob}), \quad (5)$$

где  $C_i^{nod}$  – текущие затраты на поддержание горных выработок;

$C_i^{mp}$  – текущие затраты на перемещение груза (горной массы);

$a(K_i)$  – амортизационные отчисления;

$E_n$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

$C_i^{np}$  – капитальные затраты на проведение горных выработок;

$C_i^{ob}$  – капитальные затраты на приобретение оборудования и его монтаж.

Наиболее распространенным методом решения подобных задач является метод синтеза оптимальной топологии схемы вскрытия на сформированной базисной сети, включающей наиболее полный перечень возможных и технологически допустимых сочетаний фрагментов вскрывающих выработок в геологическом пространстве. Задача синтеза, интерпретируемая экономико-математической моделью (1)–(4), сводится к выделению на мультиграфе оптимального частного подграфа. В качестве критерия оптимальности при этом принимаются экономические критерии: капитальные, текущие, приведенные затраты и т.д. Для реализации модели (1)–(4) разработан метод и алгоритм синтеза сетей, который подробно рассмотрен в работе [2]. Такой подход обладает рядом существенных достоинств, основным из которых является получение комплексного решения, позволяющего выявить не только оптимальный подграф, но и технические характеристики вскрывающих выработок (сечение, грузопотоки, вид транспорта). Но с точки зрения авторов данной статьи такой подход не обеспечивает получение строго оптимального решения, так как формирование мультиграфа производится субъективно и в значительной мере зависит от опыта и квалификации проектировщика. Практически построение мультиграфа это операция не свойственная проектировщику, требующая от него значительных трудозатрат, знаний и навыков, не сочетающихся с его профессиональной деятельностью. Кроме того, вследствие принятия ложного варианта формирования мультиграфа или исключения из рассмотрения оптимального варианта, что является более вероятным, вся эффективность оптимизационных расчетов может свестись к нулю и привести к значительным перерасходам денежных средств. Очевидно, что данные причины и являются основным камнем преткновения для практического внедрения данного метода.

Исключить данное противоречие в какой-то мере позволяет использование методологии территориально-рассредоточенных систем. Основной и, очевидно, неоспори-

мый тезис, который должен быть положен в основу построения мультиграфа, является утверждение, что структура мультиграфа должна определяться в первую очередь объективными причинами, и прежде всего пространственным распределением запасов полезного ископаемого в недрах, а не зависеть от субъективных факторов. Только в этом случае удастся избежать ошибок в проектировании вскрытия шахтных полей. Так как распределение запасов полезного ископаемого имеет жесткую координатную привязку, то к решению данной задачи можно применить методологию территориально-рассредоточенных систем. Причем использование методологии территориально-рассредоточенных систем ни в коей мере не противоречит возможности применения в дальнейшем рассмотренного выше метода синтезирования оптимальной сети вскрывающих выработок, а лишь позволяет построить научно обоснованную оптимальную структуру мультиграфа, для дальнейшего получения оптимального решения.

Предлагаемая авторами идея формирования мультиграфа базируется на ряде утверждений.

1. В отработку должны быть вовлечены разведанные запасы месторождения, что предопределяет их предварительный подсчет по данным разведочного бурения;

2. Формирование мультиграфа сети вскрывающих выработок должно базироваться на результатах оценки и подсчета запасов, однозначно определяющих местоположение, объемы и качественные характеристики горной массы, подлежащей отработке;

3. Основным критерием при формировании мультиграфа сети вскрывающих выработок является обеспечение минимального суммарного расстояния между рудными блоками, подлежащими отработке и выемке. То есть топология мультиграфа сети вскрывающих выработок должна соответствовать минимуму значений сумм длин ребер мультиграфа, что обеспечивает минимизацию затрат на транспортирование горной массы.

4. Место заложения шахтного ствола должно выбираться из условия минимального суммарного объема грузопотоков от рудных блоков, подлежащих отработке до шахтного ствола.

Вышеперечисленные этапы легли в основу предлагаемого алгоритма формирования оптимального мультиграфа сети вскрывающих выработок шахтного поля. Данные геологического опробования на горизонте отработки в плане представляют набор точек опробования, каждая из которых кроме координат  $\{X, Y\}$  характеризуется значениями геологических параметров (мощность рудного пласта, содержание полезных и вредных компонентов, объем руды и горной массы и т.д.). При такой постановке для получения этих данных наиболее целесообразным является применение метода ближайшего района (метод Болдырева). Так как данный метод позволяет не только получить значения объемно-качественных характеристик горной массы, но и осуществить привязку этих данных в пространстве. Метод Болдырева при его математической формализации соответствует задачи близости, относящейся к области вычислительной геометрии. [3].

Суть данной задачи состоит в следующем. В области  $D$ , ограниченной границей  $G$ , имеется  $M$  точек наблюдения, положение которых в плане определено координатами

$$\{P_1(x_1', y_1'); P_2(x_2', y_2'); \dots; P_M(x_m', y_m')\}$$

Разбить область  $D$  на  $M$  районов, удовлетворяющих следующему условию. Любая точка  $q$ , лежащая в границах участка  $m$ , должна быть ближе к точке наблюдения с координатами  $P_m(x_m', y_m')$ , чем к любой другой точке наблюдения

$$\text{dist}(q, P_m) = \min \text{dist}(q, P_p) \quad p=1, 2, \dots, m-1, m+1, \dots, M$$

Если отсутствует граница  $G$ , ограничивающий область  $D$ , или технологически затруднено его однозначное выделение, то в этом случае предусмотрен алгоритм, позволяющий в автоматизированном режиме построить выпуклый замкнутый контур, проходящий через граничные точки и включающий все  $M$  точек наблюдения. Алгоритм



данной задачи основан на свойстве аналитической геометрии, суть которого заключается в том, что координаты точек  $(x,y)$ , подставленные в уравнение прямой обеспечивают знакопостоянство этого уравнения, если эти точки расположены по одну сторону от прямой. Если уравнение прямой представить через декартовы координаты двух точек на плоскости, то по отношению к этой прямой все остальные точки можно разбить на три группы: лежащие слева от прямой; лежащие на прямой; лежащие справа от прямой. В итоге из всей совокупности  $M$  точек можно выбрать две, которые позволяют построить прямую, по отношению к которой все остальные точки расположить по одну сторону. Совокупность таких точек образует замкнутый выпуклый контур, ограничивающий все рассматриваемые точки на плоскости.

Разбиение области (горизонта отработки) на районы (участки ближайшего района) соответствует так называемой диаграмме Вороного [1]. Диаграмма Вороного, полученная в процессе подсчета запасов по методу Болдырева, позволяет перейти к построению структуры мультиграфа сети вскрывающих выработок. Математическая формализация данной задачи заключается в построении Евклидова минимального остовного дерева (ЕМОД), приведенного на рисунке 1. Суть ЕМОД заключается в построении дерева, вершинами которого являются точки опробования, а суммарная длина всех ребер графа минимальна.

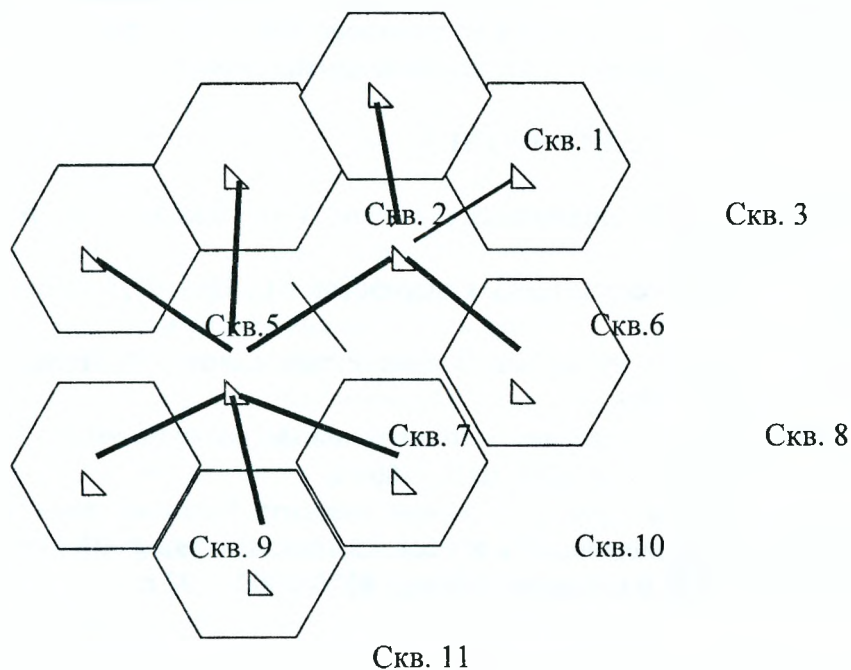


Рисунок 2 - Формирование Евклидова минимального остовного дерева диаграммы Вороного

Преобразование дерева в граф осуществляется путем введения фиктивной вершины, объединяющей все стоки. Каждая вершина графа характеризуется объемом руды или горной массы, сосредоточенным в блоке, и качественными характеристиками полезного ископаемого. Фактически ЕМОД это оптимальный граф сети вскрывающих выработок для обрабатываемого горизонта, оптимальность которого обоснована строго математически. Ребро графа представляет вскрывающую выработку, причем результат решения данной задачи предопределяет выдачу точных маркшейдерских координат проходки каждой выработки. Так как каждый  $i$ -ый подсчетный геологический блок, определенный по методу Болдырева, характеризуется координатами центральной точки  $(X_i; Y_i)$  и объемами полезного ископаемого  $(V_i)$ , то ее можно рассматривать в плане

(на рабочем горизонте) как точку, с массой равной объему полезного ископаемого. Такой подход позволяет рассчитать координаты центра тяжести системы материальных точек по формулам

$$x_c = \frac{\sum x_i v_i}{\sum v_i}; y_c = \frac{\sum y_i v_i}{\sum v_i}$$

Координаты  $(X_c; Y_c)$  определяют координаты заложения шахтного ствола на рабочем горизонте. Если аналогично рассчитать координаты точек для заложения шахтного ствола на каждом рабочем горизонте то по формулам, аналогичным вышеприведенным, можно рассчитать наиболее рациональные координаты местозаложения вертикального шахтного ствола для всех рабочих горизонтов.

Достоинством предложенной методики является то, что она позволяет по мере уточнения данных о структуре и качественных характеристиках горного массива повторно решать задачу обоснования топологии сети вскрывающих выработок, при рассмотрении вопросов ее развития. Такой подход позволяет использовать данную методику, как при проектировании новых рудников, так и при реконструкции действующих. Последующие задачи определения и обоснования сечений вскрывающих выработок и вида транспорта, решаются на сформированной сети вскрывающих выработок, с учетом производительности рудника и заданных календарных объемах добычи полезного ископаемого. При этом граф преобразуется в мультиграф, для которого могут использоваться апробированные методики проектирования вскрытия шахтных полей [1, 2].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизация проектирования подземных рудников / Г.П. Данилина [и др.] – Алма-Ата: Наука, 1990. – 256 с.
2. Цой, С. Синтез оптимальных сетей горных выработок / С. Цой, Г.П. Данилина. – Алма-Ата: Наука, 1969. – 212 с
3. Препарата, Ф. Вычислительная геометрия: Введение: пер. с англ. / Ф. Препарата, М Шеймос. – М.: Мир, 1989. – 478 с.
4. Шикин, В.В. Компьютерная графика. Полигональные модели / В.В. Шикин, А.В. Боресков. – М.: ДИАЛОГ – МИФИ, 2001. – 464 с.
5. Ашаев, Ю.П. Территориально – распределенные системы. Компьютерная математика в фундаментальных исследованиях и образовании: тез. докл. III Междунар. научн. конф. / Ю.П. Пшаев, С.Ю. Ашаев – Минск: БГУ, 2002. – 92 с.