

УДК 622.272.1/3:624.1

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ШАХТ С УЧЕТОМ БОЛЬШОГО ЧИСЛА КРИТЕРИЕВ

Чл.-корр. АН СССР С. В. ЕМЕЛЬЯНОВ, канд. техн. наук В. М. ОЗЕРНОЙ,  
канд. техн. наук О. И. ЛАРИЧЕВ, инж. М. Г. ГАФТ

*Ордена Ленина Институт проблем управления  
(автоматики и телемеханики)*

Проф. А. С. БУРЧАКОВ, канд. техн. наук В. А. ХАРЧЕНКО,  
канд. техн. наук Л. А. КАФОРИН

*Московский ордена Трудового Красного Знамени горный институт*

При проектировании новых и реконструкции действующих шахт для любого класса горногеологических условий возникает большое количество допустимых вариантов технологических схем. При этом не существует аналитической зависимости между параметрами, характеризующими горногеологические условия, качественными параметрами, выбираемыми при разработке технологической схемы шахты, и некоторым обобщенным технико-экономическим показателем, принятым в качестве критерия оптимальности. Точные расчеты технико-экономических показателей шахт плохо поддаются формализации, чрезвычайно трудоемки и практически могут быть выполнены лишь для трех-четырех вариантов технологических схем, так как требуют многомесячной работы большого количества проектировщиков. В то же время, например, для брахисинклинальных месторождений, представленных свитами пологих пластов, общее число вариантов иногда достигает десятков тысяч.

Основной задачей при проектировании и реконструкции шахт является выбор оптимального варианта технологической схемы, т. е. такого варианта, которому соответствует экстремальное значение показателя, принятого в качестве критерия качества.

В настоящее время выбор оптимального варианта технологической схемы шахты осуществляется в два этапа. На первом этапе группа специалистов-экспертов в области проектирования шахт выделяет несколько (обычно не более трех) вариантов технологической схемы, среди которых, по мнению группы, содержится оптимальный. На втором этапе для выделенных вариантов проводятся технико-экономические расчеты. Эти расчеты позволяют определить оптимальный вариант технологической схемы, который принимается и используется на дальнейших этапах проектирования. Из-за сложности расчеты не могут быть выполнены для всего множества допустимых вариантов.

Первый этап описанной методики является наименее формализованным. Исходное число возможных вариантов технологической схемы шахты обычно очень велико, поэтому ни один эксперт, какой бы высокой квалификацией он ни обладал, не в состоянии проанализировать все множество вариантов. Поскольку на этом этапе проектирования технико-экономические показатели технологической схемы неизвестны и, следовательно, не могут быть исполь-

зованы в качестве основы для выбора «наилучшего» варианта, каждому эксперту приходится пользоваться собственным правилом выбора.

Правило выбора, интуитивно используемое экспертом, может быть основано либо на учете большего числа критериев (факторов), характеризующих технологическую схему шахты, либо на стремлении выделить в качестве наилучших такие варианты, которые содержат наилучшие, с точки зрения эксперта, элементы.

В первом случае возможна потеря вариантов с высокими технико-экономическими показателями из-за того, что эксперты принимают во внимание различные наборы критериев и по-разному оценивают относительную важность каждого критерия. Во втором случае оказывается, что составление технологической схемы шахты из наилучших элементов, как правило, невозможно, поэтому эксперту приходится ослаблять требования к отдельным элементам схемы. Вопрос, к каким элементам технологической схемы следует ослаблять требования и в какой степени, решается каждым экспертом на основе его знаний и опыта.

Перечисленные недостатки первого этапа выбора оптимального варианта технологической схемы шахты в значительной мере ослабляют эффективность проектирования. Несмотря на это, использование экспертных оценок при выборе оптимального варианта технологической схемы, обуславливаемое отсутствием объективной информации, необходимой для принятия обоснованных решений, является весьма целесообразным, а возможно, и единственным способом решения задачи. Специалисты научно-исследовательских, учебных и проектных институтов, а также специалисты-эксплуатационники имеют большой практический опыт, использование которого может значительно сократить время и стоимость проектирования. Однако получение обоснованных решений требует четкой постановки задачи, формализации процессов сбора и обработки экспертных оценок и использования научно-обоснованных методов принятия решений.

Для устранения указанных недостатков первого этапа проектирования в МГИ были предложены методы, позволяющие дать приближенную оценку численного значения критерия оптимальности для конкретных вариантов технологических схем [1]. Однако сложность методов приближенной оценки технико-экономических показателей настолько велика, что даже при использовании современных ЭВМ общее число вариантов, которые могут быть проанализированы таким способом, не превышает нескольких десятков или сотен. Из-за этого не удастся провести расчеты всех возможных вариантов технологических схем, и исходное подмножество рациональных вариантов по-прежнему приходится выделять группе высококвалифицированных экспертов, что не гарантирует включения в проектную проработку оптимального варианта.

Задача выбора подмножества рациональных вариантов технологических схем, возникающая при проектировании и реконструкции шахт, в общем виде может быть сформулирована следующим образом: выделить из всего множества допустимых вариантов технологических схем шахт (порядка десятков тысяч вариантов) некоторое число вариантов, близкое к требуемому (порядка ста вариантов), наиболее предпочтительных в каком-либо определенном смысле и содержащее оптимальный вариант. Следовательно, в рассматриваемой задаче не требуется полностью упорядочить множество допустимых вариантов, а достаточно найти множество «наиболее предпочтительных» вариантов (множество Парето) [2].

Сформулированная постановка задачи требует существенных уточнений. Понятие «наиболее предпочтительный», уточняемое в дальнейшем, подразумевает наличие не единственного критерия, используемого при оценке варианта, а совокупности критериев. Каждый из возможных вариантов технологических схем должен быть оценен по всем критериям, и на основании этих



Все возможные для данного класса горногеологических условий варианты схемы могут быть представлены в виде конечного множества деревьев вариантов (рис. 1). Деревья представляют собой горизонтальные ряды вершин. Каждый ряд соответствует определенному уровню, а его вершины — элементам данного уровня. Каждый вариант технологической схемы шахты представляется ветвью одного из деревьев (путем в графе), т. е. последовательностью элементов технологической схемы, выбираемых таким образом, что в каждую ветвь входит один и только один элемент каждого уровня. Представление множества допустимых вариантов технологических схем шахт в виде множества деревьев возможно для любых классов горногеологических условий (в зависимости от класса меняются элементы дерева). Возможные сочетания в схеме элементов различных уровней могут быть удобно представлены в табличном виде.

Описанная форма представления вариантов технологической схемы в виде множества деревьев наглядна и позволяет не запоминать все исходное множество, а достаточно просто и быстро формировать любой его вариант с помощью ЭВМ. Сравнение оценок вариантов при таком способе их представления также производится достаточно просто и быстро.

Для каждого уровня технологической схемы экспертами был сформулирован набор критериев, по которым может быть оценен любой элемент соответствующего уровня. Набор критериев, по которым оцениваются варианты технологической схемы, представляет собой объединение наборов критериев каждого уровня и включает 25 различных технико-экономических критериев, имеющих качественный характер. Так как множество допустимых вариантов настолько велико (более 7000), что непосредственная оценка каждого варианта экспертами невозможна, была разработана машинная процедура формирования оценок вариантов по каждому критерию, основанная на использовании таблиц оценок всевозможных сочетаний оценок элементов тех уровней, которые содержат эти критерии.

Набор критериев, используемых для решения рассматриваемой задачи, и шкалы критериев представлены в табл. 1.

Разработка способа представления альтернативных вариантов исходного множества технологических схем, формирование набора критериев, разработка оценочных шкал и процедуры оценки вариантов позволили перейти от интуитивного выделения «наилучших» вариантов, основанного только на индивидуальном опыте специалистов-экспертов, к формализованному анализу оценок каждого варианта и выделению «подмножества наиболее предпочтительных вариантов».

При выделении подмножества «наиболее предпочтительных вариантов» учитываются данные об относительной важности критериев и оценок по этим критериям. На основании этой информации задается бинарное отношение предпочтения на исходном множестве допустимых вариантов, точно определяющее понятие «более предпочтительный вариант».

Отношение предпочтения  $R_1$  определяется следующим естественным образом: вариант  $A_i$  предпочтительнее, чем вариант  $A_j$  (т. е.  $A_i R_1 A_j$ ), тогда и только тогда, когда хотя бы по одному критерию вариант  $A_i$  имеет оценку лучше, чем  $A_j$ , а по остальным — не хуже. Два варианта  $A_i$  и  $A_j$  являются несравнимыми ( $A_i I_1 A_j$ ), если по некоторым критериям более высокие оценки имеет один вариант, а по остальным — другой.

Множество допустимых вариантов частично упорядочено отношением  $R_1$ . Следовательно, все несравнимые элементы, не имеющие более предпочтительных, т. е. максимальные элементы исходного множества, образуют подмножество наиболее предпочтительных.

При большом количестве вариантов исходного множества подмножество наиболее предпочтительных элементов, полученное с помощью отношения  $R_1$ , также содержит слишком много элементов. Это приводит к необходи-

Таблица 1

## Набор критериев и их шкалы

| Критерии  | Шкалы  | Критерии  | Шкалы                                  |
|---|--|---|--|
| Эксплуатационные затраты  | Минимальные<br>Средние<br>Значительные                       | Возможность изменения схемы отработки                                     | Имеется<br>Затруднена<br>Не имеется    |
| Транспорт вспомогательных материалов  | Бесступенчатый<br>Одноступенчатый<br>Многоступенчатый        | Возможность изменения схемы отработки                                     | Имеется<br>Затруднена<br>Не имеется    |
| Первоначальные капитальные затраты  | Минимальные<br>Средние<br>Значительные                       | Планировка горных работ   | Простая<br>Усложненная<br>Возможна     |
| Возможность модернизации (реконструкции углубки) без влияния на эксплуатационную деятельность шахты | Возможна<br>Частично возможна<br>Невозможна                  | Независимость очистных и подготовительных работ                           | Частично возможна<br>Невозможна        |
| Объем зданий и сооружений технологического комплекса  | Небольшой<br>Средний<br>Максимальный                         | Протяженность выработок, проводимых для подготовки выемочного столба      | Минимальная<br>Средняя<br>Максимальная |
| Объем горных работ будущих лет  | Небольшой<br>Средний<br>Большой                              | Степень обособленности транспортных вентиляционных магистралей            | Полная<br>Частичная<br>Не обособленная |
| Надежность  | Большая<br>Средняя<br>Низкая                                 | Степень обособленности проветривания мест газовыделения                   | Полная<br>Частичная<br>Не обособленная |
| Потери угля в недрах, связанные с вариантами  | Отсутствуют<br>Средние<br>Большие                            | Наличие дополнительных перегрузочных пунктов по угольной цепочке          | Не имеется<br>Имеется                  |
| Затраты на строительство сооружений на поверхности  | Небольшие<br>Средние<br>Большие                              | Эффективность охраны выработок  | Высокая<br>Средняя<br>Низкая           |
| Протяженность поддерживаемых горных выработок   | Минимальная<br>Средняя<br>Максимальная                       | Степень извлечения запасов угля   | Максимальная<br>Средняя<br>Минимальная |
| Наличие дополнительных вскрывающих выработок  | Отсутствуют<br>Проводятся однажды<br>Проводятся периодически | Организация работ   | Простая<br>Сложная                     |
| Возможность концентрации горных выработок   | Большая<br>Средняя<br>Небольшая                              | Затраты на проведение   | Минимальные<br>Средние<br>Максимальные |
|   |  | Степень индустриализации работ по производству подготовительных выработок | Большая<br>Средняя<br>Малая            |

мости формирования совокупности отношений, последовательное применение которых позволит выделить подмножество, содержащее количество вариантов, близкое к требуемому.

Анализ критериев показал, что оценки по различным критериям не в одинаковой степени влияют на общую оценку качества технологической схемы. Из двух критериев более важным следует считать тот, ухудшение оценки по которому на одну градацию шкалы менее желательно с точки зрения экспертов.

Оказалось, что критерии могут быть распределены по группам, каждая из которых содержит одинаково важные критерии, а сами группы могут быть упорядочены (проранжированы) в соответствии с важностью включенных в них критериев.

Упорядочение критериев позволило привести шкалы критериев внутри группы к единой порядковой шкале, имеющей 3 оценки *a*, *b* и *v* и ввести следующее отношение предпочтения:  $R_2: A_i R_2 A_j$ , тогда и только тогда, когда вариант  $A_i$  имеет хотя бы по одной группе критериев больше более предпочтительных оценок, чем вариант  $A_j$ , а по остальным группам не

уступает ему. Варианты  $A_i$  и  $A_j$  эквивалентны, т. е.  $A_i \sim_2 A_j$ , если по каждой группе критериев они имеют равные количества одинаковых оценок. Варианты  $A_i$  и  $A_j$  являются несравнимыми ( $A_i /_2 A_j$ ), если ни один из них не является доминирующим и если они не эквивалентны.

Анализируя варианты, несравнимые при использовании отношения  $R_2$ , можно выделить несравнимость оценок вариантов по одной группе критериев. Эта несравнимость может быть устранена при переходе от порядковых шкал для всех критериев к интервальным. Для этого необходима информация не только о том, какая оценка по шкале более предпочтительна, но и о том, насколько сильнее падает результирующая оценка варианта при изменении оценки от  $a$  до  $b$  по сравнению с ее изменением от  $a$  до  $b$ .

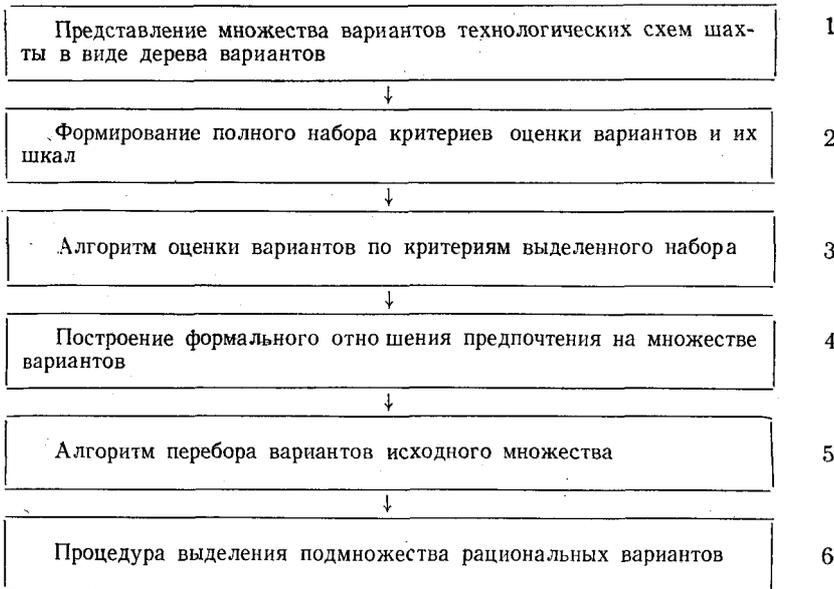


Рис. 2. Блок-схема методики выбора рациональных вариантов технологических схем шахт.

Переход от порядковой шкалы к интервальной может быть осуществлен следующим образом. За наличие у варианта оценки  $b$  по одному из критериев  $i$ -й группы ему приписывается некоторое число (штраф)  $\Delta_b^i > 0$ , а за наличие оценки  $a$  —  $\Delta_a^i > \Delta_b^i$ . Так как  $a$  — лучшая оценка, можно принять  $\Delta_a^i = 0$ .

Отношение  $R_3$  на исходном множестве определяется следующим образом:  $A_i R_3 A_j$  тогда и только тогда, когда  $A_i$  имеет хотя бы по одной группе критериев штраф меньше, чем  $A_j$ , а по другим группам критериев не имеет больших штрафов. Варианты  $A_i$  и  $A_j$  эквивалентны, т. е.  $A_i \sim_3 A_j$ , если по каждой группе критериев они имеют одинаковые штрафы. Варианты  $A_i$  и  $A_j$  несравнимы ( $A_i /_3 A_j$ ), если один из них имеет меньшие штрафы по одним группам критериев, а другой — по другим.

На основе описанной методики была составлена программа для ЭВМ М-220, позволяющая выделять подмножество рациональных вариантов для любого конкретного класса горногеологических условий на основе отношения предпочтения  $R_3$ .

Рассматриваемая методика выбора рациональных вариантов технологических схем шахт схематически может быть представлена в виде блок-схемы, изображенной на рис. 2.

Операции, выполняемые в блоках 2, 3, проводятся один раз. Алгоритмическая часть остальных блоков не зависит от класса горногеологических условий, при которых выбирается вариант технологической схемы шахты.

Для каждого класса горногеологических условий осуществляется сбор исходной информации, связанной с формированием элементов уровней; с заданием связей элементов различных уровней; с оценкой элементов уровней по соответствующим критериям и с построением необходимых таблиц, позволяющих оценить варианты технологических схем по набору критериев.

При выборе варианта технологической схемы шахты для конкретного месторождения необходимо только отметить те элементы уровней, которые определяются данным месторождением и использовать программу, соответствующую данному классу горногеологических условий.

Описанная методика была дважды использована при выборе рациональных вариантов технологических схем шахт для свиты пологих пластов — при разработке технико-экономического обоснования «шахты будущего» для Чичербаевского геологического участка и при разработке проекта реконструкции шахты «Томь-Усинская 1—2» им. В. И. Ленина.

В первом случае в качестве рациональных был выделен 21 вариант технологической схемы шахты. В 18 вариантах способ вскрытия — наклонными стволами до верхней границы шахтного поля и в трех — комбинированный способ — наклонным главным и вертикальным вспомогательным. Схема вскрытия во всех вариантах — одногоризонтная с отнесенным и в некоторых случаях с центрально-отнесенным расположением стволов. Схемы отработки шахтного поля возможны различные, однако преобладает блоковая схема с последовательной отработкой блоков. Схема подготовки — погоризонтная с отработкой шахтного поля через всю мульду с проветриванием через шурфы и угольные штреки. Способ подготовки — пластовый и пластово-полевой. Система разработки — длинными столбами и комбинированная.

Анализ полученных наиболее предпочтительных вариантов технологических схем показывает, что элементы различных уровней, из которых они составлены, отвечают основным требованиям, предъявляемым при создании высокопроизводительных угольных шахт. В числе полученных вариантов находится вариант со вскрытием до верхней границы шахтного поля, который был определен в дальнейшем как наилучший в результате детальных расчетов с помощью проектных проработок и экономико-математического моделирования.

Анализ результатов использования методики позволяет сделать вывод о целесообразности применения ее для выбора рациональных вариантов технологических схем шахты, что позволит повысить обоснованность решений и уменьшить объем проектных работ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бурчаков А. С., Кафорин Л. А., Харченко В. А. Совершенствование методов выбора технологических схем и их оптимальных параметров при проектировании высокопроизводительных угольных шахт. ЦНИЭИУголь, М., 1971.
2. Озерной В. М. Принятие решений (обзор). Автоматика и телемеханика, № 11, 1971.

Рекомендована кафедрой  
технологии, механизации и организации  
подземной разработки угля МГИ

Поступила в редакцию  
18 января 1972 г.

Выбор рациональных вариантов технологических шахт с учетом большого числа критериев / С. В. Емельянов, В. М. Озерной, О. И. Ларичев и др. // *Горный журнал*. — 1972. — № 5.—С. 8–14.

```
@Article{Emelyanov_Ozernoy_Larichev_1972,  
  author =      "Емельянов, С. В. and Озерной, В. М. and Ларичев, О. И.  
                and Гафт, М. Г. and Бурчаков, А. С. and Харченко, В. А.  
                and Кафорин, Л. А.",  
  title =      "Выбор рациональных вариантов технологических шахт с  
                учетов большого числа критериев",  
  journal =    "Горный журнал",  
  number =    "5",  
  pages =     "8--14",  
  year =      "1972",  
  language =  "russian",  
}
```