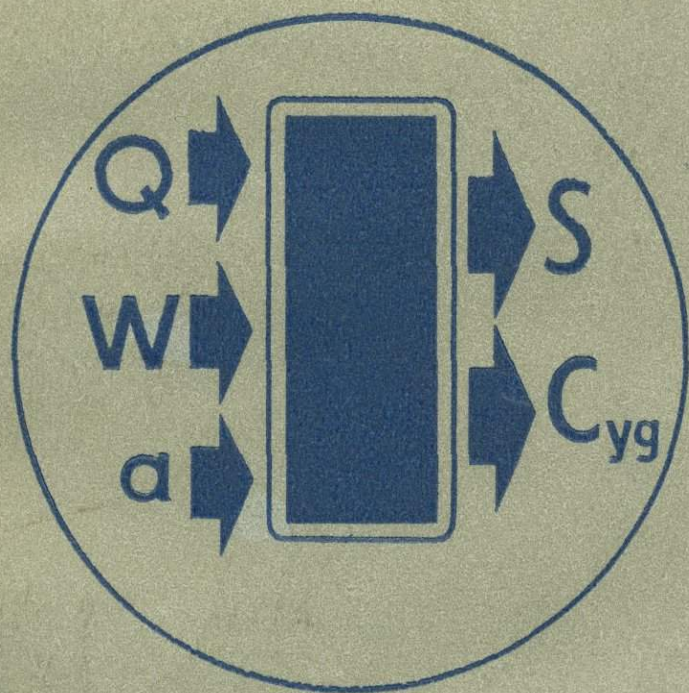


А. А. СМОЛЯНИЦКИЙ, П. В. ПОПОВ

МЕТОДЫ
ОПТИМИЗАЦИИ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ
РАБОТ



А. А. СМОЛЯНИЦКИЙ, П. В. ПОПОВ

519/55

МЕТОДЫ
ОПТИМИЗАЦИИ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ
РАБОТ



Москва
«НЕДРА»
1977



519/55

Смоляницкий А. А., Попов П. В. Методы оптимизации геологоразведочных работ. М., «Недра», 1977, 88 с.

Даны основы математической теории оптимизации, изложены сведения об алгоритмических языках. На основе современного состояния геологоразведочных работ сделан вывод о необходимости и возможности их оптимизации. Рассмотрены характерные задачи оптимизации открытых геологоразведочных работ на примере проведения геологоразведочных канав, выполняемых с использованием энергии ВВ. Разработаны алгоритмы и программы решения этих задач для ЭЦВМ и приведены примеры расчета оптимальных вариантов. Даны рекомендации по использованию результатов расчетов при проектировании и производстве открытых геологоразведочных работ.

Книга предназначена для специалистов геологоразведчиков, а также может быть полезна студентам высших учебных заведений геологоразведочного профиля.

Табл. 19, ил. 23, список лит. — 12 назв.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дальнейшее совершенствование горно-разведочных работ основано на объективной качественной и количественной оценке применяемой технологии, технических средств и их параметров. Правильный выбор этих составляющих зависит от целого ряда природных, технологических и технико-экономических факторов, учет которых необходим, но сложен. Известно, что горно-разведочное производство является комплексной многовариантной системой, а достижение наивысших технико-экономических показателей обеспечивается, как правило, при единственном оптимальном варианте, установление которого возможно на основе математического аппарата теории оптимального управления и применения электронно-вычислительных средств. С целью показать возможность перевода горно-разведочного производства на оптимальное управление и написана данная книга.

Научные основы оптимального управления горно-разведочным производством в систематизированном виде еще не излагались, внедрение методов оптимального управления геологоразведочными работами только начинается; применительно к разведочному бурению методы оптимизации разрабатываются под руководством проф. Е. А. Козловского.

В данной книге мы останавливаемся на

вопросах оптимизации открытых горноразведочных работ (на примере проходки канав и траншей). Однако все принципиальные положения могут быть распространены и на подземные горноразведочные работы. Кроме того, следует учитывать, что ассигнования, выделяемые по Министерству геологии СССР на проходку открытых горноразведочных выработок, превышают соответствующие ассигнования на подземные горноразведочные работы, а уровень организации канаво-траншейных работ значительно ниже.

Критические замечания читателя будут восприняты авторами с благодарностью.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕОРИИ ОПТИМИЗАЦИИ И ЭВМ

Постановка задач теории оптимального управления

В последние годы все большее применение находят методы оптимизации. Задача выбора наилучшего, оптимального, решения для достижения заданной цели характерна и актуальна для геологоразведочных работ и имеет большое научное и практическое значение. Оптимизация — целенаправленная деятельность, заключающаяся в достижении наилучших результатов труда при заданных условиях. Дадим определения всех основных понятий математической теории оптимизации с иллюстрациями на едином примере по проведению открытой горноразведочной выработки — геологоразведочной канавы — взрывом на выброс.

Известно, что теория оптимизации оперирует с математическими объектами, которыми можно управлять. Схема такого управляемого объекта приведена на рис. 1; представленные на схеме элементы являются обязательными.

Объект управления характеризует явление, процесс, техническое средство, подчиненные целенаправленной деятельности. Примерами объекта управления являются процесс проведения траншей, заряд ВВ и т. п. При этом мы абстрагируемся от конкретных свойств объекта, заменяя их некоторыми количественными характеристиками.

Входными, или управляющими, параметрами называют те величины, посредством которых можно изменять состояние объекта. Обозначаются они как $u^1(t)$, ..., $u^r(t)$, где t — время, и являются переменными в рассматриваемый отрезок времени. Количество их и вид зависят от характера исследуемого объекта.

Выходными, или управляемыми параметрами считают те, которые описывают изменение состояния объекта управления как фазовую траекторию в n -мерном евклидовом пространстве E^n . Обозначаются через $X^1(t)$, ..., $X^n(t)$.

Для нашего примера параметры Q , W , a являются управляющими, или входными, а управляемыми, или выходными, служат, например, S и $C_{уд}$, где $C_{уд}$ — удельная стоимость.

Начальными условиями назовем начальное состояние исследуемого объекта, соответствующее $t=t_0$. При этом входные параметры примут вид $u^1(t_0)$, ..., $u^r(t_0)$, а выходные $x^1(t_0)$, ..., $x^n(t_0)$. Примером может служить состояние земной поверхности до про-

ходки канавы или начальное состояние ее забоя до производства проходческих работ по очередному циклу.

Целью управления следует считать конечное состояние объекта управления, которое мы стремимся достигнуть, преобразуя объект. Цель управления в упрощенном виде представляет собой следующие сочетания входных и выходных параметров:

$$x^1(t_k), \dots, x^n(t_k); u^1(t_k), \dots, u^r(t_k), \text{ т. е.}$$

характеризует состояние объекта управления в момент времени t_k .
Пример — проведение канавы с заданным сечением S_k .

Областью управления называют область изменения входных и выходных параметров. В простейшем случае эта область пишется в виде неравенств [4]



$$X_0^i \leq X^i(t) \leq X_k^i, \quad u_0^i \leq u^i(t) \leq u_k^i$$

при условии, что $t_0 \leq t \leq t_k$. Например

$$Q_0 \leq Q \leq Q_k; \quad W_0 \leq W \leq W_k; \\ S_0 \leq S \leq S_k.$$

Рис. 1. Схема управления процессом проведения канав.

Q — величина заряда ВВ; W — глубина заложения заряда ВВ; a — расстояние между зарядами; S — сечение канавы; $C_{уд}$ — стоимость проходки 1 м канавы

Входные и выходные параметры подчинены некоторым ограничениям, которые в совокупности образуют область управления и устанавливаются на основе имеющейся информации.

Запись простейшего ограничения, например входных параметров, может быть дана в виде $\alpha \leq u \leq \beta$, где α, β — ограничения. Так, в рассматриваемом примере неравенство вида $Q_0 \leq Q \leq Q_k$ является ограничением по величине заряда ВВ.

Допустимым процессом является всякий способ достижения цели управления в пределах области управления, т. е. допустимый в некоторых условиях перевод объекта из начального состояния, определяемого начальными условиями, в конечное.

Можно говорить о задаче оптимизации тогда, когда существует множество допустимых процессов, реализующих цель управления, которые лежат в пределах области управления. Изменение входных и выходных параметров, определяющее модификацию объекта управления на отрезке времени $t_0 \leq t \leq t_k$, дает некоторый допустимый процесс.

Критерий качества. Необходимо четко сформулировать те принципы, согласно которым можно выбрать из множества допустимых процессов один, наилучший в каком-либо отношении, т. е. оптимальный процесс. Для этого вводят количественную характеристику качества допустимого процесса, называемую критерием качества, целевой функцией, или функционалом. Принципиальное отличие задач оптимизации от прочих математических

задач состоит в том, что в них синтезируется формальнологическая модель объекта с воздействием на систему извне посредством критерия качества. Поэтому критерий качества является узловым и важным понятием теории оптимизации. Критерий оптимальности является внешним фактором для оптимальной системы, устанавливается не из теории оптимизации, а из других принципов, но его включение в задачи оптимизации обязательно [1]. Следует учитывать, что нельзя говорить об оптимизации вообще; надо указать направление оптимизации или по какому критерию оптимизируется процесс. Критерий качества математически может выражаться интегральным функционалом вида:

$$I = \int_{t_0}^{t_k} f^0(X^1(t), \dots, X^n(t), u^1(t), \dots, u^r(t)) dt, \quad (1)$$

где функция f^0 выбирается исходя из практических соображений, по смыслу задачи.

В простых задачах оптимизации критерий качества может иметь вид:

$$I = F(x^1(t), \dots, x^n(t), u^1(t), \dots, u^r(t))/t = t_1 \quad (2)$$

или

$$I = f(u^1(t), \dots, u^r(t))/t = t_1. \quad (3)$$

Считается, что экстремальное (минимальное или максимальное) значение функционала соответствует оптимальному допустимому процессу, и решение задачи оптимизации заключается в нахождении значений входных и выходных параметров, минимизирующих (или максимизирующих) функционал. Неправильная формулировка критерия качества в задачах оптимизации может привести к парадоксальным решениям. Так, пусть задача оптимизации дана в следующей формулировке: найти параметры взрыва, обеспечивающие достижение максимальной производительности труда (Π), при минимальном суммарном расходе взрывчатых веществ (ΣQ).

На первый взгляд, при решении этой задачи за критерий качества может быть принят показатель $\Sigma Q = \min$. Однако задача поставлена математически неверно, так как увеличение производительности труда влечет за собой повышение общего расхода ВВ. Правильнее обусловить достижение максимальной производительности при минимальном удельном расходе ВВ и при заданных ограничениях. Тогда имеем $q = \min$ при $\bar{q} < q_1$, где q — расчетный удельный расход ВВ; q_1 — предельный удельный расход ВВ (ограничение).

Наиболее общим показателем, характеризующим оптимальность процесса проведения горноразведочных выработок, является минимум приведенных затрат. Критерием оптимальности при проведении поверхностных горных выработок преимущественно могут

быть C_v — суммарные затраты на 1 м³, р.; C_l — суммарные затраты на 1 м выработки. Конкретный вид критерия определяется для каждой задачи и устанавливается с учетом имеющейся информации.

Движение управляемого объекта. Под этим понятием в математике понимают изменение состояния объекта во времени. Считается, что, зная фазовое состояние объекта в начальный момент времени x_0 при t_0 и выбрав управляющие параметры $u^1(t), u^2(t), \dots, u^r(t)$, можно установить состояние объекта в любой момент t (при $t > t_0$), т. е. найти функции $x^1(t), x^2(t), \dots, x^n(t)$. При перемещении в фазовом пространстве фазовая точка $X(t)$ описывает линию, называемую фазовой траекторией.

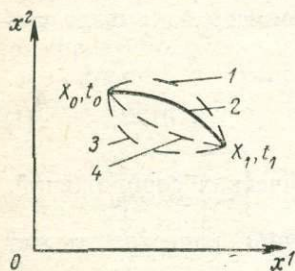


Рис. 2. Движение объекта управления (при $n=2$)
 X_0, X_1 — начальное и конечное состояния объекта; 1, 2, 3, 4 — траектории движения объекта (2 — оптимальная траектория)

Пример фазовой траектории приведен на рис. 2, где дана иллюстрация процесса движения, т. е. перехода управляемого объекта из начального состояния (точка X_0 в момент t_0) в конечное для данной стадии состояние (точка X_1 в момент t_1). Этот переход может быть осуществлен различными путями и может быть оптимальным по какому-либо определенному признаку, например по наименьшим затратам времени (траектория 2), или

неоптимальным. Цель оптимального управления — обеспечить качественный переход из X_0 в X_1 . Следовательно, рассматриваемая задача по оптимизации процесса может быть сформулирована так: в фазовом пространстве X даны две точки X_0 и X_1 . Требуется из всех допустимых управлений $U(t)$, где $t_0 \leq t \leq t_1$, переводящих фазовую точку из положения X_0 в положение X_1 , выбрать такое, которое придает функционалу наименьшее возможное значение. Если это условие будет соблюдено, то управление $U(t)$, траектория ($X_0 - X_1$) и сам процесс будут оптимальными. Так, примером движения может служить изменение состояния объекта управления — канавы — во времени, в частности изменение ее протяженности, т. е. $L(t)$, где L — протяженность канавы, м.

Выше были рассмотрены все основные понятия теории оптимального управления. Для постановки задачи оптимизации надо сформулировать для исследуемого процесса все понятия в той последовательности, в какой они были изложены нами. Таким образом, необходимо: 1) выделить процесс, требующий оптимизации; 2) охарактеризовать объект управления; 3) установить ограничения на параметры процесса и определить критерий качества; 4) задать (математически) изменения фазовых состояний объекта.

Рассмотрим еще одно понятие, непосредственно не относящееся к теории оптимизации, но применяемое при постановке и решении

задач оптимизации. Речь идет о «математической модели», отражающей сущность процессов, протекающих в объекте. Диалектическое единство количественных и качественных характеристик, присущих всякому материальному объекту, образует математический объект. Обозначим условно количественные характеристики (a_1, \dots, a_n) ; качественные (b_1, \dots, b_k) . Тогда совокупность взаимосвязей между количественными характеристиками объекта есть математическая модель, отражающая сущность процессов, протекающих в объекте.

Основными методами решения задач оптимизации являются: метод динамического программирования Р. Беллмана, принцип максимума Л. Понтрягина и симплекс-метод.

В большинстве задач по оптимизации горноразведочных работ можно находить оптимальные решения простым дифференцированием известных функций и нахождением таких их точек, в которых первая производная обращается в нуль. Назовем этот метод простой оптимизацией.

Техническим средством решения задач оптимизации являются электронно-вычислительные машины (ЭВМ).

Алгоритм, алгоритмические языки

Алгоритм — одно из основных понятий математики, под которым принято считать точное предписание по выполнению в определенном порядке некоторой системы операций для решения всех задач некоторого заданного типа (а не одну индивидуальную).

Например, если читатель и не знаком с понятием показателя действия взрыва, он может легко определить числовое значение этого показателя (n) по табл. 1 и алгоритму решения ($r_B : W$).

Применительно к машинной обработке алгоритм дается в виде программ — алгоритмов.

Всякая задача включает следующие последовательные этапы:

1) постановка задачи (практическая и математическая);

2) определение способов решения задачи в общем виде; итог 2-го этапа — составление блок-схемы решения задачи;

3) осуществление численных расчетов с использованием найденных способов решения задачи (процесс вычисления);

4) анализ полученных результатов решения.

Под вычислительным процессом следует понимать процесс расчетов по известным исходным данным и известному правилу преобразования, т. е. перехода к конечным результатам.

Таблица 1
Алгоритм решения

№ замера	r_B	W	n
1	1	1	1
2	2	1	2
3	3	1,5	2
4	4	2,2	1,8
5	5	3	1,67

Запись в виде символов, доступных машине, называют программой, которую вводят в машину.

Программа является перечнем операций, подлежащих выполнению, т. е. законченным описанием алгоритма, и формулируется не машиной, а человеком. Отдельные ее части могут использоваться как самостоятельные программы (блоки).

Программа содержит знаки арифметических и логических операций, разделительные знаки и служебные слова. Таким образом, программа — это запись алгоритма на языке машины. Алгоритмические языки позволяют любой вычислительный процесс описать точно и однозначно. Программирование может производиться двумя способами: на языке данной ЭЦВМ или на алгоритмических языках. Первый способ применяется при работе на малых ЭЦВМ для задач невысокой степени математической сложности. Этот способ не является универсальным, поэтому составленная программа может быть реализована только на ЭЦВМ данной марки. Второй способ используется для весьма сложных программ, является универсальным и более прост в применении.

Известно много алгоритмических языков и их разновидностей. Наиболее популярным в нашей стране является язык АЛГОЛ-60 (60 — год принятия), на рассмотрении которого остановимся более подробно.

Различают три уровня АЛГОЛА: 1) эталонный язык — основа для других уровней, 2) язык публикаций — видоизмененный эталонный и 3) конкретный язык — измененный эталонный под определенное устройство ввода-вывода данной ЭЦВМ. Структура АЛГОЛА также включает блок с его описательной и операторной частями. Переменными в языке называют некоторые буквенно-цифровые символы, способные в вычислительном процессе принимать различные цифровые значения. Типы переменных: *real* — действительные, *integer* — целые, *boolean* — логические (булевские).

Рассмотрим применяемые в АЛГОЛЕ типы операторов.

Оператор присваивания предписывает вычисление значения некоторого выражения для того, чтобы одну или несколько переменных в дальнейшем считать равным вычисленному значению выражения. Обозначается знаком «:=». Оператор присваивания имеет в программе вид $u := A$, где u — переменная, A — вычисляемое выражение. Причем не исключен и такой вариант, когда выражение A зависит от u . При этом оператор присваивания вычисляет значение $A(u)$, и в дальнейшей работе программы переменная u имеет значение $A(u_1)$, где u_1 — старое значение u .

Оператор перехода служит для изменения естественного порядка выполнения операторов, имеет вид: *go to K*, где K — метка, обозначающая в программе то место, откуда необходимо начать выполнение операторов, следующих за оператором перехода.

Условный оператор. Очень часто при выполнении программы возникает необходимость выполнить тот или иной оператор (P или Q) в зависимости от выполнения или невыполнения некоторого условия S .

Для программирования сложных ситуаций, встречающихся в вычислительных процессах, применяется условный оператор, который имеет вид:

1) $\text{if } S \text{ then } P$ — простой (односторонний) условный оператор;

2) $\text{if } S \text{ then } P \text{ else } Q$ —

составной (двусторонний) условный оператор. S — это условие (в примере $S \equiv a < b$), которое может принимать два значения: $S \equiv \text{true}$ (истина), $S \equiv \text{false}$ (ложь).

В первом случае выполняет оператор P , во втором случае — оператор Q (рис. 3).

В программах используются булевские выражения, обозначаемые через символы. Приведем пример составления булевских выражений, которые обозначим m . Пусть, например, имеем логические переменные: u_1, u_2, u_3, u_4 , которые представляют собой следующие ограничения:

$u_1: W_0 \leq W \leq Wk$; W — глубина заложения заряда ВВ;

$u_2: n_0 \leq n \leq nk$; n — показатель действия взрыва;

$u_3: Q_0 \leq Q \leq Qk$; Q — величина заряда ВВ;

$u_4: C_0 \leq C \leq Ck$; C — стоимость проходки 1 м канавы.

Каждое из указанных ограничений может выполняться или не выполняться, т. е. u_1, \dots, u_4 могут принимать соответственно значения true и false. Пусть мы рассчитываем в программе все указанные параметры канавы и показатели ее проходки: W, n, Q, C . Рассчитаем последовательно множество вариантов проходки канавы в данных условиях, т. е. осуществим циклический вычислительный процесс. Последовательно получаем $W(i), n(i), Q(i), C(i)$, $i=1, 2, \dots, n$, где i — номер варианта проходки. При этом в цикле определяются булевские значения переменных u_1, u_2, u_3, u_4 .

Для выбора вариантов, рациональных для внедрения в практику, необходимо составить такое булевское выражение, которое бы принимало значение true, что определит вариант проходки канавы, удовлетворяющий всем указанным условиям. Если хотя бы одно из условий нарушено, то булевское выражение равно false. Для нашего примера выражение имеет вид

$m: = u_1 \wedge u_2 \wedge u_3 \wedge u_4$.

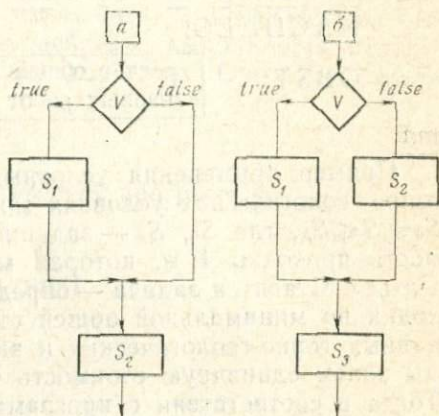


Рис. 3. Условные операторы:
 a — простой, b — составной, S_1 — безусловный,
 S_2, S_3 — любой

Пусть необходимо перейти к расчету общей стоимости канавных работ по участку, если рассчитанный вариант дает $m = \text{true}$, и перейти к расчету другого варианта, если $m = \text{false}$. Имеем блок:

```

NACHALO:   [ расчет варианта ];
begin   boolean u1, u2, u3, u4, m;
        m := u1  $\wedge$  u2  $\wedge$  u3  $\wedge$  u4;
        if m then go to OBST else go to
        NACHALO;
        OBST:   [ расчет общей стоимости
                  канавных работ по участку ]
end

```

Пример применения условных операторов. Пусть в данных горно-геологических условиях можно проходить канавы сечением $S_0 \leq S \leq S_k$, где S_0, S_k — заданные сечения, определяющие стоимость проходки 1 м, которая может увеличиваться или уменьшаться. Ставится задача — определить оптимальный вариант проходки по минимальной общей стоимости 1 м канавы. Пусть для данных горно-геологических и экономико-географических условий мы знаем единичную стоимость C_i для некоторого i -го варианта. Тогда в соответствии с программой производится последовательный расчет $C(i), C(i+1), C(i+2)$ и т. д.

Запоминать все значения C_i , которых может быть несколько десятков тысяч и более, нецелесообразно. Поэтому по мере производства программой расчетов любых (i) -го и $(i+1)$ -го вариантов будем сразу сопоставлять их стоимость $C(i)$ и $C(i+1)$ и выбирать из них минимум. Программа имеет вид:

```

begin
  K:   [ блок расчета C(i) по i от 1 до n
        с помощью оператора цикла ];
        c[i] := a;   c[i+1] := b;
  begin
    if a < b then minimum := a else minimum := b;
        c[i] := minimum;   i := i + 1; go to K
  end
end

```

Отметим, что запись $c[i]$ обозначает переменную с индексом, где i может принимать любые значения от 1 до n , но в процессе выполнения присваивания численно определено.

```

begin   for i := 1 step 1 until n do c := a(n1, . . . , nk, i);
        c := a(1);
end

```

```

for  $i := 2$  step  $1$  until  $n$  do
  begin  $c1 := a(i)$ ;
  if  $c < c1$  then  $minimum := c$  else
   $minimum := c1$ ;  $c := minimum$ 

```

end

end

Оператор цикла. При выполнении многих вычислительных процессов часто приходится иметь дело с циклическими вычислениями, когда одно и то же действие выполняется неоднократно с различными исходными данными. Оператор цикла имеет вид:

1) for $u := u0$ step hu until uk do P

(оператор цикла типа арифметической прогрессии);

2) for $u := A$ while B do P

(оператор цикла императивного типа);

3) for $u := A1, \dots, An$ do P

(оператор типа пересчета),

где u — переменная;

$u0, hu, uk$ — соответственно начальное значение, шаг и конечное значение переменной;

$A, A1, \dots, An$ — арифметические выражения;

P — оператор;

B — условие, которое может быть истинным или ложным при выполнении цикла.

Цикл первого типа выполняется следующим образом. Переменной присваивается значение $u0$, если $u0 < uk$, то выполняется оператор P , далее $u := u0 + hu$, если $u0 < uk$, выполняется оператор P и т. д., до тех пор, пока не обеспечится условие $u < uk$.

При выполнении цикла второго типа переменной u присваивается значение выражения A , производится проверка на истинность B и выполняется оператор P . Затем процесс повторяется и прекращается, если $B \equiv \text{false}$.

Работу оператора цикла третьего типа можно записать так:

$u := A1$; выполнить P ;

$u := A2$; выполнить P ;

$u := An$; выполнить P .

Все приведенные конструкции операторов цикла состоят из двух частей: заголовок цикла и область цикла (оператор P). Из приведенных операторов строятся составные операторы — блоки; при этом различные комбинации операторов заключаются в операторные скобки и разделяются между собою точкой с запятой. Условные операторы и операторы цикла предназначены для орга-

низации работы операторов присваивания и перехода, которые называются основными. Операторы строятся из более мелких единиц — выражений, которые соединяются между собой специальными символами — ограничителями.

В качестве ограничителей используются: знаки арифметических и логических операций; скобки, знаки равенств и неравенств.

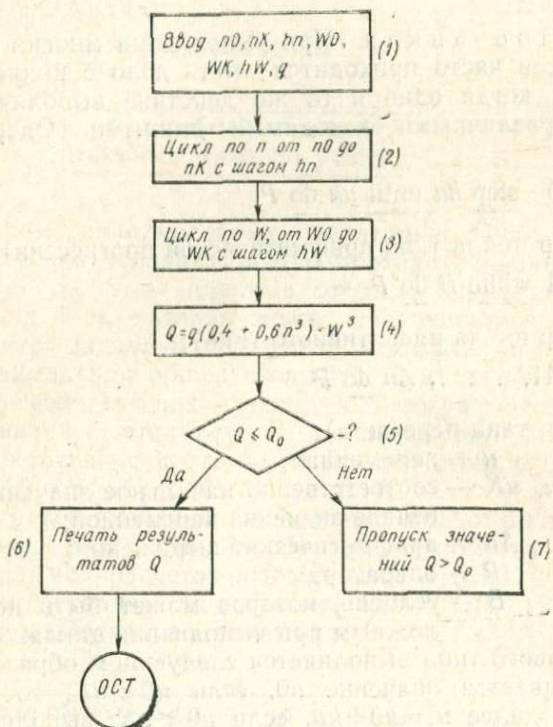


Рис. 4. Обособленный блок расчета величины заряда ВВ (пример). Цифрами показана последовательность операций

Для вычисления стандартных функций используются указатели функций.

Порядок выполнения арифметических действий в АЛГОЛе такой же, как и в обычном счете: возведение в степень, умножение, деление, вычитание, сложение. Для изменения естественного порядка выполнения действий используются круглые скобки. Действия общего порядка выполняются слева направо.

Примеры программирования арифметических выражений. Приведем пример записи на языке АЛГОЛа

известной формулы Борескова, применяемой для определения величины заряда ВВ и имеющей вид [5]

$$Q = q(0,4 + 0,6n^3) \cdot W^3,$$

где Q — величина заряда ВВ;
 q — удельный расход ВВ при $n=1$;
 n — показатель действия взрыва;
 W — глубина заложения заряда.

На АЛГОЛе эта формула запишется

$$Q := q \times (0,4 + 0,6 \cdot n \uparrow 3) \cdot W \uparrow 3.$$

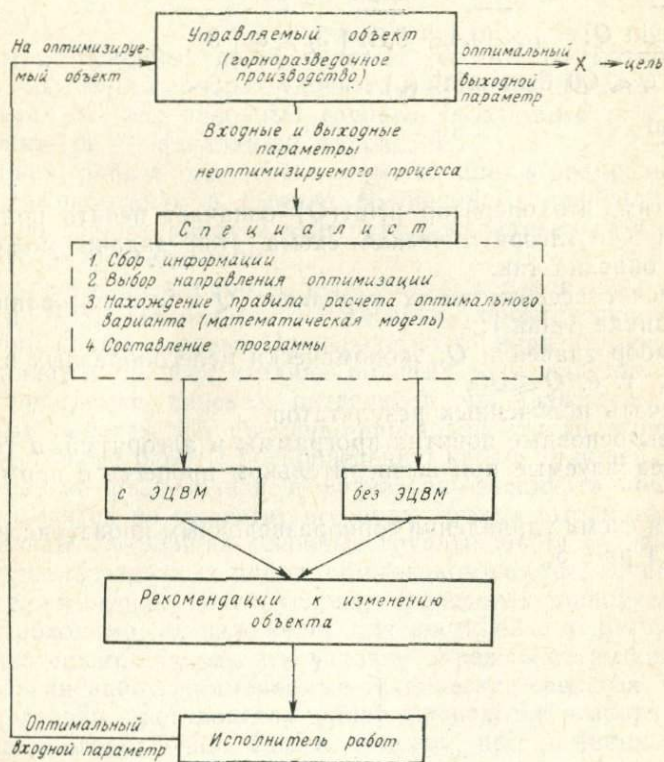


Рис. 5. Схема управления горноразведочным производством

Составим пример использования всех рассмотренных операторов. Задача заключается в расчете возможных значений величины взаимодействующего сосредоточенного заряда выброса Q для различных по сечению S вариантов проходки канав в породах с заданными физико-механическими свойствами. При этом нужно учесть, что взрываемость горных пород можно охарактеризовать

через показатель удельного расхода ВВ (q кг/м³ при $n=1$), показатель n изменяется с шагом hn от n_0 до nk , а глубина заложения заряда — с шагом hw от w_0 до wk . Кроме того, необходимо принять в расчет, что для данных условий экономически допустимый предел величины заряда ВВ установлен Q_0 , где $Q \leq Q_0$.

Оформим программу в виде обособленного блока (рис. 4) и представим ее на языке АЛГОЛ-60.

```

begin real  $n_0, nk, hn, W_0, Wk, hW, q, Q, Q_0, n, W$ ;
  for  $n := n_0$  step  $hn$  until  $nk$  do
    for  $W := W_0$  step  $hW$  until  $Wk$  do
      begin  $Q := q \times (0,4 + 0,6n \uparrow 3) \times w \uparrow 3$ 
      if  $Q \leq Q_0$  then print ( $Q$ )
      end
    end
end

```

Отметим, что оператор $\text{print}(Q)$ означает печать полученных значений Q . Алгоритмическая схема этой задачи может быть коротко описана так:

- 1) расчет всевозможных вариантов Q с использованием оператора цикла типа 1;
- 2) выбор значений Q , экономически целесообразных в данных условиях, т. е. $Q \leq Q_0$;
- 3) печать полученных результатов.

Таковы основные понятия программы и алгоритма, а также их схемы, реализуемые при вычислительном процессе с применением ЭЦВМ.

Общая схема управления горноразведочным производством приведена на рис. 5.

ОПТИМИЗАЦИЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Горноразведочные работы (значение, применение)

Одним из основных видов полевых геологоразведочных работ является проходка горноразведочных выработок. Последние подразделяются на две основные группы — подземные и открытые. Классификация их приводится на рис. 6.

В нашей работе мы используем термин «горноразведочные работы (выработки)» в смысле обобщенного понятия всех по назначению горных работ и выработок, выполняемых в процессе геологических исследований.

2065
Горноразведочные работы проводятся в различных климатических и горно-геологических условиях, практически на всей территории нашей страны. Производство горноразведочных работ осуществляется на всех стадиях полевых геологических исследований: при съемке, поисках, разведке и при разведочно-эксплуатационных работах. На съемочно-поисковой стадии выполняются открытые горные работы по проведению канав, траншей, закопаш и шурфов; на разведочной и разведочно-эксплуатационной стадиях проходятся по существу все виды горных выработок.

Выделяют следующие основные группы общих условий проведения горноразведочных работ: общеэкономические, горнотехнические и геологические. Знать условия проведения горноразведочных работ необходимо, их изложение при постановке задач оптимизации обязательно, так как эти условия определяют выбор способа и технологии работ, применяемые технические средства. С учетом общих условий производства работ проводится выбор критерия качества и ограничений. Так, к примеру, при решении задач по оптимальному управлению проведению открытых горноразведочных выработок в районах Крайнего Севера одним из возможных критериев качества при сопоставлении различных способов проходки канав является T_{\min} — минимальная продолжительность работ. Мощность наносов, определяющая проектную глубину канав, не превышающую 6—8 м, является ограничивающим параметром, влияющим на критерий качества. Ниже кратко охарактеризуем общие условия проведения открытых горноразведочных работ.

Общеэкономические условия включают следующие факторы: район работ, климат, пути сообщения и состояние транс-

портных магистралей, энергетическую сеть, обеспеченность рабочей силой и материалами и т. д. Влияние этих факторов на стоймость горноразведочных работ ясно.

Горнотехнические условия включают рельеф, условия и глубину залегания рудных тел, свойства пород и водоносность участка. Сочетание элементов залегания рудного тела с

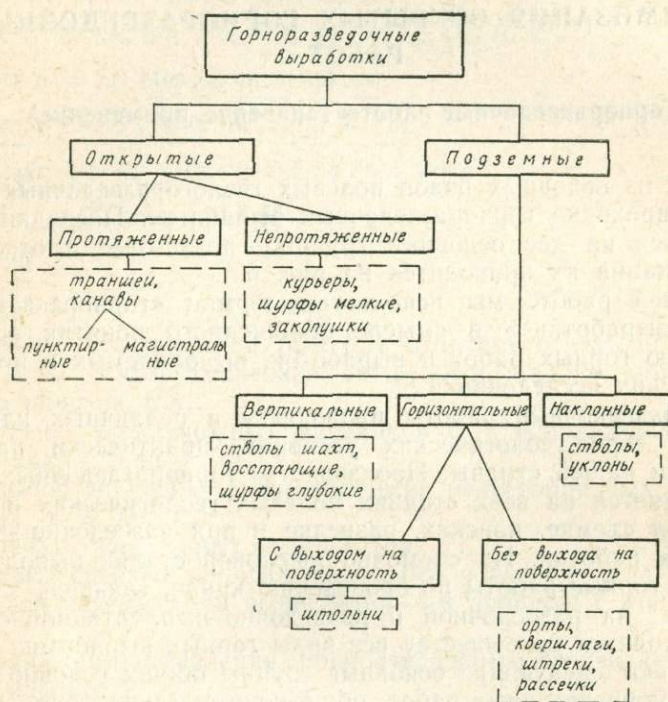


Рис. 6. Типы горноразведочных выработок

рельефом определяет выбор типа горной выработки (например, штольня может проходиться лишь на участках с горным рельефом); глубина залегания рудного тела не только определяет целесообразный тип выработки (например, шурф или шахта), но может служить и ограничивающим фактором (каналы проводятся на глубину не свыше 5 м). Тип разрабатываемых горных пород оказывает влияние на выбор методов и средств проходки. Например, в плавунках нецелесообразно проведение траншей, в трещиноватых породах проведение траншей возможно, но требует крепления боковых стенок; в валунной морене малоэффективно применение бульдозерной проходки траншей и т. д.

Геологические условия (размеры и форма тел полезных ископаемых, равномерность распределения полезного компо-

нента и т. д.) определяют направление проводимых горных выработок (выработки, как правило, проходятся вкрест простирания рудного тела) и выбор технических средств, объем и вид горных выработок (шурфы по сетке или шурфы с рассечками и т. п.).

Основной особенностью горноразведочных работ является неопределенность исходных данных, сложность получения полной информации об условиях строительства горной выработки. Для горноразведочных работ характерен принцип достижения наименьших удельных затрат средств и времени. Однако часто для сокращения времени разведки месторождения целесообразно идти на повышенные затраты труда и средств с целью обеспечения высоких темпов работ.

Ниже приведена краткая характеристика широко применяемых открытых горноразведочных выработок. Канавы (траншеи) проходятся при изучении поверхности; целью их является вскрытие, прослеживание и оконтуривание рудных тел. Проходка шурфов осуществляется в основном при разведке горизонтальных или пологозалегающих рудных тел, при геологическом картировании.

Для канавно-шурфовых работ характерны незначительные затраты труда и средств при достаточной достоверности геологических данных. Темпы проходки этих выработок выше по сравнению с подземными. Однако широкое применение этих выработок ограничивается малой глубиной (канавы до 7—8 м и шурфы до 30—40 м), а также незначительной механизацией работ.

Карьер является разведочной и разведочно-эксплуатационной выработкой, обеспечивает вскрытие, прослеживание и опробование рудных тел, а также попутную добычу полезных ископаемых. При относительно простой схеме проветривания карьера усложнены схемы водоотлива и выдачи породы. Карьерные работы не получили широкого распространения в горноразведочной практике.

Как известно, различают два основных способа производства горноразведочных работ — механизированный и ручную. К механизированным способам относят полностью механизированный проходческий процесс и частично механизированный. До настоящего времени при проведении открытых горноразведочных выработок преобладает частично механизированный способ, при котором часть операций выполняется вручную. Даже при комплексной механизации некоторые вспомогательные операции, входящие в цикл, выполняются вручную.

Весьма значителен уровень ручного труда при канавно-траншейных работах. Достаточно сказать, что на долю немеханизированного (ручного) способа ежегодно приходится свыше 20% всего объема работ по проходке канав и траншей. Велика доля ручного труда и при таких способах проходки, как бульдозерный и экскаваторный, а также с использованием энергии взрывчатых веществ. Так, при бульдозерном и экскаваторном способах вручную осуществляются зачистка подошвы и стенок выработки с целью

подготовки к документированию и опробованию, а также отбор пробы; при проведении канав энергией взрыва — бурение шпуров или проходка лунок, подноски ВВ и размещение заряда, уборка породы из выемки, зачистка и опробование. Высок уровень ручного труда и на шурфовых работах.

Горноразведочные процессы могут быть прерывными и непрерывными. Преобладают прерывные процессы, которые в свою очередь подразделяются на циклические и периодические. Пример относительно непрерывного вида работ — подача электроэнергии к горному участку. Примером циклического вида работ служит проходка магистральной канавы в три смены за сутки; периодического процесса — проветривание шурфа после взрывания.

Различают три основные схемы проходки горноразведочных выработок: последовательная, параллельная и комбинированная. При последовательной схеме каждая новая выработка задается с учетом геологических данных, полученных по предыдущей выработке. Достоинства этой схемы: рациональное и целенаправленное использование объемов, больший объем (информативность) исходных данных для постановки задач оптимизации; недостаток — резкое увеличение общих сроков работ на участке.

При параллельной схеме происходит одновременное продвижение забоев проходимых выработок. К преимуществам ее относится снижение сроков работ и концентрация ресурсов; недостатком является малая информативность и вероятность нерационального использования объемов.

Приведенный выше краткий обзор состояния горноразведочных работ позволяет сделать следующие выводы:

- 1) разработку технических средств необходимо осуществлять с учетом разнообразных специфических горноразведочных условий;
- 2) эффективность и экономичность горноразведочных работ во многом определяется правильным выбором технических средств и применяемой технологией;
- 3) выбор технологии проведения выработок, средств механизации и параметров проходки должен быть научно обоснован. Такое обоснование возможно на основе широкого внедрения в горноразведочную практику методов оптимизации.

Обоснование возможности оптимизации горноразведочных работ

Горноразведочное производство является типичной трудоемкой постоянно действующей системой, которой присуще многообразие конкретных задач и условий. Напомним, что с формальных позиций управляемая система должна содержать объект управления, управляемые и управляющие параметры и критерий качества. Применительно к горноразведочному производству объектом управления может служить любая относительно обособленная физическая система, обладающая единым свойством полезности — горно-

разведочная бригада (участок), горная выработка, процесс проведения выработки и т. п. Каждый объект управления характеризуется начальным состоянием, уточняемым по исходным данным. Исходные данные могут быть неуправляемыми (например, природные условия производства горноразведочных работ — нельзя изменить мощность наносов, определяющую возможность проведения канавы) и управляемыми (состав бригады, технологический способ и т. п.) [10].

Решение задач оптимизации требует наличия информации об объекте управления, которая может быть трех видов: 1) априорная, т. е. по данным предшествующих работ, 2) оперативная, получаемая в процессе проведения работ, и 3) теоретическая.

При проектировании работ основными видами информации должны быть априорная и теоретическая; при производстве работ — оперативная и априорная. Использование априорной и теоретической видов информации не представляет затруднений, более сложно организовать своевременное использование информации оперативного вида. Техническим средством для этого должны служить малые ЭВМ, позволяющие осуществлять обработку поступающих данных непосредственно на участках работ.

При оперативной информации используется комплекс данных и вероятностных характеристик, показывающих уровень информации до работ и после них. Надежной информационной базой для оптимизации является совокупность всех технико-экономических и горногеологических характеристик, учет которых позволит не только оптимизировать процесс на стадии проектирования, но и осуществлять оперативное управление объектом при производственных работах. Такое оперативное управление может быть обеспечено применением типовых стандартных программ, пути создания которых (накопление имеющихся и конструирование более сложных из фрагментов имеющихся) действительно и для горноразведочных работ. Наличие информации об объекте определяет возможность его математического описания. Многие процессы горноразведочного производства с достаточной точностью описываются дифференциальными уравнениями. Сущность отдельных технологических процессов характеризуется уравнениями, основанными на знании начальных и конечных параметров, причем количество этих параметров определяется траекторией системы в n -мерном пространстве. Соответственно количество требуемых параметров не должно превышать n .

Движение объекта управления или его изменение обеспечивается за счет воздействия на объект с помощью управляющих параметров, в качестве которых могут быть приняты многочисленные параметры и показатели, в том числе масса заряда ВВ, число шпуров, одновременно работающих перфораторов (или других механизмов), тип ВВ, глубина шпура, расстояние откатки и т. п. Изменение этих параметров вызывает «движение» соот-

ветствующего объекта управления и определяет управляемые параметры.

Невозможно перечислить все управляющие и управляемые параметры, приведем лишь несколько примеров из горноразведочной практики. Длина шпуров, их число в забое и величина заряда ВВ обуславливают уходку за цикл. В этом примере три управляющих параметра влияют на один из управляемых параметров — уходку за цикл. В качестве управляемого параметра могут быть объем отбитой горной массы, сечение выработки, КИШ, стоимость, сроки и скорость проходки выработки и т. д. В приведенном выше примере уходка за цикл не может быть бесконечно большой, а должна сочетаться с принятой организацией труда и целесообразной структурой цикла. К примеру, если для данных конкретных условий уходка за цикл не должна превышать 3 м, тем самым характеризуя управляемую систему, мы вводим ограничение по уходке ($l < 3,0$ м). Можно рассмотреть этот пример, исходя из допустимого сечения выработки ($3,0 < S < 4,0$ м²). Отсюда следует, что в задачах горноразведочного производства возможным их элементом являются ограничивающие параметры или факторы.

И, наконец, рассмотрим еще один обязательный для управляемых систем элемент, каковым является критерий качества. Специалисты горняки знают, что нетрудно обеспечить проведение выработки заданного сечения, для этого применяют различные методы управления — изменяют число шпуров и их расположение в забое, величину зарядов ВВ, способ взрывания. Однако важно не просто пройти выработку заданного сечения, при этом учитывается качественный показатель проходки (суммарный расход ВВ, стоимость проведения 1 м выработки, темп проходки), т. е. проходка выработки данного сечения в рассматриваемом примере должна быть качественной по какому-либо заданному критерию. Следовательно, и в задачах горноразведочной практики обязательно учитывается критерий качества.

При постановке задач по оптимизации следует учитывать необходимость обязательного существования экстремальной точки, что должно быть обеспечено правильным выбором управляющих и управляемых параметров. Так, характерным примером может служить анализ процесса взрыва на выброс в грунтах. Известно, что эффект взрыва (по показателю или проценту выброса грунта энергией взрыва) является функцией от степени водонасыщенности грунта (рис. 7). На левой ветви выброс изменяется в пределах от B_1 до B_0 ; на правой ветви — от B_0 до B_2 . Следовательно, точка B_0 , характеризующая экстремум, указывает на возможность постановки данной задачи как задачи оптимизации.

Приведем еще один пример задачи установления оптимального параметра по экстремуму. Пусть требуется для одиночного сосредоточенного заряда выброса заданной величины $Q = 3$ кг найти оптимальную глубину заложения заряда. В данной постановке задача неопределенна, так как не известен критерий качества.

Дополним условие задачи: обеспечить образование выемки выброса максимальной видимой глубины P . Принципиальная возможность решения данной задачи методом оптимизации следует из качественной картины изменения параметра P от глубины заложения заряда W (рис. 8). Экстремум P_0 даст оптимальное решение задачи при данном Q и W_0 . В этой задаче присутствуют все составляющие элементы задач оптимизации: объект управления —

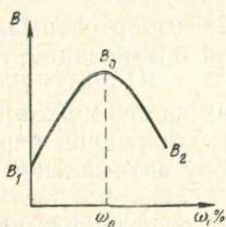


Рис. 7. Зависимость выброса грунта энергией взрыва (B) от степени влажности грунта (ω)

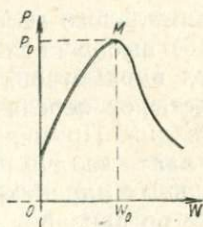


Рис. 8. Характер зависимости видимой глубины воронки от глубины заложения заряда W ($Q = \text{const}$)

процесс взрывания заряда Q , управляемый параметр P , управляющий параметр W , ограничение $Q \leq 3$ кг, функционал P_{\max} , точка экстремума M .

Таким образом, горноразведочные работы характеризуются наличием всех элементов, присущих задачам оптимизации. Следовательно, многие задачи горноразведочной практики могут быть решены методом оптимизации. Объективная возможность оптимизации обусловлена тем, что математические модели оптимизируемых процессов носят, как правило, формальнологический непрерывный характер; меньше используются корреляционно-статистические модели.

Многообразие конкретных задач оптимизации горноразведочных работ подчиняется единым правилам выбора оптимизируемого процесса, начальных условий и критерия качества, поэтому при постановке задач и установлении ограничений следует учитывать только главные связи между параметрами, существенно влияющие на результаты оптимизации.

Применительно к специфике горноразведочных работ все методы управления можно разделить на две группы: изменяющие технологию работ и не изменяющие технологию работ. С учетом этого деления нами приводятся возможные разновидности горноразведочных задач.

1. Методы управления, изменяющие технологию работ: 1) выбор технологии и технологических схем; 2) выбор технических средств; 3) выбор параметров технологии; 4) выбор параметров технических средств.

II. Методы управления, не изменяющие технологию работ: 1) управление процессом; 2) управление объектом; 3) последовательность работ; 4) разработка рациональных форм организации труда.

Большее применение при решении производственных задач находят методы, относимые к первой группе. Таким образом, при оптимизации горноразведочных работ следует решать следующие частные задачи:

1) выбор оптимального способа; 2) выбор оптимальных технических средств; 3) выбор оптимальной организации труда; 4) выбор оптимальных параметров.

Каждая из четырех перечисленных задач может быть решена методом оптимизации. Применение в ближайший период, на наш взгляд, должны найти задачи по выбору оптимальной организации труда и оптимальных параметров.

Геологические организации страны ежегодно выполняют большой объем работ по проходке канав и траншей (до 10—11 млн. м³). Известно, что в настоящее время почти половина всего объема канавных работ выполняется с использованием энергии взрывчатых веществ, что обусловлено следующими преимуществами:

1) повсеместной доступностью применения независимо от свойств горных пород и характера рельефа местности; 2) относительной простотой технологии; 3) более высокими технико-экономическими показателями в сравнении с ручным способом.

Применяется несколько способов производства канавно-траншейных работ. Нами уделено главное внимание наиболее широко используемому взрывному способу. Ниже кратко характеризуем технологию проведения канав с применением энергии взрыва.

Геолог задает направление оси канавы и начальную точку канавы, а также сообщает горнякам примерный геологический разрез участка работ и проектную глубину канавы. Вдоль оси канавы на расчетном расстоянии друг от друга (в пределах от 0,8 W до 2 W , где W — глубина заложения заряда) проходят лунки или бурят шпурсы. Глубина этих выработок не превышает 1,2—1,6 м. Для размещения вертикально-удлиненных зарядов используются шпурсы; сосредоточенные заряды размещают в лунках или котловых полостях, образуемых простреливанием шпуров. Масса заряда простреливания колеблется в пределах 0,05—0,4 кг, масса основного заряда устанавливается в диапазоне от 0,6 до 5 кг [11]. Применяют все известные способы взрывания — огневой, электрический, детонирующим шнуром, комбинированный. При взрывании происходит рыхление или дробление горной среды в объеме действия заряда, дополняемое при действии зарядов выброса транспортированием горной массы за пределы выработки. Уровень выброса грунта при этом способе определяется энергией заряда ВВ и условиями взрывания. В результате взрыва образуется выработка, целиком заполненная горной породой (при действии зарядов дробления), или выемка выброса, лишь частично запол-

ненная горной массой. Уборка породы из выемки производится вручную, реже механизмами — скреперами и бульдозерами. При большой проектной глубине канавы (свыше 2 м) применяют многоинтервальный способ углубки с последовательной выемкой горной породы по глубине. Количество интервалов определяется проектной глубиной канавы и возможной в данных условиях глубиной заложения заряда ВВ.

Наиболее трудоемкими процессами являются создание зарядной камеры (на производство лунок расходуется до 60% всего времени на цикл, на шуры — до 20%) и уборка горной массы из контуров выработки. По достижении проектной глубины канавы проводят ее зачистку по подошве, геологическое документирование и опробование.

В 1972 г. под руководством автора при проведении канав взрывом на выброс было начато внедрение линейно-протяженных горизонтальных (шнуровых) зарядов ВВ [11]. Такие заряды размещаются в шелевых зарядных камерах. Применение шнуровых зарядов повышает эффективность использования энергии взрыва, повышает технологичность работ. Проходческий цикл при этом способе включает по существу те же процессы, что и при применении сосредоточенных зарядов — создание зарядной камеры, зарядание ВВ, взрывание, очистку канавы от разрушенной породы.

При проведении канав энергией взрыва задолжены рабочие (проходчики, взрывники, механизаторы) и ИТР (горный мастер и геолог-документатор), а также механизмы и машины (автомобильный или гусеничный транспорт, скреперы, бурильные устройства). Кроме того, необходимы затраты материалов (взрывчатых веществ и средств взрывания, горюче-смазочных материалов, бурильного инструмента и т. д.).

Изложенное позволяет сделать вывод, что канавные работы являются объектом, относящимся к классу сложных систем, так как:

- 1) в системе функционируют люди, среда, машины;
- 2) система подвержена многим случайным воздействиям, но она управляема;
- 3) невозможно экспериментально рассмотреть все параметры и их взаимосвязь.

Известно, что канавно-траншейные работы состоят из следующих стадий: проектирование работ, организация работ на участке, производство работ.

Проектирование включает: 1) выбор участка работ, 2) расчет геологически обоснованного объема работ, 3) выбор метода (способа) и технологии, 4) установление параметров технологических процессов, 5) установление последовательности работ по участкам (последовательность отработки участков) и период выполнения их, 6) расчет плановых технико-экономических показателей.

Организация включает: 1) обеспечение рабочей силой, 2) завоз требуемых материалов и технических средств, 3) строительство

подъездных путей, жилых и производственных помещений, 4) обеспечение энергетической базы, 5) разработку форм разделения и кооперации труда, 6) улучшение организации и обслуживания рабочих мест.

Производство работ заключается: 1) в разметке оси канавы, 2) бурении шпуровых или проходке зарядных камер, 3) зарядании ВВ и выполнении взрывных операций, 4) уборке разрушенной породы из канавы, 5) расчистке канавы, документировании и опробовании, 6) засыпке канавы, планировке поверхности участка.

Каждая из перечисленных стадий имеет большое значение и определяет эффективность канавных работ в целом и каждая из них подлежит оптимизации. Правильное проектирование открытых горноразведочных работ является сложной задачей, требующей обязательного применения методов оптимизации. В книге приведено решение задач по выбору наилучшего для данных условий варианта проходки — сопоставляются способы с применением сосредоточенных и шнуровых зарядов ВВ, определено оптимальное число интервалов углубки и т. д.

Одной из целей оптимизации стадии «организация работ» является переход на научную организацию труда (НОТ). К этой стадии относится приведенная в брошюре задача по последовательности отработки участков канавных работ. Многие примеры и задачи, рассматриваемые здесь, относятся к третьей стадии канавных работ — наиболее трудно оптимизируемому процессу.

Как было показано выше, канавные работы характеризуются большим количеством взаимодействующих элементов, поэтому исследование канавных работ как системы посредством одной модели сложно; модель в этом случае будет труднореализуема. Трудность усугубляется сложностью поведения системы из-за связи со случайным характером внешних воздействий и большим числом обратных связей, что требует ввода ряда допущений. Для упрощения исследования системы в целом и повышения достоверности получаемых результатов в данной работе мы выделяем ряд обособленных задач (организационных и технологических), решение и анализ результатов которых позволяет повысить эффективность канавных работ в целом. При решении многих задач оптимизации канавных работ может быть использован метод многошаговой оптимизации на основе динамического программирования Р. Беллмана. Конечной целью оптимизации канавных работ является обеспечение минимальной стоимости единицы геологической информации. Частной целью оптимизации канавных работ должно быть повышение экономической их эффективности, которая может быть определена по большому числу критериев оптимальности.

Общим критерием качества для канавных работ являются минимальные приведенные затраты, т. е. затраты на проходку 1 м канавы. В данной работе мы оперируем в основном иным критерием качества — минимальной приведенной стоимостью (C_{min}). Правомерность такой подмены объясняется следующим. Известно,

что критерии качества различаются по степени их связи с различными группами факторов. Наиболее показательны те критерии качества, которые включают в процесс оптимизации наибольшее количество факторов, различающихся по своей природе. С этих позиций наиболее представительны приведенные затраты. Однако следует подчеркнуть, что процесс оптимизации канавно-траншейных работ более целесообразен не в масштабе крупных геологических организаций, а на уровне отдельных участков, отдельных мелких организационных единиц (партий, отрядов), а также на уровне отдельных выработок (канавы, траншеи). Понятно, что в этих условиях изменение числового значения капитальных вложений несущественно. Отсюда в известной формуле

$$K_{\text{пр}} = c_{\text{сб}} + E_{\text{н}} \cdot K,$$

где $E_{\text{н}}K$ — величина постоянная. Тогда с учетом приведенных соображений, принимая во внимание, что производная константы обращается в нуль, оптимизация по $K_{\text{пр}}$ эквивалентна оптимизации по себестоимости.

Итак, наиболее общим критерием качества нами принята приведенная себестоимость канавных работ. Однако при рассмотрении некоторых частных задач, в основном технологического плана, возможно (и неизбежно) использование и других критериев качества, в частности технологических. Отметим, что оптимизация одного и того же процесса по разным критериям качества может дать противоречивые результаты, поэтому нельзя механически переносить результаты оптимизации одной какой-либо задачи на все другие задачи горноразведочной практики.

Возможно (и неизбежно) использование и других критериев качества. Приведем перечень возможных критериев качества при оптимизации канавных работ: 1) суммарная стоимость работ (min), 2) физический объем работ (max или min), 3) суммарные или удельные трудозатраты (min), 4) суммарные или удельные затраты ВВ (min), 5) суммарный или удельный объем подготовительных работ (min), 6) суммарные или удельные затраты времени (min), 7) суммарные или удельные затраты энергии (ВВ, электрической, пневмо) (min), 8) объем горной массы, оставшейся в канаве (min), 9) протяженность выработки (max), 10) глубина выработки (max), 11) сечение $S = S_{\text{проектное}}$ и т. п.

Таковы некоторые возможные критерии качества, однако наиболее полно отражают уровень экономической эффективности два показателя: стоимость проходки и время, затрачиваемое на проходку. По существу два этих показателя участвуют в оценке любого варианта, так как темпы проведения канав характеризуют интенсификацию и концентрацию работ. Следовательно, основными технико-экономическими показателями скоростного проведения канав являются: производительность труда проходчиков, стоимость проведения 1 м выработки с учетом глубины канавы и месячный объем работ (темп проходки).

Вместе с тем увеличение темпов проходки канав не всегда приводит к улучшению других технико-экономических показателей. Важно добиться увеличения как темпов проходки, так и всех остальных технико-экономических показателей. Особо следует подчеркнуть, что скорость проходки не находится в прямой зависимости от стоимости работ [10]. В определенных условиях стоимость работ увеличивается, несмотря на возрастание скорости. Наиболее часто на практике ставится задача достижения

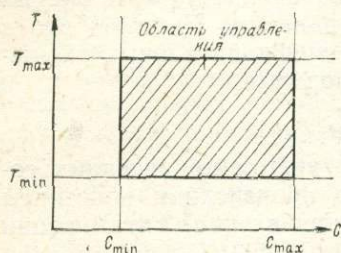


Рис. 9. Область управления канавными работами.

T — продолжительность работ, C — приведенная стоимость работ

максимальной скорости проведения канав при минимизации удельной (или приведенной) стоимости работ. Оптимальная область такой постановки задачи приведена на рис. 9. На схеме выделена область управления, но оптимальный вариант определяется заданным критерием качества. Формулировка задачи может включать следующие условия:

1. Продолжительность проходки должна быть минимальной при неограниченных суммарных приведенных затратах. Имеем $T_i = T_{\min}$, а C_i не лимитировано. В принципе C_i всегда лимитировано, но в данном случае считается, что максимальное значение C_i весьма велико.

2. Продолжительность проходки должна быть минимальна при ограниченной стоимости работ. Имеем $T_i = T_{\min}$ при $C_i \leq C$.

3. Суммарные приведенные затраты должны быть минимальными при неограниченной продолжительности процесса. Имеем $C_i = \min$ при T_i .

4. То же, при ограниченной продолжительности. Имеем $C_i = \min$ при $T_i \leq T$.

Нами специально приведено четыре возможных варианта управления при постановке одной из распространенных задач канавных работ, чтобы еще раз подчеркнуть необходимость тщательной постановки задачи и значение правильного выбора критерия качества.

Таким образом, задачи горноразведочного производства, в том числе и канавных работ, могут быть рассмотрены с позиции теории оптимизации, применение которой является необходимым условием совершенствования этого вида работ.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ОТКРЫТЫХ ГОРНОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Выше указывалось, что для оптимизации канавных работ в целом надлежит оптимизировать каждую из трех выделенных стадий организации и производства канавных работ, оптимизировать каждый из процессов, составляющих проходческий цикл. В брошюре рассмотрены несколько основных задач, наиболее полно характеризующих проведение канав энергией взрыва и демонстрирующих возможности методов оптимизации.

Последовательность приводимых задач обусловлена логикой математической взаимосвязи, так как почти каждая последующая задача базируется на выводах предыдущей. Материал изложен таким образом, чтобы облегчить читателю его прочтение. Однако при проектировании канавных работ более рационален следующий порядок рассмотрения задач: 8, 9, 1, 3, 4, 5, 6, 2, 7. При решении ряда задач за уровень сопоставления принят ручной способ проходки канав, характеризующийся наибольшей себестоимостью. Такой выбор обусловлен тем, что в соответствии с теорией системного анализа система отсчета должна быть внешней средой относительно оптимизируемой системы и обладать предельными свойствами. При проходке канав и траншей именно ручной способ обладает экстремальным (наибольшим) значением показателя C .

Задача 1. Транспортировка ВВ

Актуальность задачи подтверждается повышенными затратами средств на транспортировку ВВ от заводов-изготовителей и складов ВМ к участкам канавных работ. Отметим, что стоимость ВВ достигает 60% и более себестоимости проходки канав энергией взрыва, что в определенной степени определяется транспортными издержками. Так, 1 т зерногранулита 30/70 при отпускной цене 330 р. имеет для Хапчерангинского участка канавных работ (Читинская область) расчетную стоимость 431,23 р. Высокая стоимость ВВ для ряда участков канавных работ является фактором, ограничивающим применение взрывных методов. Поэтому задача о транспортировке ВВ может быть рассмотрена с позиций определения максимально допустимого для данных конкретных условий расхода ВВ на проведение 1 м канавы.

Математическое описание задачи поясняется рис. 10. Пусть к месту канавных работ потребителя X ВВ может быть поставлено несколькими поставщиками Y_i . Соответствующие пути транспортирования запишем в виде $R_0(R_{01}, R_{02}, \dots, R_{0m})$ и R_1, R_2, \dots, R_n . Количество маршрутов перевозки и их направление (а отсюда и вид кривой $X \rightarrow Y_i$) могут быть различными, и при решении конкретных задач устанавливаются из реальных условий. Нами эта задача рассматривается в усложненном общем виде. Считаем, что объем груза, который можно перевезти по любому из возможных путей $Y_i \rightarrow X (R_j)$, весьма велик.

Обозначим объем ВВ, подлежащей поставке к X от Y_i , через b_j (кг). Условие экономической целесообразности применения взрывных методов проведения канав выразим следующим образом:

$$\Delta C_{ВВ} \leq \Delta C_p, \quad (1.1)$$

где $\Delta C_{ВВ}$ и ΔC_p — себестоимость проходки 1 м канавы данного сечения S энергией ВВ и вручную, р/м.

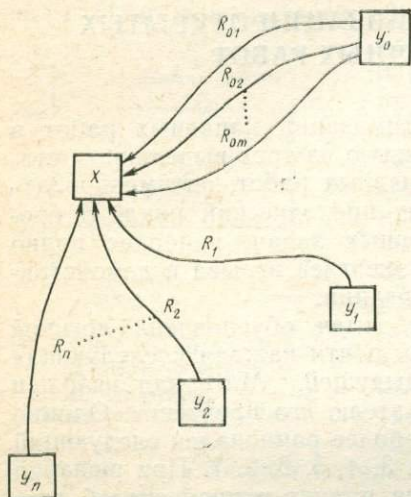


Рис. 10. Схема перевозки ВВ

Выразим приведенную стоимость проходки канавы взрывным методом

$$\Delta C_{ВВ} = (C_{ОВВj} + C_{ТВВj} \cdot R_j) q_s + C_{ВВ}, \quad (1.2)$$

где $C_{ОВВj}$ — отпускная цена 1 кг ВВ данного типа поставщиком Y_j , р/кг;

$C_{ТВВj}$ — стоимость транспортирования 1 кг ВВ на 1 км ($Y_j \rightarrow X$), р/кг·км;

R_j — расстояние перевозки от Y_j до X , км;

q_s — удельный расход ВВ на 1 м канавы сечением S м², кг/м;

$C_{ВВ}$ — прочие расходы на 1 м канавы сечением S , исключая затраты на ВВ, р/м.

Преобразуем (1.1) в вид

$$[(C_{ОВВj} + C_{ТВВj} \cdot R_j) q_s + C_{ВВ}] \leq \Delta C_p. \quad (1.3)$$

Все составляющие формулы (1.3) положительны. Из (1.3) имеем

$$q_s \leq \frac{\Delta C_p - C_{ВВ}}{C_{ОВВj} + C_{ТВВ} \cdot R_j}. \quad (1.4)$$

Подчеркнем, что знаменатель этой формулы не равен нулю. Показатель q_{smaxj} больше нуля для взрывных способов проходки канав; при $q_{smaxj} < 0$ имеем вариант абсолютной экономичности ручного способа проходки $\Delta C_p < C_{BB}$.

Используя (1.4), определим максимальный допустимый расход ВВ на 1 м выработки сечением S при перевозке ВВ по маршруту от Y_j до X . Имеем

$$q_{smaxj} = \frac{\Delta C_p - C_{BB}}{C_{oBBj} + C_{ТВВj} R_j}, \quad (1.5)$$

где $j=0, 1, \dots, n$.

В формуле (1.5) числитель характеризует максимально допустимые затраты на ВВ (данного типа при заданном сечении), а знаменатель — стоимость единицы ВВ с учетом перевозок к потребителю.

Условием экономической целесообразности перевозок (и применения ВВ при проходке канав) будет

$$q_s \leq q_{smaxj}, \quad (1.6)$$

где $j=0, 1, \dots, n$.

Однако неравенство (1.6) нестрого характеризует область экономической целесообразности перевозок (доказательство этого положения нами опускается). Анализ показал, что более корректно представить это условие в виде

$$\frac{q_{smaxj} - q_s}{q_{smaxj}} > k, \quad (1.7)$$

где k — положительное, наперед заданное число.

Таким образом, степень экономической целесообразности перевозок ВВ для данных условий тем выше, чем больше относительная разность в значениях максимального и действительного удельных расходов ВВ. Алгоритм решения представим в виде:

1. Рассчитать значения q_{smax} (1.5) с учетом ограничения $\Delta C_p > C_{BB}$.

2. Найти удельные расходы ВВ на проходку 1 м канавы по каждой из групп проектных сечений S_i (q_1, q_2, \dots, q_r).

3. Сопоставляя значения q_1, \dots, q_r для каждой из групп по сечениям S_i со значениями q_{smax} (п. 1), определить для потребителя X экономически выгодные маршруты перевозки ВВ (R_j) и соответственно целесообразных поставщиков ВВ (Y_j).

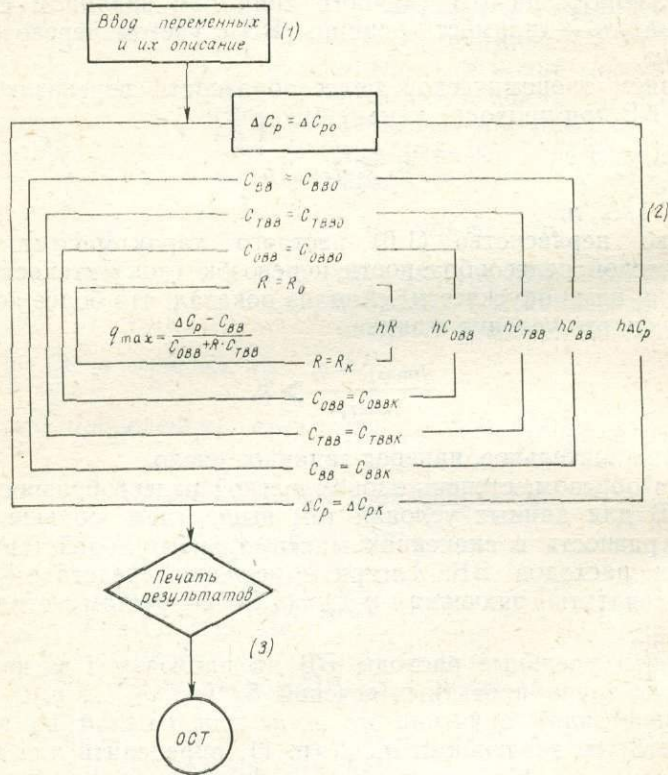
Результат решения оформляется в виде формы 1 (табл. 2).

Рассмотрим вариант алгоритма для машинного расчета рис. 11. В программу вводят начальные и конечные значения переменных (блок 1), причем ввод переменных в ЭВМ осуществляется в той последовательности, в какой они записаны, слева направо, в скобках оператора read.

Форма 1

№ п/п	Сечение канавы по проекту	Целесообразный поставщик ВВ	$q_{s \max}$	Объем перевозок ВВ

Расчет $q_{s \max}$ производится при последовательном выполнении пяти вложенных друг в друга операторов цикла типа арифме-

Рис. 11. Алгоритм машинного расчета $q_{s \max}$

тической прогрессии (2) (см. рис. 11). Печать полученных результатов (3) имеет вид таблицы по форме 2 (табл. 3).

Против каждого значения $q_{s \max j}$ ЭВМ впечатывает соответствующие ему значения всех параметров формулы (1.6). Таким

Форма 2

$q_{s \max j}$	ΔC_p	$C_{ВВ}$	R_j	$C_{ТВВ}$	$C_{0 ВВ}$

образом, зная конкретные значения составляющих параметров (включая протяженность маршрута), мы можем определять соответствующие им значения максимального удельного расхода ВВ. Поясним, что большему значению $q_{s \max j}$ соответствует j -й маршрут большей протяженности, т. е. в этом варианте затраты средств на транспортировку таковы, что позволяют применять параметры взрывных работ, обеспечивающие повышенный расход ВВ.

Разработанный алгоритм и Программа позволяют решать задачу в общем виде при большом количестве вариантов по переменным. В реальных условиях решение задачи ограничивается рассмотрением лишь нескольких вариантов, что упрощает постановку и решение задачи, которая и в этом случае выполняется по разработанной принципиальной схеме.

Поясним некоторые исходные положения к решению задачи. Пусть в данном производственном подразделении на участке X при общем объеме канавных работ V проектные сечения канав составляют S_1, S_2, \dots, S_k , а соответствующие им объемы V_1, V_2, \dots, V_k и удельные расходы ВВ — q_1, q_2, \dots, q_k . Возможные поставщики ВВ к участку X и соответствующие им маршруты, а также расстояния перевозки приведены на схеме рис. 12. Подчеркнем, что при 11 поставщиках ВВ рассматривается 12 возможных маршрутов за счет наличия R_{01} и R_{02} .

В данной постановке задача может быть рассмотрена в варианте поставки ВВ с заводов-изготовителей к геологическим организациям или со складов (базисных постоянных или временных) к участку канавных работ. При этом считаем, что известны расстояния перевозок, отпускная цена ВВ, единичные стоимости проходки канав и т. п. Задача заключается в том, что из всех возможных

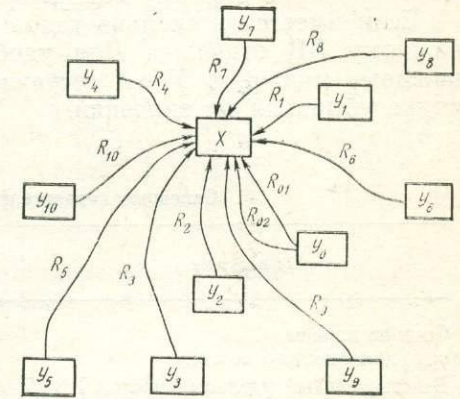


Рис. 12. Схема перевозок ВВ (к постановке задачи)

поставщиков ВВ и соответствующих им маршрутов перевозки выбрать один наиболее экономичный (оптимальный по стоимости). Отметим, что этот выбор производится путем сопоставления расчетных значений $q_{s \max}$ с учетом объема работ по каждой группе канав по проектным сечениям. В том случае, когда существует несколько значений q_s , удовлетворяющих одному и тому же j -му маршруту перевозки, сравнение и выбор производится по экономическому эффекту от внедрения оптимального маршрута. Имеем

$$\mathcal{E}_s = \left(1 - \frac{q_s}{q_{s \max j}}\right) 100\%, \quad (1.8)$$

где \mathcal{E}_s — экономия от рациональной перевозки ВВ;
 q_s — действительный расход ВВ;
 $q_{s \max j}$ — расчетный максимальный расход ВВ при перевозке по данному маршруту.

Если имеется несколько типов ВВ, то расчет производится по каждому ВВ отдельно. Для удобства выполнения анализа по каждому маршруту $Y_j \rightarrow X$ составим табл. 4, располагая \mathcal{E}_{sj} в порядке убывания их значений.

Таблица 4

Основные показатели проходки канав

Показатели	Расчетные и проектные значения			
Сечение канавы	S_1	S_2	...	S_n
q_{\max} для каждого сечения	q_{\max_1}	q_{\max_2}	...	q_{\max_n}
Действительный удельный расход ВВ	q_{s_1}	q_{s_2}	...	q_{s_n}
Экономический эффект	\mathcal{E}_{s_1}	\mathcal{E}_{s_2}	...	\mathcal{E}_{s_n}
Объем перевозки ВВ	Q_1	Q_2	...	Q_n

Партия перевезенных ВВ соответственно распределяется из расчета обеспечения выполнения объемов по всем группам канав по сечениям. Распределение ресурса последовательно осуществляется по группе канав сечением $S_1(Q_1)$, а затем по группе $S_2(Q_2)$ и т. д. Условие ограничения

$$\sum Q_{ij} < b_j. \quad (1.9)$$

Решение задачи приведено с использованием метода математической теории игр. Нахождение оптимального варианта проводится неоднократным применением $\alpha - \beta$ процедуры поиска; поиск производится одновременно вглубь и вширь. Как и в любой игровой задаче, возможно проявление «мертвых позиций», что означает неразрешимость проблемы в данных конкретных условиях (применительно к нашей задаче характеризует экономическую целесообразность проведения канав вручную).

Конкретизируем приведенный пример условными числовыми данными, характеризующими исходные условия по каждому из возможных маршрутов (табл. 5).

Таблица 5

Исходные условия перевозки ВВ

Маршрут	R_j , км	Возможный объем перевозок ВВ, кг	Стоимостные показатели		
			ΔC_p , р/м	$C_{ТВВ}$, р/кг·км	C_o ВВ, р/кг
1	2	3	4	5	6
$Y_1 \rightarrow X$	1000	3000	1,250	$4 \cdot 10^{-4}$	0,1
$Y_2 \rightarrow X$	3000	5000	6,250	$7 \cdot 10^{-4}$	0,4
$Y_3 \rightarrow X$	3000	1000	4,750	$4 \cdot 10^{-4}$	0,7
$Y_4 \rightarrow X$	2000	2000	2,250	$4 \cdot 10^{-4}$	0,1
$Y_5 \rightarrow X$	5000	7000	15,000	$1 \cdot 10^{-3}$	1,0
$Y_6 \rightarrow X$	5000	1500	13,500	$1 \cdot 10^{-3}$	0,4
$Y_7 \rightarrow X$	1000	2300	4,250	$7 \cdot 10^{-4}$	1,0
$Y_8 \rightarrow X$	4000	1800	7,250	$7 \cdot 10^{-4}$	0,1
$Y_9 \rightarrow X$	4000	900	5,750	$4 \cdot 10^{-4}$	0,7
$Y_{10} \rightarrow X$	2000	500	6,000	$1 \cdot 10^{-3}$	0,4
$Y_{01} \rightarrow X$	2000	650	7,500	$7 \cdot 10^{-4}$	1,0
$Y_{02} \rightarrow X$	1000	700	3,500	$7 \cdot 10^{-4}$	0,7

Данные табл. 5 дополнены действительными условиями производства канавных работ (по данным ряда ГРП) (табл. 6).

Таблица 6

Условия проведения канав

Тип канав по сечению	Породы	Удельный расход ВВ (фактически), кг/м	Сечение выработки, м ²	ΔC_p	$C_{ВВ}$	Объем работ, м	Количество ВВ, подлежащее перевозке, кг
1	2	3	4	5	6	7	8
S_1	Моренные	3	3,6	5	1	500	1500
S_2	отложе- ния	3	3,6	9	1	750	2250
S_3		2	2,5	13	7	1300	2600
S_4	Суглинки	0,5	0,4	5	4	1100	550
S_5	и супесь	1,0	1,2	13	10	200	200
S_6	(талые)	5	6,0	17	4	100	500

Примечание. Данные граф 2—4, 7—8 приняты условно; граф 5 и 6 взяты из таблицы машинного счета для i -го варианта.

Определим машинным расчетом (табл. 7) значения q_{\max} для каждого типа выработок по сечению. В табл. 6 приведены максимальные значения целесообразного удельного расхода ВВ на 1 м

Расчетные значения q_{\max}

Маршрут	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
$Y_1 \rightarrow X$	5,000	10,000	7,5	1,250	3,750	16,250
$Y_2 \rightarrow X$	1,600	3,200	2,4	0,400	1,200	5,200
$Y_3 \rightarrow X$	1,818	3,636	2,727	0,455	1,364	5,909
$Y_4 \rightarrow X$	3,333	6,667	5,000	0,833	2,500	10,833
$Y_5 \rightarrow X$	0,800	1,600	1,200	0,200	0,600	2,600
$Y_6 \rightarrow X$	0,851	1,702	1,277	0,213	0,682	2,766
$Y_7 \rightarrow X$	4,444	6,154	6,667	1,111	3,333	14,444
$Y_8 \rightarrow X$	1,429	2,424	2,143	0,357	0,909	4,643
$Y_9 \rightarrow X$	1,538	3,077	2,308	0,385	1,154	5,000
$Y_{10} \rightarrow X$	1,739	3,478	2,609	0,435	1,304	5,652
$Y_{01} \rightarrow X$	3,077	6,154	4,615	0,769	2,308	10,000
$Y_{02} \rightarrow X$	2,500	5,000	3,750	0,625	1,875	8,125

по каждой из групп проектных сечений (соответственно можно перевести это значение в q , кг/м³).

При расчетах учитывается, что

$$\Delta C_p = \Delta C_p(S) \quad \text{и} \quad C_{ВВ} = C_{ВВ}(S),$$

где S — сечение выработок.

Зная фактический удельный расход ВВ для данного сечения S_j (см. гр. 3 табл. 6) и расчетное значение q_{\max} для данного S_i некоторого маршрута $Y_j \rightarrow X$ (см. табл. 7), определяем экономическую рациональность производства канавных работ взрывным методом по сравнению с ручным способом и рациональность перевозки ВВ. Результаты машинного счета сведены в табл. 8. Отметим, что эффективность перевозки (\mathcal{E}_{ji}) определяется по формуле (1.8), где j — номер маршрута; i — тип канавы по сечению. Следует учитывать, что показатель \mathcal{E}_{ji} может рассчитываться как в процентах, так и долях единицы.

Вариант маршрута $Y_9 \rightarrow X$, при котором $\mathcal{E}_j = 0$, экономически эквивалентен проведению канав вручную. Понятно, что чем выше значение показателя \mathcal{E}_{ji} при данных условиях работ, тем больше разница между q_{\max} и $q_{\text{факт}}$. Высокое значение \mathcal{E}_{ji} определяет, что работы проводятся с должной экономической эффективностью и есть резервы увеличения или удельного расхода ВВ ($q_{\text{факт}}$), или дальности перевозки ВВ (R_j). Так, по данным расчетов на ЭЦВМ (см. табл. 8), наибольшая степень экономической эффективности ($\mathcal{E}_{ji} = 0,74$) соответствует в данных условиях (см. табл. 6—8) проходке выработок сечением S_3 и S_5 при условии перевозки ВВ по маршруту $Y_1 \rightarrow X$.

Задача анализа — из всех возможных маршрутов перевозки ВВ выбрать тот, который при данных условиях проведения канав обеспечит максимальную экономическую эффективность (см.

Степень эффективности различных вариантов перевозки

Маршрут	Показатель при сечениях						\mathcal{E}_j средн
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	
$Y_1 \rightarrow X$	0,4	0,700	0,74	0,60	0,74	0,69	0,645
$Y_2 \rightarrow X$	0,00	0,063	0,167	—	0,165	0,038	—
$Y_3 \rightarrow X$	—	0,18	0,27	—	0,27	0,154	—
$Y_4 \rightarrow X$	0,100	0,55	0,60	0,40	0,60	0,54	0,465
$Y_5 \rightarrow X$	—	—	—	—	—	—	—
$Y_6 \rightarrow X$	—	—	—	—	—	—	—
$Y_7 \rightarrow X$	0,32	0,517	0,70	0,55	0,70	0,65	0,57
$Y_8 \rightarrow X$	—	—	0,067	—	—	—	—
$Y_9 \rightarrow X$	—	0,025	0,134	—	0,135	0,000	—
$Y_{10} \rightarrow X$	—	0,137	0,234	—	0,234	0,115	—
$Y_{01} \rightarrow X$	0,025	0,517	0,57	0,35	0,57	0,50	0,42
$Y_{02} \rightarrow X$	—	0,400	0,47	0,20	0,47	0,38	0,35

Примечание. Проверк указывает на экономическую невозможность выполнения работ по данному варианту.

табл. 8). Так, для рассматриваемых условий наиболее экономичным вариантом транспортирования ВВ к участку канавных работ является для всех групп канав маршрут $Y_1 \rightarrow X$, обеспечивающий максимальное значение \mathcal{E}_j ср (0,65). По этому показателю целесообразность используемых маршрутов составит (в порядке убывания \mathcal{E}_{ji}): $Y_1, Y_7, Y_4, Y_{01}, Y_{02}$. Явно убыточны маршруты Y_5, Y_6, Y_8 ; перевозки ВВ по маршрутам Y_3, Y_9, Y_{10} не обеспечат должной экономической эффективности.

Таким образом, с учетом основных конкретных условий проведения канавных работ и на основе строго математического расчета мы устанавливаем экономически рациональные маршруты перевозки ВВ, являющиеся оптимальными с позиций минимальной стоимости канавных работ.

Используя данные табл. 8, можем распределить все количество ВВ, подлежащее перевозке, по наиболее рациональным маршрутам. Основной принцип такого распределения — перевезти по данному выбранному маршруту максимально возможное количество ВВ с наибольшей экономической эффективностью ($\mathcal{E}_{ji \max}$). Для осуществления этого принципа распределение ресурса ВВ по маршрутам следует производить от большего \mathcal{E}_{ji} к меньшему. Последовательность решения приводится ниже и иллюстрируется диаграммой рис. 13.

1. По табл. 5 устанавливаем для всех рассматриваемых маршрутов возможный объем перевозок ВВ (графы 1 и 3) и откладываем эти объемы на диаграмме.

2. По табл. 8 из всех полученных значений \mathcal{E}_{ji} устанавливаем максимальное. Для нашего примера $\mathcal{E}_{ji \max} = 0,74$ ($Y_1 \rightarrow X$ при S_3 и S_5).

3. По табл. 5 устанавливаем объем канавных работ, соответствующий сечениям S_3 и S_5 , и требуемый для этих работ объем транспортировки ВВ. Имеем: $V_3=1300$ м и $V_5=200$ м, а также $Q_3=2600$ кг и $Q_5=200$ кг.

4. Откладываем на диаграмме по маршруту Y_1 значения Q_3, Q_5 .

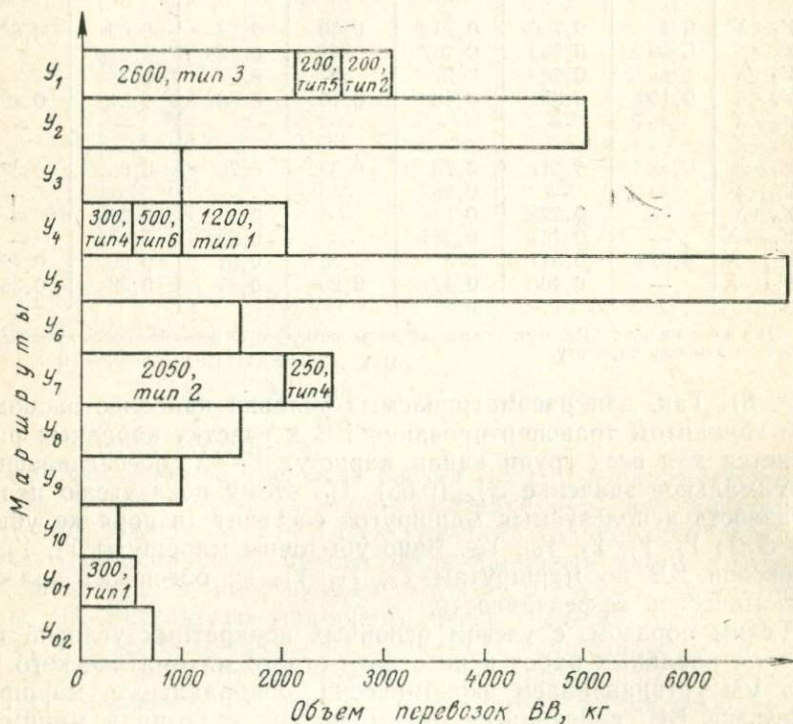


Рис. 13. Диаграмма к решению задачи о перевозке ВВ

Отметим, что для канав типа S_3 и S_5 ($\sum Q_i=2800$ кг) мы обеспечили перевозку ВВ с наибольшей экономической эффективностью, используя маршрут $Y_1 \rightarrow X$. Но по этому маршруту возможный объем перевозок составляет 3000 кг (см. табл. 5). Следовательно, остаток перевозимого груза должен быть использован для работ по проведению канав другого типа (не S_3 и S_5). Вновь по табл. 8 устанавливаем тип канав, соответствующий при Y_1 максимальному из оставшихся значению \mathcal{E}_{ji} . Для наших условий этому требованию удовлетворяют канавы типа S_2 ($\mathcal{E}_j=0,7$). Отсюда остаток партии ВВ в 200 кг, перевозимый по маршруту Y_1 , должен быть использован для работ на объектах S_2 .

5. Из табл. 6 устанавливаем значения $V_2=750$ м и $Q_2=2250$ кг. Но 200 кг ВВ для канав этой группы перевезено по маршруту Y_1 .

Следовательно, нужно установить для данных условий наиболее экономичный маршрут перевозки ВВ в количестве 2050 кг. Маршрут $Y_1 \rightarrow X$ и группы канав S_3 и S_5 далее не рассматриваются.

6. Из всех оставшихся вариантов по табл. 8 устанавливаем наибольшее значение показателя \mathcal{E}_{ji} . Имеем $\mathcal{E}_{j \max} = 0,55$ (маршрут $Y_4 \rightarrow X$, группа S_2 и $Y_7 \rightarrow X$, группа S_4). Соответствующие показатели требуемого количества ВВ для проведения канав этих групп составляют (см. табл. 6): $Q_2 = 2250$ кг и $Q_4 = 550$ кг, т. е. $\Sigma Q_{2-4} = 2800$ кг.

7. По табл. 5 устанавливаем, что возможный объем перевозок по маршрутам $Y_4 \rightarrow X$ и $Y_7 \rightarrow X$ составляет 4300 кг (2000 + 2300). Следовательно, весь требуемый ресурс ВВ для выполнения работ по группам канав S_2 и S_4 может быть перевезен при должной экономической эффективности по маршрутам $Y_4 \rightarrow X$ и $Y_7 \rightarrow X$. Кроме того, этими же маршрутами можно перевезти 1500 кг ВВ, необходимых для проведения канав групп S_1 и S_6 . При необходимости продолжения выбора экономических маршрутов последовательность расчета повторяется. Результаты решения приведены в табл. 9.

Таблица 9

Сводная таблица решения задачи

Индекс маршрута	Плановый объем перевозок, кг	Эффективность	Гр. 2 × гр. 3
1	2	3	4
$Y_1 \rightarrow X$	2600	0,74	1920
	200	0,74	148
	200	0,70	140
$Y_4 \rightarrow X$	300	0,4	120
	500	0,54	270
	1200	0,1	120
$Y_7 \rightarrow X$	2050	0,517	1070
	250	0,55	137
$Y_{01} \rightarrow X$	300	0,025	7,5
Σ	7600		4002,5

Приведенный метод применим для установления оптимальных маршрутов перевозки не только для канавных, но и для других видов горноразведочных работ.

Средняя экономическая эффективность применения оптимальных маршрутов выразится как средневзвешенное между суммарным объемом перевозок и эффективностью (см. табл. 9).

$$\mathcal{E}_c = \frac{4002,5}{7600} = 0,525.$$

Отсюда, за счет применения рациональной организации перевозок, обеспечивается экономия до 52% стоимости ВВ (в сопоставлении с ручным способом или самым неоптимальным вариантом).

Покажем возможность решения этой задачи иным методом. В формуле (1.5) $q_{s \max ji}$ является функцией, а составляющие

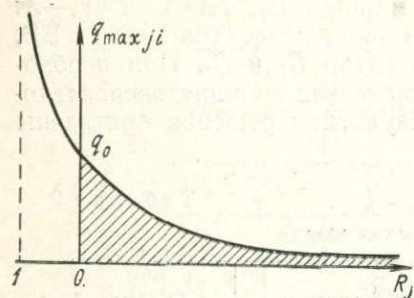


Рис. 14. Взаимосвязь расчетных значений удельного расхода ВВ и расстояния перевозки (заштрихована область, где $R_j \geq 0$) q_0 — оптимальный удельный расход ВВ, l — расстояние приведения (отрезок 0—1

равен $\left| -\frac{C_{0ВВ}}{C_{ТВВ}} \right|$)

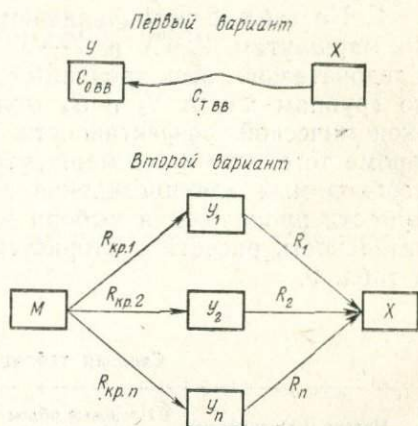


Рис. 15. Возможные схемы перевозки ВВ.

Первый вариант $\left(-\frac{C_{0ВВ}}{C_{ТВВ}} < R_j < 0 \right)$.

Второй вариант $R_j = \frac{C_{0ВВ}}{C_{ТВВ}}$.

$C_{ТВВ}$ — стоимость транспортирования 1 кг ВВ на 1 км; $C_{0ВВ}$ — отпускная цена 1 кг ВВ поставщиком Y_j ; R_j — расстояние перевозки

правой части равенства — аргументами. Для анализа характера $q_{s \max ji}$ рассмотрим зависимости функции от каждого аргумента.

Наибольший интерес представляет зависимость $q_{s \max ji} = f(R_j)$, т. е. взаимосвязь между расчетными значениями удельного расхода ВВ и рациональной дальностью перевозки ВВ (рис. 14). Существует некоторый предел проявления этой взаимосвязи, при котором дальнейшее увеличение R_j практически не изменяет расчетное значение $q_{\max j}$. Возможен вариант вида

$$-\frac{C_{0ВВ}}{C_{ТВВ}} < R_j < 0, \quad (1.10)$$

что характерно, когда предприятие-потребитель само вывозит ВВ для продажи другим организациям. Направление маршрута при этом имеет вид $X \rightarrow Y_i$, что демонстрируется схемой на рис. 15.

Значение $R_j = C_{\text{ОВВ}}/C_{\text{ТВВ}}$ следует расценить как критический вариант, при котором поставщик M обеспечивает отпускную стоимость ВВ, равную нулю, а полная стоимость ВВ с транспортными расходами составит $C_{\text{ОВВ}}$ (см. рис. 15). Значение $R_j = \frac{-C_{\text{ОВВ}}}{C_{\text{ТВВ}}}$ прак-

тически не представляет интереса, так как потребитель X находится бесконечно близко к поставщикам M . С учетом схемы на рис. 19 и характера значений $R_j = C_{\text{ОВВ}}/C_{\text{ТВВ}}$ и $R_j = -C_{\text{ОВВ}}/C_{\text{ТВВ}}$ решаемая задача может быть сведена к выбору наиболее рационального пути от M к X . Каждому (маршруту от M к X) значению $R_{pj} = R_{\text{кр}j} + R_j$ соответствует $C_{\text{ТВВ}}$. Назовем R_{pj} приведенным значением расстояния и отметим, что оно не зависит от сечения выработки. Примем стоимость транспортирования ВВ по какому-либо маршруту ($C_{\text{ТВВ}}$) за единицу и сопоставим с этим единичным значением все возможные пути R_{pj} так, чтобы стоимость перевозки по любому j -му маршруту (выражаемая как $R_{pj} \cdot C_{\text{ТВВ}}$) равнялась $R_{pj0} \cdot C_{\text{ТВВ}0}$, где индекс 0 указывает на оптимальный вариант значений. Тогда имеем

$$R_{pj0} = \frac{R_{pj} \cdot C_{\text{ТВВ}j}}{C_{\text{ТВВ}0}} \quad (1.11)$$

Используя (11), выберем оптимальную стратегию перевозок ВВ, проводя расчет от меньших значений пути R_{pj0} к большим. Пусть каждому расчетному пути R_{pj0} соответствует максимально допустимый объем перевозки Q_j . Заметим, что введение абстракции (поставщика M) не изменяет реально требуемых максимальных объемов ВВ. Пусть требуется перевезти для проведения всех групп канав объем P_j , где

$$P_j < \sum_{j=1}^n Q_j.$$

Такое неравенство указывает, что потенциальные возможности перевозки ВВ больше, чем потребности в ВВ предприятия M , т. е. возможен выбор оптимального варианта. Случай, когда $P = Q_j$, не рассматривается, так как указывает на излишнюю загруженность всех маршрутов и невозможность выбора из них оптимального варианта.

Алгоритм распределения объемов перевозки можно выразить так:

1. Рассчитать R_{pj0} по формуле (1.11).
2. Расположить все R_{pj0} в порядке возрастания от $R_{pj0 \text{ min}}$ до R_{pj0} .

3. Установить для каждого значения R_{pjo} соответствующие значения объема груза Q_j .

4. Расположить значения Q_j также в порядке возрастания.

5. Производить распределение от Q_j к Q_k до тех пор, пока не получим суммарный объем, больший требуемого, т. е. $P < \Sigma Q$.

По данному алгоритму был выполнен машинный расчет конкретного цифрового примера, изложенного выше (см. табл. 5, 6). Пределы учитываемых величин приведены в табл. 10.

Таблица 10

Пределы переменных				
Переменные	Единица измерения	Значения		Шаг
		начальное	конечное	
R	тыс. км	1	5	1
$C_{ТВВ}$	р/кг·км	$4 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$3 \cdot 10^{-4}$
$C_{оВВ}$	р/кг	0,1	1,0	0,3
ΔC_p	р/м	1	17	4
$C_{ВВ}$	р/м	1	10	3

В общем виде результаты расчета вариантов $q_{s \max j}$ по второму методу приведены в табл. 11.

Данные расчета по этому методу имеют незначительные расхождения с ранее выполненным расчетом (см. табл. 9).

Таблица 11
Результаты машинного счета

Маршрут	Целесообразный объем перевозки ВВ, кг
$Y_1 \rightarrow X$	3000
$Y_4 \rightarrow X$	2000
$Y_{02} \rightarrow X$	300
$Y_7 \rightarrow X$	2300

Правильно установить целесообразные для данного потребителя маршруты и объемы перевозки ВВ, выбрать обоснованно поставщика — значит снизить расходы по статье «материалы» и стоимость канавных работ в целом. Подчеркнем, что под понятием «потребитель» нами понимается геологическое управление,

экспедиция, партия, отряд, а в роли поставщика может выступать завод-изготовитель или склад ВМ.

Задача 2. Расстояние между зарядами ВВ

Наибольшее распространение при проходке канав взрывом на выброс получили разобщенные сосредоточенные заряды ВВ (рис. 16). Условия проходки приняты следующими: протяженность канавы L ; мощность наносов H_M ; глубина канавы H_K (где $H_K > H_M$); ширина канавы по верху $B_B = 2r_B$; величина заряда Q ; глубина заложения заряда W ; расстояние между зарядами a .

Учитывается, что $L \gg a$ и вводится допущение, что канава проходится в однородных породах с известными и неизменными физико-механическими свойствами; экономико-географические условия производства работ также известны. Способ взрывания мгновенный. Как видно, рассматриваемая система характеризуется рядом параметров. Выделим три группы параметров:

1) параметры, определяющие геологическими и общими условиями производства работ, — L , H_K , H_M , м;

2) управляющие параметры (начальные) — Q , W , N (число зарядов), a ;

3) управляемые параметры — $B_B(r_n)$, $V_{ц}$, $V_{д}$.

Установим параметр, по которому можно оптимизировать процесс проходки. Естественно, что такой параметр должен быть выбран из числа параметров второй группы, так как параметры первой группы носят случайный трудно учитываемый характер, а третьей группы — зависят от начальных условий взрыва и не поддаются непосредственному воздействию.

Глубина заложения заряда во многом определяется параметрами H_M и H_K , т. е. является также зависимой. Величина заряда с учетом целевой задачи взрыва (на выброс или на рыхление) должна соответствовать глубине заложения, поэтому оптимизация по этим двум параметрам в данной задаче не является целесообразной. Параметры a и N можно увязать между собой соотношением $N \approx \left(\frac{L}{a} + 1\right)$. Следовательно, оптимизируя по a , мы можем установить оптимальное значение N , и наоборот.

Таким образом, в нашей задаче возможны два научно обоснованных эквивалентных варианта оптимизации: по расстоянию между зарядами ВВ и по количеству зарядов. С наших позиций, наиболее предпочтительным вариантом является оптимизация по a , так как расстояние между зарядами непосредственно фиксируется на местности. Отсюда решение задачи оптимизации может быть сведено к выбору такого оптимального расстояния (a_0), которому соответствует экстремальное (максимальное или минимальное) значение функционала или критерия качества. Однако, прежде чем принять параметр a за оптимизируемый, необходимо

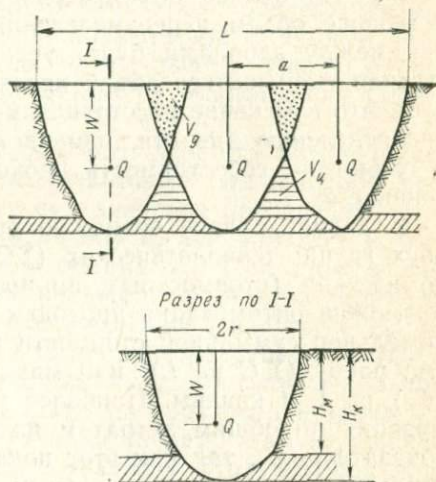


Рис. 16. Схема проходки канавы сосредоточенными зарядами ВВ.

$V_{д}$ — объем переизмельчения; $V_{ц}$ — объем целлика; H_M — мощность наносов; H_K — глубина канавы

обосновать наличие оптимального значения a_0 , так как может оказаться, что оптимального расстояния не существует или найденное значение a_0 не представляет физического интереса, т. е. является тривиальным. Подчеркнем, что изменение расстояния между зарядами определяет значение характерных объемов V_d и $V_{ц}$ и соотношение между ними (см. рис. 20): чем больше параметр a , тем больше объем неразрушенной взрывом зоны (целика) и меньше объем переизмельчения V_d ; при уменьшении расстояния между зарядами будет увеличиваться объем V_d и соответственно уменьшаться объем неразрушенной зоны $V_{ц}$. Отсюда следует, что изменение расстояния между зарядами приводит к перераспределению энергии, изменяет качественную картину взрыва и влияет на себестоимость проходки. Это обосновывает существование a_0 .

В данной задаче возможно применение критериев качества двух групп: технологических (ΣQ_i , КПИ заряда и т. д.) и экономических (стоимостных, по производительности труда и др.). Возможна оптимизация проходки канав с учетом достижения минимальной суммарной стоимости проходки запланированного объема работ (ΣC на L) или минимальной приведенной стоимости ($C_{п}$) на 1 м канавы. Наиболее интересной представляется оптимизация по общим затратам на проходку 1 м канавы, т. е. по показателю $C_{п}$, так как этот показатель учитывает все многочисленные и разнородные по своей природе факторы, действующие в системе. Сгруппируем эти факторы по принципу их связи с критерием качества (табл. 12) и проанализируем эти связи.

Т а б л и ц а 12

Группировка факторов по связи с критерием качества

Характер связи с критерием качества	Факторы (параметры)
Непосредственная	Экономико-географические условия. Характеристика канавы и параметры взрыва ($Q, W, r_v, L, V_d, V_{ц}, N$)
Через другие параметры	Физико-технические свойства пород. Горно-геологические условия.

Рассмотрим принятый критерий качества $C_{п}$. Оптимальному процессу соответствует $C_{п} = \min$. Выразим приведенные затраты в виде известной формулы

$$C_{пр} = C_{п} + E_{п} \cdot K, \quad (2.1)$$

где $C_{п}$ — себестоимость проходки 1 м канавы; $E_{п}$ — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, K — удельные капитальные вложения на 1 м канавы.

Так как нами рассматриваются затраты на 1 м канавы, то значением K можно пренебречь, вследствие его практической не-

изменности. Тогда в формуле (2.1) член $E_n K = \text{const}$ и, следовательно, не оказывает существенного влияния на оптимизируемый процесс. Отсюда оптимизация процесса может быть осуществлена по общим приведенным затратам ($C_{пр}$) или только по одному показателю C_n . Правомерность такого вывода можно проиллюстрировать анализом графических зависимостей $y = x^2$ и $y_1 = x^2 + 1$, где 1 — постоянная и определенная величина. Соответственно, без учета составляющей части $E_n K$ оптимизация процесса проходки канав может быть выполнена по приведенной стоимости (или по себестоимости проходки). Тогда оптимальному значению расстояния между зарядами (a_0) соответствует минимальная приведенная стоимость проходки (C_0).

Докажем существование оптимального варианта рассматриваемой задачи. Пусть зафиксированы некоторое стационарное значение $a = \text{const}$ и соответствующее ему значение приведенной стоимости $C(a)$. Будем уменьшать величину a , что приведет к увеличению объема V_d и уменьшению объема $V_{ц}$. При этом возрастут трудозатраты на образование большего количества заряженных камер, возрастет расход ВВ на излишнее дробление зоны V_d , но уменьшатся трудозатраты на дополнительное разрушение объема $V_{ц}$. В результате изменится показатель $C(a)$. Соответственно при увеличении a уменьшатся трудозатраты на образование заряженных камер и расход ВВ, но возрастут трудозатраты на разрушение объема $V_{ц}$, т. е. вновь изменится показатель $C(a)$. Отсюда следует, что существует такое значение a , при котором функционал F , зависящий от a , принимает экстремальное значение, т. е. существует некоторый вариант, оптимальный по a . Следовательно, оптимальному параметру a_0 соответствует минимальная приведенная стоимость, так как расход ВВ и затраты труда на образование заряженных камер являются определяющими статьями в себестоимости канавных работ.

Проанализируем принципиальный характер зависимости себестоимости проходки канав от a . Для этого рассмотрим три возможных варианта сочетания a и L при заданном Q : 1) $a \rightarrow 0$; этот вариант соответствует условию проходки всей длины канавы L одним сосредоточенным зарядом ВВ. Очевидно, что в этом случае себестоимость проходки будет весьма велика, т. е. при $a \rightarrow 0$ имеем $C \rightarrow C_p$; 2) $a = L$. Если Q имеет расчетное значение, соответствующее W , то при значительной протяженности канавы имеем вариант сочетания ограниченной в пространстве зоны разрушения от взрыва одиночного заряда ВВ с обширной неразрушенной зоной, подлежащей проходке вручную. Тогда имеем $C \approx C_p$, где C_p — себестоимость проходки при ручном способе; 3) $a > L$ также соответствует $C \approx C_p$.

Графически характер этих зависимостей представлен на рис. 17, где точка P соответствует оптимальному варианту (по a и себестоимости). График указывает на то, что изменение расстояния a от 0 до L (и более) резко изменяет себестоимость про-

ходки. Естественно, что применение энергии взрыва целесообразно тогда, когда $C_{\text{факт}} < C_p$. Поэтому в общем случае нами рассматривается зона, расположенная ниже линии C_p . Значение C_p взято за границу сопоставления экономичности применения различных значений параметра a .

Общий алгоритм проверки процесса на оптимальность представим следующим образом:

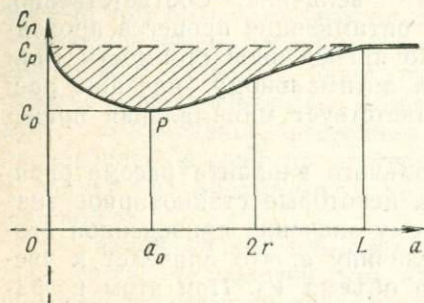


Рис. 17. Влияние расстояния между зарядами ВВ на полную приведенную стоимость проходки 1 м канавы.

C_p — полная приведенная стоимость проходки; a — расстояние между зарядами ВВ; C_0 — приведенная стоимость проходки вручную; $2r$ — ширина канавы; L — протяженность канавы.

$$\text{при } B' > m \quad V_B \leq n;$$

$$\text{при } B' < m \quad V_B \geq n.$$

В этом случае экономически целесообразнее проходить канаву вручную. Тогда наша задача может быть сформулирована так: найти такое значение a_0 , при котором $C(a_0) = \min$. Алгоритм решения может быть записан в следующем виде:

а) выразить C как функцию от a ; при прочих заданных условиях функция $C = F(a)$ может считаться математической моделью исследуемого процесса;

2) проанализировать функцию $F(a)$ на непрерывность, дифференцируемость и существование точек экстремума;

3) найти точки экстремума и дать общую методику их определения; для наших условий эти точки должны удовлетворять равенству $\dot{F}(a_0) = 0$. (2.6).

В соответствии с выбранным критерием качества задача по выявлению оптимального значения расстояния между зарядами ВВ может быть решена путем сопоставления стоимостных затрат на проходку канав при различных a . Рассмотрим стоимостные параметры.

Представим общую себестоимость проходки канавы заданных параметров (сечение S и протяженность L) в виде

$$C = (C_n' + C_b') \frac{L}{a} + C_{\text{ц}}' V_{\text{ц}} + C_{\text{y}}' V_{\text{y}}, \quad (2.7)$$

1. Рассчитать значения некоторых параметров m и n по формулам (2.2) и (2.3), где

$$m = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{C_{\text{ц}}'}{C_{\text{y}}'} \right); \quad (2.2)$$

$$n = \frac{C_n' + C_b'}{C_{\text{ц}}' + B' C_{\text{y}}'}. \quad (2.3)$$

2. Процесс имеет оптимальное решение, если удовлетворяет условиям:

$$\text{при } B' < m \quad V_B \leq n;$$

$$\text{при } B' > m \quad V_B \geq n.$$

3. Процесс не имеет оптимального решения, если:

$$(2.5)$$

- где $C'_п$ — затраты на проходку одной зарядной камеры данной глубины W , р/зар. камеру;
 $C'_в$ — стоимость работ по заряданию одной камеры и взрыванию одного заряда ВВ, включая стоимость ВМ, р/зар. камеру;
 $V_ц$ — объем всех неразрушенных целиков, м³;
 $C'_ц$ — стоимость разрушения 1 м³ целика породы в данных условиях, р/м³;
 $C'_у$ — стоимость уборки 1 м³ разрушенной породы, р/м³;
 $V_у$ — объем породы, подлежащей уборке за пределы контуров канавы, м³.

В формуле (2.7) можно учесть и затраты на засыпку канавы и рекультивацию почвы. Учитывая, что для данной канавы параметры S и L являются постоянными, выразим

$$C_{зр} = C_з(s) \cdot L + C_p(s) \cdot L, \quad (2.8)$$

где $C_з(s)$ — стоимость работ на засыпку 1 м канавы сечением S , р/м;

$C_p(s)$ — то же, по рекультивации.

Тогда $C_{зр} = \varphi(S, L)$ и не зависит от расстояния между зарядами.

Так как $\frac{\partial C_{зр}}{\partial a} = 0$, то можем сделать вывод, что в условиях нашей задачи стоимость работ по засыпке канавы и рекультивации участка не влияет на оптимальное значение параметра a .

Затраты на выполнение этих работ, естественно, могут влиять лишь на абсолютное значение общей себестоимости проходки канавы. Заметим, что $C_{зр}$ примерно постоянны для канав одинаковой протяженности и сечения, независимо от способа проходки канав. Отсюда следует, что значение $C_{зр}$ не влияет на величину абсолютного и относительного экономического коэффициента при сопоставлении различных способов проведения канав. Для упрощения дальнейших рассуждений показатель $C_{зр}$ исключается из (2.8).

Очевидно, что $C'_п$, $C'_в$, $C'_ц$, $C'_д$ не зависят от a и могут быть рассчитаны по нормативным данным. Однако объемы $V_ц$ и $V_д$ существенно зависят от a . Объем

$$V_ц = V_к - \left(\frac{L}{a} V_в - \left(\frac{L}{a} - 1 \right) \cdot V_{дi} \right), \quad (2.9)$$

где $V_к$ — объем канавы (не зависит от a), м³;

$V_в$ — объем воронки разрушения, создаваемый одним зарядом ВВ (не зависит от a);

$V_{дi}$ — объем переизмельчения, создаваемый двумя сближенными зарядами ВВ при взрыве, определяется значением a .

Для нахождения оптимальных значений a продифференцируем формулу (2.7) по a

$$-(C'_n + C'_b) \frac{L}{a^2} + C'_c \cdot \dot{V}_c + C'_y \dot{V}_y = 0. \quad (2.10)$$

Применение формулы (2.10) позволит сократить выкладки и увеличить точность расчетов. Объем

$$V_y = \left(\frac{L}{a} - 1 \right) V_{di} + B' \left[\frac{L}{a} V_b - 2 \left(\frac{L}{a} - 1 \right) V_{di} \right], \quad (2.11)$$

где $B' = 1 - B$, т. е. характеризует объем породы, оставшейся в выемке выброса.

Для простоты рассуждений считаем, что $L \gg a$, т. е.

$$\frac{L}{a} - 1 \approx \frac{L}{a}.$$

Тогда формулы (2.9) и (2.11) примут вид:

$$V_c \approx V_k - \frac{L}{a} (V_b - V_{di}); \quad (2.12)$$

$$V_y \approx \frac{L}{a} [V_{di} + B'V_b - 2B'V_{di}] = \frac{L}{a} [V_{di}(1 - 2B') + B'V_b]. \quad (2.13)$$

С учетом этих формул и (2.1) получим

$$C \approx \{ (C'_n + C'_b) - C'_c (V_b - V_{di}) + \\ + C'_y [V_{di}(1 - 2B') + B'V_b] \} \frac{L}{a} + C'_c \cdot V_k. \quad (2.14)$$

После группировки членов получим

$$C \approx C'_c V_k + \frac{L}{a} \{ (C'_n + C'_b) + V_b (-C'_c + C'_y B') + \\ + V_{di} [C'_c + C'_y (1 - 2B')] \}. \quad (2.15)$$

Для простоты дальнейших рассуждений введем обозначения:

$$C'_n + C'_b = \gamma_1, \\ C'_c + C'_y (1 - 2B') = \gamma_2, \quad (2.15^*)$$

$$V_b (-C'_c + B'C'_y) = \gamma_3.$$

Формула (2.15) примет вид:

$$C \approx C'_c \cdot V_k + \frac{L}{a} \{ \gamma_1 + \gamma_3 + V_{di} \gamma_2 \}. \quad (2.16)$$

Дифференцируя формулу (2.16), получим

$$-\frac{1}{a} [\gamma_1 + \gamma_3 + V_{дi} \gamma_2] + \dot{V}_{дi} \gamma_2 = 0. \quad (2.17)$$

Имеем:

$$\dot{V}_{дi} - \frac{1}{a} V_{дi} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\gamma_1 + \gamma_3}{\gamma_2}. \quad (2.18)$$

Получено линейное дифференциальное уравнение, общее решение которого запишется в виде

$$V_{дi} = a \left[\frac{\gamma_1 + \gamma_3}{\gamma_2} \int \frac{1}{a^2} da + C_1 \right] = C_{1a} - \frac{\gamma_1 + \gamma_3}{\gamma_2}. \quad (2.19)$$

Согласно физическому смыслу задачи имеем $C'_{ц} > 0$ и $C'_y > 0$. Поэтому в формуле (2.15*) параметр $\gamma_2 = 0$ только при условии $(1 - 2B') < 0$, что обеспечивается, когда $B' > 0,5$. Отсюда $\gamma_2 = 0$ при весьма незначительном выбросе породы из контуров выемки.

Напомним, что предел изменений a определен нами как $2r_b$. Возможен вариант, когда $a > 2r_b$, однако при этом суммарный объем неразрушенных целиков будет больше суммарного объема разрушения взрывом $V_{ВВ}$, т. е. при $a > 2r_b$ имеем $V_{ц} > V_{ВВ}$. Следовательно, при $a > 2r_b$ нецелесообразно применение энергии взрыва. Полученное неравенство преобразуем в вид

$$(C'_{ц} V_{ц}) > \frac{C'_{ц}}{C'_{ВВ}} \cdot (C'_{ВВ} V_{ВВ}) \quad (2.20)$$

и запишем как

$$C'_{ц} V_{ц} + C'_{ВВ} V_{ВВ} > \left(\frac{C'_{ц}}{C'_{ВВ}} + 1 \right) C'_{ВВ} V_{ВВ}. \quad (2.21)$$

Учитывая, что

$$C'_{ц} V_{ц} + C'_{ВВ} V_{ВВ} = C_{общ}, \quad \text{получим}$$

$$C_{общ} > \left(\frac{C'_{ц}}{C'_{ВВ}} + 1 \right) C'_{ВВ} V_{ВВ}. \quad (2.22)$$

Естественно, что $C'_{ц} \gg C_{ВВ}$, откуда $C_{общ} \gg 2 C_{ВВ}$. (2.23)

Или при $a > 2r_b$ имеем $C_{ВВ}/C_{общ} \leq \frac{1}{2}$. (2.24)

С учетом выполненных пояснений определим оптимальное значение стоимости проходки канав C . Подставив значение $V_{дi}$ (2.19) в формулу (2.16), получим

$$C_0 \approx C'_{ц} V_{к} + \frac{L}{a} [\gamma_1 + \gamma_3 + C_1 \gamma_2 a - \gamma_1 - \gamma_3], \quad (2.25)$$

или для $a \neq 0$ получим

$$C_0 \approx C'_{ц} V_{к} + LC_1 \gamma_2. \quad (2.26)$$

Откуда

$$C_1 = \frac{C_0 - C'_c V_k}{L \gamma_2}, \quad (2.27)$$

где C_1 — постоянная дифференциального уравнения;
 V_k — объем канавы, м³.

Считая, что разрушение целиков осуществляется вручную и учитывая, что $C'_c V_k = C_p$,

$$\text{найдем} \quad C_1 = \left(\frac{C_0}{L} - \frac{C_p}{L} \right) / \gamma_2 = \frac{\Delta C_{0ВВ} - \Delta C_p}{\gamma_2}, \quad (2.28)$$

где ΔC_p — нормативная стоимость проходки 1 м канавы вручную;
 $\Delta C_{0ВВ}$ — оптимальная стоимость проходки 1 м канавы с применением сосредоточенных зарядов ВВ.

Из всех сопоставляемых экономически целесообразных вариантов по a наилучшим будет тот, который обеспечивает максимальный (в данных условиях) экономический эффект \mathcal{E}_{\max} . Выразим

$$\mathcal{E}_{\max} = \frac{\Delta C_p - \Delta C_0}{\Delta C_p} \cdot 100\%, \quad (2.29)$$

что с учетом формулы (2.28) дает

$$C_1 = -\mathcal{E}_{\max} \frac{\Delta C_p}{\gamma_2}.$$

Откуда

$$\mathcal{E}_{\max} = -C_1 \frac{\gamma_2}{\Delta C_p}. \quad (2.30)$$

Формула (2.30) указывает на то, что экономический эффект пропорционален C_1 . Средний экономический эффект приближенно может быть рассчитан по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} \approx \frac{1}{2} \mathcal{E}_{\max}. \quad (2.31)$$

В формулах (2.30) и (2.31) значения ΔC_p и γ_2 определяются по нормативным данным, C_1 — после нахождения оптимального значения a_0 . Выразим C_1 через параметр a . Для этого запишем

$$V_{dl} \approx \frac{\pi H}{24 r_b} (2r_b - a)^3 \quad (2.32)$$

и воспользуемся формулой (2.19). Получим уравнение

$$C_1 = \frac{\pi H}{24 r_b} \frac{(2r_b - a_0)^3}{a_0} + \frac{\gamma_1 + \gamma_3}{\gamma_2 a_0}. \quad (2.33)$$

Анализ (2.33) дает возможность установить влияние сечения выработки (через параметры r_b и H) на значение C_1 . Для про-

стоты рассуждений сечение канавы характеризуем только этими двумя параметрами (без учета фактической параболической формы). Из формулы (2.33) и с учетом (2.30) следует, что правомерна постановка задачи установления оптимального расстояния, обеспечивающего получение максимального экономического эффекта. При решении этой задачи алгоритм в общем виде запишется так: 1) найти по формуле (2.33) значение $[C_1]_{\max}$; 2) найти значение S , соответствующее $C_{1 \max}$.

Продолжим рассмотрение задачи оптимизации процесса проходки канав по расстоянию между зарядами. Определим максимально возможное для наших условий значение C_1 , которому соответствует a_0 . Для этого продифференцируем формулу (2.33) по a и приравняем $C_1(a)$ нулю. Получим

$$\frac{12r}{\pi H} \cdot \frac{\gamma_1 + \gamma_3}{\gamma_2} + 4r^3 + a^3 - 3a^2r = 0. \quad (2.34)$$

Пусть

$$\frac{\gamma_1 + \gamma_3}{\gamma_2} \cdot \frac{12r}{\pi H} = \delta. \quad (2.35)$$

Тогда уравнение (2.34) примет вид

$$a^3 - 3a^2r + 4r^3 + \delta = 0. \quad (2.36)$$

Дважды дифференцируя формулу (2.33), можем показать, что в оптимальной точке C_1 принимает минимальное значение, т. е. максимальной эффективности \mathcal{E}_{\max} соответствует $C_{1 \min}$, что действительно для физически приемлемых пределов $0 < a < 2r_B$. Отсюда алгоритм запишем в виде

- 1) рассчитать значения $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ по формуле (2.15 *);
- 2) найти δ по формуле (2.35) и проверить его на ограничение

$$a = 0 \div 2 \cdot r_B;$$

- 3) решить уравнение (2.36) и определить a_0 ;
- 4) найти C_1 по формуле (2.33);
- 5) найти \mathcal{E}_{\max} и $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ от применения a_0 по формулам (2.30) и (2.31);
- 6) при необходимости выбора оптимального по сечению выемки способа проходки (или параметров взрыва) сравнить все возможные варианты по значению \mathcal{E}_{\max} и выбрать тот, которому соответствует наибольшее значение \mathcal{E}_{\max} .

Наибольшую сложность представит решение кубического уравнения (2.36) по определению a_0 , что целесообразно проводить с помощью ЭЦВМ, рассматривая a_0 как функцию от δ, r . С учетом ограничения $\delta < 0$ имеем

$$\frac{\gamma_1 + \gamma_3}{\gamma_2} < 0, \quad (2.37)$$

так как задача должна иметь оптимальное решение. Выполним подстановку $u = a - r$, что позволит привести уравнение (2.36) к уравнению Кардано и его решению. Такое преобразование позволило упростить нахождение значений a_0 . Учитывая многовариантность системы расчеты по определению a_0 были выполнены на ЭЦВМ. Пределы изменения основных параметров были приняты следующие:

$$r \in [0,5; 7, 4]; \quad 0 < a < 2r_B.$$

Это обеспечило $-1620 < \delta < 0$, т. е. просчет выполнен в достаточно широком пределе значений r , a , δ , что позволяет рекомендовать для применения полученные значения a_0 при решении кон-

Таблица 13

Оптимальное расстояние между сосредоточенными зарядами ВВ

δ , м ³ /заряд	r , м	a_0 , м	δ , м ³ /заряд	r , м	a_0 , м
-0,50	0,5	0,0	-39,36	5,1	8,5
-0,25	0,5	0,5	-20,30	5,1	9,0
-0,10	0,5	1,0	-7,15	5,1	9,5
-87,81	2,8	0,0	-0,60	5,1	10,0
-85,83	2,8	0,5	-1620,90	7,4	0,0
-80,41	2,8	1,0			
-72,28	2,8	1,5	-1615,47	7,4	0,5
-62,21	2,8	2,0	-1599,70	7,4	1,0
-50,93	2,8	2,5	-1574,32	7,4	1,5
-39,21	2,8	3,0	-1540,1	7,4	2,0
-27,78	2,8	3,5	-1497,77	7,4	2,5
-17,41	2,8	4,0	-1448,1	7,4	3,0
-8,83	2,8	4,5	-1391,82	7,4	3,5
-2,81	2,8	5,0	-1329,70	7,4	4,0
-0,08	2,6	5,5	-1262,47	7,4	4,5
-530,60	5,1	0,0	-1190,9	7,4	5,0
-526,9	5,1	0,5	-1115,72	7,4	5,5
-516,3	5,1	1,0	-1037,7	7,4	6,0
-499,55	5,1	1,5	-957,571	7,4	6,5
-477,40	5,1	2,0	-876,1	7,4	7,0
-450,60	5,1	2,5	-794,02	7,4	7,5
-419,90	5,1	3,0	-712,1	7,4	8,0
-386,05	5,1	3,5	-631,07	7,4	8,5
-349,80	5,1	4,0	-551,7	7,4	9,0
-311,9	5,1	4,5	-474,72	7,4	9,5
-273,1	5,1	5,0	-400,90	7,4	10,0
-234,15	5,1	5,5	-330,97	7,4	10,5
-195,8	5,1	6,0	-265,7	7,4	11,0
-158,8	5,1	6,5	-205,82	7,4	11,5
-123,9	5,1	7,0	-152,10	7,4	12,0
-91,85	5,1	7,5	-105,27	7,4	12,5
-63,40	5,1	8,0	-66,1	7,4	13,0
			-35,32	7,4	13,5
			-13,70	7,4	14,0

кретных задач практики. Результаты расчета сведены в табл. 13, где даны результаты машинного решения задачи в общем виде.

Промежуточные значения могут быть определены методом интерполяции или по разработанной номограмме (рис. 18), отражающей связь между a_0 и δ , r . Номограмма представляет собой решение уравнения (2.36) и результат просчетов на ЭЦВМ. Каждой кривой соответствует определенное значение r , т. е. каждая кривая выражает зависимость a_0 от δ при постоянном r . Пример применения номограммы приведен на рис. 18.

Пусть требуется определить a_0 при $\delta = -40$. Такому значению δ соответствует $r > 2$ м; при $r < 2$ м и заданном δ оптимальное расстояние между зарядами не имеет физического смысла. С учетом принятого шага по $r = 0,5$ м имеем две характерные точки M_1 и M_2 , вставив из которых перпендикуляры, получим соответствующий предел a_0 [a_{01} , a_{02}] (для нашего конкретного примера от 2 до 3,5 м). Любое промежуточное значение a_0 может быть определено по формуле

$$a_{0i} = a_{01} + (a_{01} - a_{02}) \times \frac{r_i - r_1}{r_2 - r_1}, \quad (2.38)$$

где a_{01} , a_{02} — значения оптимальных расстояний между зарядами, установленные по номограмме для данного δ и соответственно максимально возможного r_1 и минимально возможного r_2 ;

a_{0i} , r_i — соответствующие значения искомого промежуточного варианта.

Приведем пример применения разработанной методики установления количественных значений оптимального расстояния.

Пусть на данном участке открытых горноразведочных работ (проектный разрез известен) требуется пройти геологоразведоч-

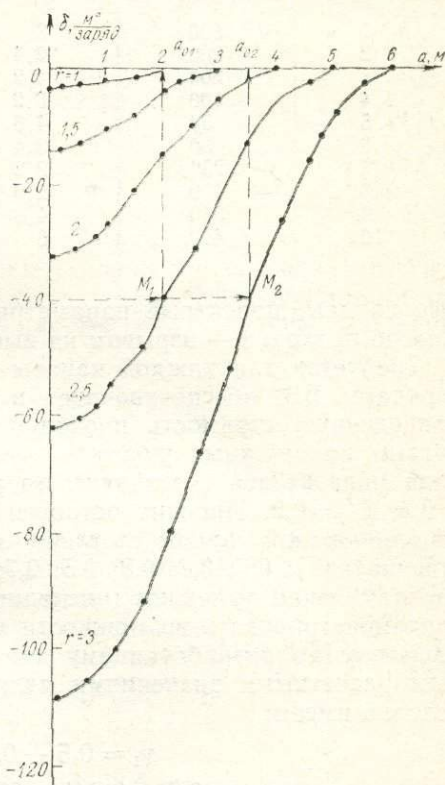


Рис. 18. Номограмма определения оптимального расстояния между зарядами BB

Условия проходки канавы взрывом на выброс

Группа канав	Проектные параметры			
	Суммарная протяженность L , м	Ширина по верху, B' , м	Глубина H , м	Показатель выброса B
1	500	3	3,2	0,4
2	200	2,4	2,5	0,3
3	300	4,2	5,0	0,2
4	100	5,2	5,0	0,2
5	50	4,6	4,0	0,5
6	30	3,4	3,0	0,5
7	250	2,2	2,0	0,3
8	170	2,6	2,8	0,3
9	340	4,8	4,5	0,4
10	400	6	3,0	0,6

ные канавы, проектные параметры которых сведены в табл. 14. Способ проходки — взрывом на выброс.

Требуется для каждой канавы установить расстояние между зарядами ВВ, обеспечивающее в данных условиях наименьшую приведенную стоимость проходки. Известно, по аналогии с работами на смежных участках, что в данных условиях значения ряда показателей составляют (в р/ед.): $C'_п=0,5$; $C'_в=0,2$; $C'_ц=0,2$; $C'_у=0,2$. Процент оставшегося в контурах выемки грунта B' для каждой группы составит следующие значения (соответственно): 0,6; 0,7; 0,8; 0,8; 0,5; 0,7; 0,7; 0,6 и 0,4. В примере мы преднамеренно усложняем исходные (проектные) данные, чтобы продемонстрировать возможности метода. Решение данной задачи выполним по разработанному алгоритму, в соответствии с которым расчетными значениями являются δ , C_1 , \mathcal{E}_{\max} . Для наших условий имеем:

$$\gamma_1 = 0,5 + 0,2 = 0,7;$$

$$\gamma_2 = 0,2 + 0,2(1 - 2B') = 0,4(1 - B');$$

$$\gamma_3 = \frac{\pi r_B^2 H}{3} (-0,2 + 0,2B') \approx -0,2(1 - B') r_B^2 H;$$

$$\frac{\gamma_1 + \gamma_3}{\gamma_2} = k = \frac{1,75}{1 - B'} (-0,5 r_B^2 H) \quad \text{и т. д.}$$

Полученные расчетные значения сведены в табл. 15.

Для канав 3, 4, 5, 9, 10 получены значения a_0 , обеспечивающие минимальные приведенные затраты и получение экономического эффекта. Проходка канав групп 1, 2, 6, 7, 8 в данных условиях экономически нецелесообразна; в этом случае имеем

$$\frac{\gamma_1 + \gamma_3}{\gamma_2} > 0 \text{ и } \mathcal{E}_{\max} < 0,$$

Расчетные данные

Группа канал	k	δ	a_0	C_1	$\bar{\mathcal{E}}_{\max}, \%$
1	0,8	—	—	—	—
2	4,03	—	—	—	—
3	-2,25	-3,8	3,4	-0,5	4
4	-18,25	-27	3,0	-6	18
5	-7,1	-16	2,9	-2,3	25
6	-0,85	-2	2,7	-0	—
7	4,62	—	—	—	—
8	3,43	—	—	—	—
9	-8,6	-18	3,0	-2,8	65
10	-10,5	-42	3,4	-3,0	140

что указывает на целесообразность ручного способа проходки. Средневзвешенная средняя экономическая эффективность от внедрения оптимальных значений параметра a составит для нашего участка работ

$$\bar{\mathcal{E}}_{\text{cp}} = \frac{\bar{\mathcal{E}}_{\max}}{2} = \frac{\sum \mathcal{E}_{\max j} \cdot L_j}{2 \sum L_j} = 34\%,$$

По значению $\bar{\mathcal{E}}_{\text{cp}}$ можно определить эффект в денежном выражении.

В табл. 16 приведены результаты машинного счета оптимальных расстояний для различных условий (по δ и r), характеризующих рассматриваемый пример. Выполним ряд преобразований. Так как $0 \leq a_0 \leq 2r_b$, то предположим, что $a_0 = \theta \cdot 2r_b$, где $0 \leq \theta \leq 1$. Подставим это значение a_0 в уравнение (2.36), получим

$$8\theta^3 r^3 - 12\theta^2 r^3 + 4r^3 + \delta = 0 \quad (2.39)$$

или

$$4r^3 [2\theta^3 - 3\theta^2 + 1] + \delta = 0, \quad (2.40)$$

откуда

$$\delta = -4r^3 [2\theta^3 - 3\theta^2 + 1]. \quad (2.41)$$

Так как $r > 0$, то знак δ определится знаком выражения

$$2\theta^3 - 3\theta^2 + 1 = k(\theta). \quad (2.42)$$

$k(\theta)$ на интервале $0 \leq \theta \leq 1$ имеет вид кривой, изображенной на рис. 19. Первая производная $\dot{k} = 6\theta^2 - 6\theta = 0$; $\theta = 0$; $\theta = 1$. Вторая производная

$$\ddot{k} = 2\theta - 1 = 0; \quad \theta = \frac{1}{2}.$$

Данные машинного счета значений a (для цифрового примера)

δ	r	a	δ	r	a	δ	r	a	δ	r	a	δ	r	a
-4,0	1,0	0,0	-0,172	1,5	2,8	-62,5	2,5	0,0	0,000	2,5	5,0	-11,232	3,0	4,8
-3,971		0,1	-0,044		2,9	-62,426		0,1				-9,559		4,9
-3,888		0,2	-0,000		3,0	-62,208		0,2	-108,00	3,0	0,0	-8,000		5,0
-3,757		0,3	-32,0	2,0	0,0	-61,852		0,3	-107,911		0,1	-6,561		5,1
-3,584		0,4	-31,941		0,1	-61,364		0,4	-107,648		0,2	-5,248		5,2
-3,375		0,5	-31,768		0,2	-60,75		0,5	-107,217		0,3	-4,067		5,3
-3,136		0,6	-31,487		0,3	-60,016		0,6	-106,624		0,4	-3,024		5,4
-2,873		0,7	-31,104		0,4	-60,00		0,7	-105,875		0,5	-2,125		5,5
-2,592		0,8	-30,625		0,5	-58,212		0,8	-104,976		0,6	-1,376		5,6
-2,299		0,9	-30,056		0,6	-57,154		0,9	-103,933		0,7	-0,783		5,7
-2,0		1,0	-29,403		0,7	-56,000		1,0	-102,752		0,8	-0,352		5,8
-1,701		1,1	-28,672		0,8	-54,756		1,1	-101,439		0,9	-0,089		5,9
-1,408		1,2	-27,869		0,9	-53,458		1,2	-100,000		1,0	-0,000		6,0
-1,127		1,3	-27,000		1,0	-52,022		1,3	-98,441		1,1			
-0,864		1,4	-26,071		1,1	-50,544		1,4	-96,768		1,2			
-0,625		1,5	-25,088		1,2	-49,000		1,5	-94,987		1,3			
-0,416		1,6	-24,057		1,3	-47,396		1,6	-93,104		1,4			
-0,243		1,7	-22,987		1,4	-45,738		1,7	-91,125		1,5			
-0,112		1,8	-21,875		1,5	-44,032		1,8	-89,056		1,6			
-0,029		1,9	-20,736		1,6	-42,284		1,9	-86,903		1,7			

-13,50	1,5	0,0	-19,573	2,0	1,7	-40,500	2,5	2,0	-84,672	3,0	1,8			
-13,456		0,1	-18,392		1,8	-38,686		2,1	-82,369		1,9			
-13,328		0,2	-17,199		1,9	-36,848		2,2	-80,000		2,0			
-13,122		0,3	-16,00		2,0	-34,992		2,3	-77,571		2,1			
-12,844		0,4	-14,801		2,1	-33,124		2,4	-75,088		2,2			
-12,50		0,5	-13,608		2,2	-31,250		2,5	-72,557		2,3			
-12,096		0,6	-12,427		2,3	-29,376		2,6	-69,984		2,4			
-11,638		0,7	-11,264		2,4	-27,508		2,7	-67,375		2,5			
-11,132		0,8	-10,125		2,5	-25,652		2,8	-64,736		2,6			
-10,584		0,9	-9,016		2,6	-23,814		2,9	-62,073		2,7			
-10,000		1,0	-7,943		2,7	-22,000		3,0	-59,392		2,8			
-9,386		1,1	-6,912		2,8	-20,216		3,1	-56,669		2,9			
-8,748		1,2	-5,929		2,9	-18,4680		3,2	-54,000		3,0			
-8,092		1,3	-5,000		3,0	-16,762		3,3	-51,301		3,1			
-7,424		1,4	-4,131		3,1	-15,104		3,4	-48,608		3,2			
-6,750		1,5	-3,328		3,2	-13,500		3,5	-45,927		3,3			
-6,076		1,6	-2,597		3,3	-11,956		3,6	-43,264		3,4			
-5,408		1,7	-1,944		3,4	-10,478		3,7	-40,625		3,5			
-4,752		1,8	-1,375		3,5	-9,072		3,8	-38,016		3,6			
-4,114		1,9	-0,896		3,6	-7,744		3,9	-35,443		3,7			
-3,5		2,0	-0,513		3,7	-6,500		4,0	-32,912		3,8			
-2,916		2,1	-0,232		3,8	-5,346		4,1	-30,429		3,9			
-2,368		2,2	-0,059		3,9	-4,288		4,2	-28,000		4,0			
-1,862		2,3	-0,000		4,0	-3,332		4,3	-25,631		4,1			
-1,404		2,4				-2,484		4,4	-23,328		4,2			
-1,000		2,5				-1,750		4,5	-21,097		4,3			
-0,656		2,6				-1,136		4,6	-18,944		4,4			
-0,378		2,7				-0,648		4,7	-16,875		4,5			
						-0,292		4,8	-14,896		4,6			
						-0,074		4,9	-13,013		4,7			

Кривая имеет на концах интервала экстремальные значения (производная $\dot{k}(\theta) = 0$), в точке $P \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right)$ — точку перегиба, и $1 \geq k \times \times (\theta) \geq 0$ при $0 \leq \theta \leq 1$, откуда $\delta \leq 0$. Так как $1 \geq k(\theta) \geq 0$, если $0 \leq \theta \leq 1$, то

$$0 \leq \frac{-\delta}{4r^3} \leq 1. \quad (2.43)$$

Из (2.43) приходим к неравенству

$$0 \leq \sqrt[3]{-\frac{\delta}{4}} \leq r. \quad (2.44)$$

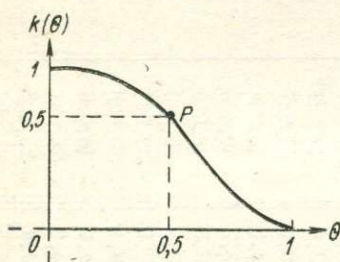


Рис. 19. Характер зависимости $k(\theta) = f(\theta)$. P — точка перегиба; θ — характерный коэффициент

Пусть $\sqrt[3]{-\frac{\delta}{4}} = r_0$ — некоторый нулевой радиус. Подставив r_0 в уравнение (2.36), имеем

$$a_0^3 - 3a_0^2 \sqrt[3]{-\frac{\delta}{4}} = 4 \frac{\delta}{4} + \delta = 0.$$

Отсюда

$$a_{01} = 0; \quad a_{02} = 3 \sqrt[3]{-\frac{\delta}{4}} = 3r_0.$$

Второе решение не удовлетворяет неравенству $0 \leq a_0 \leq 2r_0$, т. е. $a_0 = 0$.

Функцию $k(\theta)$ можно приближенно заменить через

$$k(\theta) \approx \frac{1}{2} [\cos \pi \theta + 1]. \quad (2.45)$$

Тогда получим

$$a_0 \approx \frac{2r}{\pi} \arccos \left(\frac{\delta}{4r^3} + 1 \right). \quad (2.46)$$

Выразим C_1 , \mathcal{E}_{\max} через θ . Так как $a_0 = 2r_{\text{в}} \theta$, то подставив значение a_0 в формулу (2.33), найдем

$$C_1 = -1,5 \frac{V_{\text{в}}}{r_{\text{в}}} (1 - \theta)^2 \quad \text{или} \quad C_1 = -\frac{\pi}{2} S_{\text{к}} (1 - \theta)^2, \quad (2.47)$$

где $S_{\text{к}}$ — сечение канавы, м².

Используя формулу (2.30), найдем \mathcal{E}_{\max} через θ . Имеем:

$$\mathcal{E}_{\max} = + 1,5 \frac{V_B}{r_B} (1 - \theta)^2 \cdot \frac{\gamma_2}{\Delta C_p}$$

или

$$\mathcal{E}_{\max} = + \frac{\pi}{2} \frac{(1 - \theta)^2 \gamma_2}{\left(\frac{\Delta C_p}{S_K} \right)}$$

Учитывая, что

$$\frac{\Delta C_p}{S_K} = \frac{S_K \cdot C'_\Pi}{S_K} = C'_\Pi,$$

получим

$$\mathcal{E}_{\max} = \frac{\pi}{2} (1 - \theta)^2 \frac{\gamma_2}{C'_\Pi} \approx 1,57 \left[1 + (1 - 2B') \cdot \frac{C'_y}{C'_\Pi} \right] (1 - \theta)^2 \cdot 100\%.$$

Перепишем эту формулу в виде

$$\mathcal{E}_{\max} = 1,57 \left[1 + (1 - 2B') \frac{C'_y}{C'_\Pi} \right] \cdot (1 - \theta)^2 \cdot 100\%. \quad (2.48)$$

Из формулы (2.48) следует, что чем меньше грунта остается при взрыве в контурах выемки выброса, тем выше экономический эффект от внедрения оптимальных параметров a . Так как \mathcal{E}_{\max} при C'_y/C'_Π стремится к максимуму, то из этого следует, что приведенная стоимость работ по разрушению целиков (C'_Π) должна быть минимальна. Имеем

$$0 \leq B' \leq 1 \text{ и } 0 \leq \frac{C'_y}{C'_\Pi} \leq 1.$$

Введем $\varepsilon(B', \chi)$, тогда правомерно записать

$$\varepsilon = 1,57 \left[1 + (1 - 2B') \frac{C'_y}{C'_\Pi} \right] \cdot 100\%. \quad (2.49)$$

Основываясь на формуле (2.39), можно получить для любых значений радиуса r и любых δ методику определения оптимального значения a через θ .

Преобразуем формулу (2.39)

$$-\frac{\gamma_1 + \gamma_3}{\gamma_2} \cdot \frac{3}{\pi r^2 H} = k(\theta). \quad (2.50)$$

Но $\frac{3}{\pi r^2 H} \approx \frac{1}{V_B}$, т. е. $k(\theta) = -\frac{\gamma_1 + \gamma_3}{\gamma_2 V_B}$.

Обозначим $\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{\gamma_2 V_B} = v$. Получим $k(\theta) = v$. (2.51)

Значения функции $k(\theta)$ нетрудно затабулировать в виде таблицы (табл. 17).

Таблица 17

Значения $k(\theta)$

θ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$k(\theta)$	1	0,972	0,896	0,784	0,648	0,5	0,352	0,216	0,104	0,28	0,0

Тогда алгоритм расчета a_0 примет вид:

- 1) определить значение v , $0 \leq v \leq 1$;
- 2) по таблице найти θ ;
- 3) найти по формуле $a_0 = \theta \cdot 2 r_B$;
- 4) определить C_1 и \mathcal{E}_{\max} .

Коэффициент v при заданных V_B и B' является характеристикой условий проведения канавных работ. Характеризует степень близости реальных технологических условий ($V_B B'$ и пр.) к системе отсчета, которая определяется идеальными экономико-географическими и технологическими условиями производства работ. Коэффициент θ характеризует степень отклонения a_0 от самого неоптимального варианта, т. е. от той же системы отсчета (например, если бы θ и v относились к разным и независимым системам отсчета, то между ними не существовало бы взаимосвязи). Подтвердим возможность расчета a_0 по алгоритму с использованием значений θ и v . Проведем расчет a_0 по данным табл. 14, например для канав группы 3. Имеем $v = -k/V_B$, где $V_B = 2,1 \times \times 5,0 = 10,5 \text{ м}^3$. Тогда

$$v = -\frac{(-2,25)}{10,5} \approx 0,225 \text{ или } k(\theta) = 0,225.$$

Из табл. 17 следует, что такому значению $k(\theta)$ соответствует θ в пределах $0,6 \div 0,7$. Установим значение θ в $0,69$ (см. рис. 19). Тогда $a_0 = \theta \cdot 2 r_B = 0,69 \cdot 4,2 \approx 3$ м. Напомним, что ранее выполненным расчетом (см. табл. 15) для рассматриваемых условий $a_0 = 3,4$ м. Сходимость полученных значений подтверждает правомерность и правильность обоих методов установления оптимальных расстояний. Отметим, что второй метод более прост и поэтому рекомендуется к применению в производственных условиях для оперативного расчета a_0 .

Таким образом, решена задача установления расчетного значения расстояния между зарядами, обеспечивающего минимальные общие затраты на единицу длины канавы, т. е. доказана возможность установления a по приведенной стоимости. Предел существования оптимального по стоимости расстояния между

зарядами определен как $0 < a_0 < B_v$, где B_v — ширина выемки по верху. Практическое применение изложенного материала облегчено наличием номограммы.

Задача 3. Сопоставление шнурового и сосредоточенных зарядов

Возможны два вида оптимизации канавных работ: 1) выбор из множества вариантов проведения канав одного, оптимального по каким-либо заданным признакам; 2) однозначное определение единственно возможного варианта проведения канав при условии соблюдения некоторых заданных ограничений.

Оба этих варианта в принципе однозначны и различаются лишь особенностями решения задачи оптимизации. Задачи оптимизации первого типа были рассмотрены выше (транспортировка ВВ, определение a_0). Задачи второго типа нами не рассматривались, хотя имеют широкое распространение в практике производственной деятельности геологических организаций (в частности при канавных работах). Особо велика роль этих задач при сопоставлении различных условий и способов проходки канав. В последние годы все большее применение получает способ проходки геологоразведочных канав шнуровыми зарядами [11]. Применение этого способа, как показали исследования, обеспечивает по сравнению с сосредоточенными зарядами определенные технологические преимущества. Однако важно сопоставить экономическую эффективность применяемого способа проходки канав (сосредоточенными зарядами ВВ) и внедряемого (шнуровыми зарядами). Такое сопоставление возможно по себестоимости проходки 1 м канавы каждым из этих способов. При такой постановке задача принимает характер элементарного выбора наиболее экономичного способа, но возможен вариант, когда оба способа экономически равнозначны. Если один из способов более экономичен, то задача должна заканчиваться определением экономии от применения оптимального способа по сравнению с неоптимальным. Базой сравнения (системой отсчета) нами принят ручной способ проходки. Таким образом, каждый из двух рассматриваемых способов проходки канав сопоставляется не только друг с другом, но и с базисным.

При сопоставлении двух способов проходки канав заданной длины (шнуровыми — индекс «ш» — и сосредоточенными — индекс «с» — зарядами) нами используются отдельные положения и выводы, выполненные при решении задачи 2 (определение a_0). Так, ранее установлено, что для сосредоточенных зарядов $a_{0c} = \theta 2r_v$, где θ определяется по табл. 17.

В соответствии с изложенным, задача должна свестись к сопоставлению $\Delta C_{ш}$ и ΔC_c , а также установлению $\mathcal{E}_{\max j}$. Обозначая

$$\frac{\Delta C_{ш}}{\Delta C_c} = \lambda, \quad (3.1)$$

где $\Delta C_{ш}$, ΔC_c — себестоимость проходки 1 м канавы соответственно шнуровым и сосредоточенными зарядами, р/м.

Рассматривается случай, когда $\mathcal{E}_{\max} > 0$. Тогда возможное значение λ будет $0 \leq \lambda \leq 1$. Соответственно рассматриваемые значения указывают на эквивалентность сравниваемых способов по себестоимости ($\lambda = 1$), на преимущество шнуровых зарядов ($\lambda < 1$) или, напротив, на большую эффективность сосредоточенных зарядов ($\lambda > 1$). Относительная эффективность от применения наиболее рационального в данных условиях способа проходки канав выразится

$$\mathcal{E}_{c(ш)} = \frac{\Delta C_{ш} - \Delta C_c}{\Delta C_{ш}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \cdot 100\%; \quad (3.2)$$

$$\mathcal{E}_{ш(c)} = \frac{\Delta C_c - \Delta C_{ш}}{\Delta C_c} \cdot 100 = (1 - \lambda) \cdot 100\%. \quad (3.3)$$

Здесь запись $\mathcal{E}_{c(ш)}$ означает экономическую эффективность сосредоточенных зарядов в сравнении со шнуровыми. Следовательно, задача экономического сопоставления технологии проходки канав сводится к определению значений λ и \mathcal{E}_c (или $\mathcal{E}_{ш}$). Рассмотрим определение этих показателей.

Представим $\Delta C_{ш} = C_{ш} : L$, где $C_{ш}$ — себестоимость проходки канавы протяженностью L шнуровыми зарядами, р. Выразим

$$C_{ш} = L(C_Q + C_K) + B'SLC'_y, \quad (3.4)$$

где C_Q — затраты на ВМ на 1 м канавы, р;

C_K — затраты на проходку, зарядание и взрывание на 1 м зарядной камеры, р;

S — сечение канавы, м²;

C'_y — стоимость уборки из выработки 1 м³ разрушенной породы, р/м³. Тогда

$$\Delta C_{ш} = C_Q + C_K + B'SC'_y. \quad (3.5)$$

Рассмотрим получение этих же показателей для проходки сосредоточенными зарядами. Выразим максимальную эффективность от перехода на сосредоточенные заряды (в сравнении с ручным способом проходки):

$$\mathcal{E}_{\max} = - \frac{C_1 \gamma_2}{\Delta C_p}. \quad (\text{см. 2.30})$$

С другой стороны

$$\mathcal{E}_{\max} = \frac{\Delta C_p - \Delta C_c}{\Delta C_p}. \quad (3.6)$$

Тогда

$$- \frac{C_1 \gamma_2}{\Delta C_p} = \frac{\Delta C_p - \Delta C_c}{\Delta C_p}.$$

Отсюда

$$\Delta C_c = \Delta C_p + C_1 \gamma_2, \quad (3.7)$$

где C_1, γ_2 (см. формулы 2.15, 2.27 и 2.33).

По формуле (3.1) выразим

$$\lambda = \frac{C_Q + C_K + B' C'_y S}{\Delta C_p + C_1 \gamma_2}. \quad (3.7^*)$$

Разделив числитель и знаменатель на ΔC_p , получим:

$$\lambda = \frac{(C_Q + C_K)/\Delta C_p + B' C'_y S/\Delta C_p}{1 - (-C_1 \gamma_2)/\Delta C_p}. \quad (3.8)$$

Подставив в формулу (3.8) значение $\Delta C_p = C'_{ц} S$ (где $C'_{ц}$ — затраты на разрушение 1 м³ породы вручную), учтя формулу (2.30) и введя в (3.8) затраты на засыпку и рекультивацию почвы на 1 м канавы сечением 1 м², получим

$$\lambda = \frac{\frac{C_Q + C_K}{\Delta C_p} + B' C'_y \cdot \frac{1}{C'_{ц}}}{1 - \mathcal{E}_{\max}} = \frac{1}{1 - \mathcal{E}_{\max}} \times \left[\frac{C_Q + C_K}{\Delta C_p} + B' \frac{C'_y}{C'_{ц} + \delta C_{зр}} \right]. \quad (3.9)$$

По аналогии с задачей 2 покажем, что в рамках рассматриваемой задачи затраты на засыпку и рекультивацию мало влияют на величину λ . Действительно, пусть для сопоставляемых способов

$$\frac{\delta C_{зр}}{\Delta C_{ш}} = \psi \quad \text{и} \quad \frac{\delta C_c}{\Delta C_c} = \varepsilon.$$

Тогда с учетом засыпки и рекультивации

$$\lambda_{(зр)} = \frac{(1 + \psi) \Delta C_{ш}}{(1 + \varepsilon) \Delta C_{ш}} = \lambda \frac{1 + \psi}{1 + \varepsilon}.$$

По формулам приближения получим

$$\begin{aligned} \lambda_{(зр)} &= \lambda + \lambda \frac{\psi - \varepsilon}{1 + \varepsilon} = \lambda [1 + (\psi - \varepsilon)(1 - \varepsilon)] = \\ &= \lambda [1 + \psi - \varepsilon - \psi \varepsilon + \varepsilon^2]. \end{aligned}$$

Известно, что ψ и ε — величины одного порядка (достаточно малы в сравнении с ΔC_i) и что величиной $\varepsilon^2 - \psi \varepsilon$ можно пренебречь. Тогда $\lambda_{(зр)} = \lambda [1 + \psi - \varepsilon]$.

Но ψ и ε имеют величину порядка нескольких процентов, поэтому $\psi - \varepsilon$ пренебрежимо мало. Отсюда правомерно считать $\lambda_{(зр)} \approx \lambda$.

Так как $0 < \lambda < 1$, а выражение в квадратных скобках больше 0 (см. формулу 3.9), имеем $\mathcal{E}_{\max} < 1$. Из формулы (3.9) следует, что чем больше значение λ , тем выше \mathcal{E}_{\max} . При $\lambda < 0$ ($\lambda \rightarrow 0$ по физическому смыслу) имеем $\mathcal{E}_{\max} > 1$, что соответствует малому значению B' и весьма эффективному применению сосредоточенных зарядов (в сравнении с ручной проходкой). Для этого случая $\Delta C_p \gg \Delta C_c$, а отношения C'_y / C'_c и $\frac{C_Q + C_K}{\Delta C_p}$ стремятся к нулю.

Таким образом, если $\lambda < 0$, то в (3.9) величина члена $B' = \frac{C'_y}{C'_c}$ также мала и им можно пренебречь. Тогда формула (3.9)

примет вид

$$\lambda = \frac{1}{1 - \mathcal{E}_{\max}} \left(\frac{C_Q + C_K}{\Delta C_p} \right). \quad (3.10)$$

С учетом того, что

$$0 \leq \frac{C_Q + C_K}{\Delta C_p} \leq 1; \quad 0 \leq \frac{C'_y}{C'_c} \leq 1; \quad 0 \leq B' \leq 1,$$

получим предел возможных изменений

$$0 \leq \mathcal{E}_{\max} < (5 \div 10). \quad (3.11)$$

Зная значения составляющих по формулам (3.10) и (3.11), можем определить λ . При дальнейшем анализе исходим из того, что разрушение объема V_c производится вручную.

Приведем цифровой пример сопоставления экономичности проходки канав сосредоточенными и шнуровыми зарядами. Пусть имеем для конкретных условий

$$B' = 0,3 \text{ (или } B = 0,7); \quad \frac{C'_y}{C'_c} = 0,1; \quad \frac{C_Q + C_P}{\Delta C_p} = 0,2; \quad \mathcal{E}_{\max} = 0,5.$$

Тогда имеем

$$\lambda = \frac{1}{1 - 0,5} [0,2 + 0,1 \cdot 0,3] = 0,46.$$

При $\lambda < 1$ эффективность шнуровых зарядов выше. Отсюда $\mathcal{E}_{ш(c)} = (1 - 0,46) \cdot 100\% = 54\%$.

Таким образом, для рассматриваемых условий проходка 1 м канавы шнуровыми зарядами примерно вдвое дешевле, чем при применении сосредоточенных зарядов (но правомерны условия, когда $\mathcal{E}_c > \mathcal{E}_ш$). Многообразные значения составляющих формулы (3.9) можно свести в таблицы, что облегчит расчет значений λ .

При проектировании работ по каждому участку проходки канав важно выбрать оптимальный для данных условий способ

производства работ. С учетом трех сопоставляемых способов (ручного, сосредоточенными зарядами, шнуровыми зарядами) мы можем определить шесть видов экономии: $\mathcal{E}_{p(ш)}$, $\mathcal{E}_{p(c)}$, $\mathcal{E}_{ш(c)}$, $\mathcal{E}_{ш(p)}$, $\mathcal{E}_{c(p)}$, $\mathcal{E}_{c(ш)}$. Причем всегда какие-либо три показателя положительны, а три — отрицательны. Такой выбор оптимального по себестоимости проходки способа можно осуществить по значениям \mathcal{E}_{\max} и λ .

Возможные варианты этих значений имеют вид:

1) $\mathcal{E}_{\max} < 0$ при $\lambda > 1$ указывает на эффективность ручного способа. Тогда

$$\mathcal{E}_{p(ш)} = \frac{\Delta C_{ш} - \Delta C_p}{\Delta C_{ш}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{1}{\psi}\right) \cdot 100\%; \quad (3.12)$$

2) $\mathcal{E}_{\max} < 0$, но $\lambda < 1$, указывает на необходимость сопоставления ручного и шнурового способов. Если в результате сопоставления выявится, что

$$\left| \frac{C_Q + C_p}{\Delta C_p} + B' \frac{C'_y}{C'_ц} \right| < 1,$$

то это означает эффективность шнурового способа (в сравнении с ручным). Тогда

$$\mathcal{E}_{ш(p)} = \frac{\Delta C_p - \Delta C_{ш}}{\Delta C_p} \cdot 100 = (1 - \psi) \cdot 100\%. \quad (3.13)$$

Наоборот, при

$$\left| \frac{C_Q + C_p}{\Delta C_p} + B' \frac{C'_y}{C'_ц} \right| > 1$$

эффективнее ручной способ, и $\mathcal{E}_{p(ш)} = \left(1 - \frac{1}{\psi}\right) \cdot 100\%.$ (3.14)

Так можно провести экономическое сопоставление рассматриваемых способов проходки канав, выбрать для данных условий оптимальный способ и оценить экономический эффект от его применения.

Задача 4. Взаимодействие шнуровых зарядов

При применении взаимодействующих шнуровых зарядов важно правильно установить расстояние между ними (b). Пусть для образования канавы заданным сечением S требуется взорвать два взаимодействующих шнуровых заряда. Учтем, что эта задача актуальна при проходке канав, когда проектное сечение $S' > S^0$, где S^0 — сечение, которое может быть образовано взрывом одиночного шнурового заряда. Кроме того, нельзя исключать вариант, когда по энергетическим и стоимостным затратам целесообразнее применять взрывание двух взаимодействующих шнуровых зарядов каждого с единичной массой $q_{д}$ взамен одного шнурового

заряда массой $q'_{л}$, где $q'_{л} \gg q_{л}$. Введем два допущения: проходка производится в однородной среде, оба равновеликих по энергии заряда размещаются на данной глубине W и взрываются одновременно. Принципиальная схема постановки задачи приведена на рис. 20.

Задача может быть реализована, когда число зарядов составляет $N \geq 2$. Найдем оптимальное расстояние b_0 , соответствующее

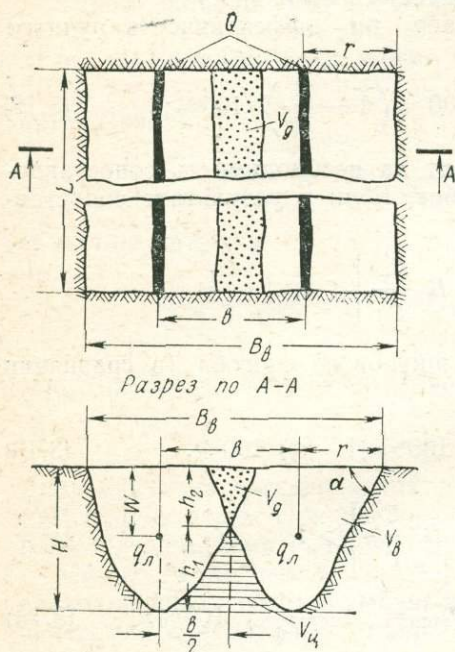


Рис. 20. Схема к постановке задачи о взаимодействии шнуровых зарядов.

Q — шнуровой заряд; $q_{л}$ — масса 1 м заряда; r — радиус выемки от действия одиночного заряда BB ; L, B_B — длина и ширина канавы (соответственно); h_1, h_2 — высота конуса зон целика и переизмельчения (соответственно)

универсален, но не учитывает возможного неоправданного завышения сечения выработки; решение задачи по критерию первого типа фактически означает выбор оптимального сечения канавы. Рассмотрим оба типа целевой функции.

1. Оптимизация по себестоимости проходки 1 м канавы. Выразим себестоимость проходки 1 м канавы как функцию от b . Имеем

$$\Delta C = V_{ц} \cdot C'_{ц} + V_{д} C'_{д} + 2(C_Q + C'_n) + 2(V_B - V_{д}) \cdot B' C'_y, \quad (4.1)$$

минимуму некоторой целевой функции F . Поясним, что методологически решение этой задачи идентично ранее рассмотренной задаче по оптимизации a_0 (также учитываются возможные соотношения между объемами $V_{д}$ и $V_{ц}$ и соответствующих затрат). Поэтому отдельные положения, рассмотренные в предыдущей задаче, нами используются без дополнительных разъяснений. Различие между этими задачами состоит в том, что оптимизация сосредоточенных зарядов рассматривается в трехмерном варианте (пространстве), а определение b_0 возможно в двухмерном варианте.

Возможными критериями качества целевой функции F могут быть: 1) себестоимость проходки 1 м канавы; 2) себестоимость проходки 1 м³ канавы, что идентично проходке 1 м канавы сечением 1 м³. Критерий качества второго типа более

где C_Q — затраты на ВВ 1 м шнурового заряда, включая СВ;
 $C'_п$ — затраты на проходку, зарядание, взрывание 1 м камеры;
 C'_y — стоимость уборки 1 м³ разрушенной породы из контуров выработки;
 $C'_ц$ — стоимость разрушения 1 м³ целика;
 B' — доля породы, оставшейся после взрыва в выработке;
 V_B — объем видимой части выемки на 1 м канавы.

Отсюда задача должна быть сформулирована так: определить расстояние между взаимодействующими шнуровыми зарядами ВВ, обеспечивающее минимальную приведенную стоимость проходки 1 м канавы (ΔC_{\min} при b_0).

Дифференцируя формулу (4.1) по b , получим:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{C} &= \dot{V}_ц \cdot C'_ц + \dot{V}_{ли} \cdot C'_y + 2B'C'_y (\dot{V}_B - \dot{V}_ц) = \\ &= \dot{V}_{ли} C'_y (1 - 2B') + \dot{V}_ц C'_ц. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Учитывая, что

$$V_ц = l^2 \frac{H}{4r} \quad \text{и} \quad V_{ли} = (2r - l)^2 \cdot \frac{H}{4r}, \quad (4.3)$$

подставим производные от (4.3) в формулу (4.2). Получим

$$\Delta \dot{C} = -\frac{H}{2r} (2r - l) \cdot C'_y (1 - 2B') + b \frac{H}{2r} \cdot C'_ц. \quad (4.4)$$

Значение первой производной $\Delta \dot{C}$ в точке b_0 равно нулю, поэтому из (4.4) приходим к уравнению относительно b_0

$$\frac{2r}{b_0} = 1 + \frac{C'_ц}{C'_y (1 - 2B')}. \quad (4.5)$$

Решение этого уравнения дает b_0 . Имеем

$$l_0 = \frac{2r \cdot C'_y (1 - 2B')}{C'_ц + C'_y (1 - 2B')}, \quad (4.6)$$

Пусть, как и прежде, $b_0 = 2r\theta$, $0 \leq \theta \leq 1$; тогда из формулы (4.6) находим

$$\theta = \frac{\frac{C'_ц}{C'_y} (1 - 2B')}{1 + \frac{C'_ц}{C'_y} (1 - 2B')}, \quad (4.7)$$

Выразим

$$\chi = \frac{C'_y}{C'_n} (1 - 2B'). \quad (4.8)$$

Тогда

$$\theta = \frac{\chi}{1 + \chi}. \quad (4.9)$$

Таким образом, наличие оптимальной точки доказано решением уравнения (4.5). Однако необходимо установить условия, при которых полученное значение b_0 соответствует именно минимуму ΔC , а не его максимуму. Учитывая, что $0 \leq \theta \leq 1$, из равенства (4.9) найдем ограничения для χ . Имеем

$$\chi \geq 0; \quad \chi < -1; \quad \chi > -1. \quad (4.10)$$

Для нахождения указанных условий, найдем вторую производную $\Delta \ddot{C}_{(b)}$ и ее знак в точке b_0 . Дифференцируя формулу (4.4) по b , получим

$$\Delta \ddot{C} = \frac{H}{2r} [C'_y(1 - 2B') + C'_n]. \quad (4.11)$$

Отсюда точка b_0 будет точкой минимума, если $\Delta \ddot{C} > 0$. Учитывая, что отношение $H/2r$ всегда положительно и на знак производной не влияет, получим из формулы (4.11) необходимое и достаточное условие существования экстремальной точки, в которой $\Delta C = \min (C'_y > 0, C'_n > 0)$.

Имеем

$$\left(\frac{C'_y}{C'_n} \right) \cdot (1 - 2B') > -1 \quad (4.12)$$

или

$$\chi > -1. \quad (4.13)$$

Сопоставив (4.13) и (4.10), найдем: $\chi \geq 0$. (4.14)

Используя (4.8), (4.13) и учтя, что $C'_y/C'_n > 0$, получим, что критерием существования оптимума будет условие $(1 - 2B'') \geq 0$, откуда $B' \leq 0,5$ (4.15). Следовательно, b_0 имеет место при выбросе из выемки энергией взрыва не менее 50% всей разрушенной породы.

Найдем оптимальное значение ΔC , для чего преобразуем формулы (4.3) в вид

$$V_{ц} = rH\theta^2 \text{ и } V_{ди} = rH(1 - \theta)^2. \quad (4.16)$$

С учетом формул (4.16), (4.8) и зная, что $\chi = \frac{\theta}{1 - \theta}$, из формулы (4.1) имеем выражение для оптимального значения ΔC . Получим

$$\Delta C_0 = 2 [C_Q + C'_n + rH \cdot B' \cdot C'_y] + C'_n r H \theta. \quad (4.17)$$

Рассчитаем максимальный экономический эффект (относительно проходки вручную). Выразим

$$\mathcal{E}_{\max} = \frac{\Delta C_p - \Delta C_0}{\Delta C_p} = 1 - \frac{\Delta C_0}{\Delta C_p}. \quad (4.18)$$

Но

$$\Delta C_p = C'_c H (2\theta + 1) r. \quad (4.19)$$

Тогда имеем

$$\mathcal{E}_{\max} = \frac{\theta + 1}{2\theta + 1} - \frac{2}{2\theta + 1} \cdot \frac{C_Q + C'_n}{C'_c \cdot r \cdot H} - \frac{2}{2\theta + 1} \cdot B' \frac{C'_y}{C'_c}, \quad (4.20)$$

где \mathcal{E}_{\max} измеряется в долях единицы.

Из формулы (4.20) видно, что при некотором известном θ с увеличением B' \mathcal{E}_{\max} уменьшается, т. е. наибольший экономический эффект достигается при усиленном выбросе породы энергией взрыва (B' мало). Рассмотрим экстремальный (максимальный) экономический эффект, что соответствует $B' = 0$, или полному выбросу. Полный выброс соответствует значениям

$$Q_0 = \frac{C'_y}{C'_y + C'_c}; \quad Q_{0\max} = \frac{1}{2}; \quad Q_{0\min} = 0.$$

Тогда при $B' = 0$ получим пределы изменений

$$0 \leq \mathcal{E}_{\max} \leq \frac{3}{4}. \quad (4.21)$$

Путем анализа формулы (4.20) получим общие пределы изменения \mathcal{E}_{\max} при любых B' . Имеем $-2 \leq \Delta \mathcal{E}_{\max} \leq 0$. (4.22)

Для крайних вариантов значений θ имеем:

$$\text{при } \theta = 0 \quad \Delta \mathcal{E}_{\max} = 1; \quad (4.23)$$

при $\theta = 1 \quad \Delta \mathcal{E}_{\max} = 0$,

где $\Delta \mathcal{E}_{\max}$ — приращение \mathcal{E}_{\max} .

Формулы (4.21), (4.22), (4.23) указывают на то, что степень влияния показателя выброса породы энергией взрыва (через B') на значение \mathcal{E}_{\max} крайне сильна (примерно на две трети значение \mathcal{E}_{\max} зависит от B'). Поэтому при проходке канав взрывом на выброс экономическая эффективность от внедрения оптимальных параметров взрыва во многом определяется значением показателя B . С учетом неравенств (4.22) и (4.23) имеем общие пределы возможных значений

$$-2 \leq \mathcal{E}_{\max} \leq 1. \quad (4.24)$$

Соответственно эти неравенства характеризуют: экономическую эффективность ручной проходки (4.22) и экономичность проходки шнуровыми зарядами (4.23).

Сопоставление этих граничных условий показывает, что максимальный экономический выигрыш от перехода на шнуровые заряды почти вдвое превышает эффективность ручного способа проходки канав.

Вернемся к формуле (4.20). Для удобства расчетов ее можно представить в виде

$$\mathcal{E}_{\max} = \alpha_1(\theta) - \alpha_2(\theta) \frac{C_Q + C'_n}{C'_u \cdot r \cdot H} - \alpha_2(\theta) B' \frac{C'_y}{C'_u} \quad (4.25)$$

или

$$\mathcal{E}_{\max} = \alpha_1(\theta) - \alpha_2(\theta) \left[\frac{C_Q + C'_n}{C'_u r H} + B' \frac{C'_y}{C'_u} \right], \quad (4.26)$$

где

$$\alpha_1(\theta) = \frac{\theta + 1}{2\theta + 1} \quad \text{и} \quad \alpha_2(\theta) = \frac{2}{2\theta + 1}.$$

Таким образом, нахождение оптимального значения b_0 при оптимизации по первому критерию (C, m) может быть осуществлено с помощью следующего алгоритма:

1) найти χ по формуле (4.8), проверить выполнение неравенства (4.15);

2) в случае, если неравенство (4.15) выполнено, то рассчитать θ по формуле (4.9);

3) рассчитать b_0 по формуле $b_0 = 2r\theta$;

4) рассчитать \mathcal{E}_{\max} по формуле (4.20).

Приведем пример решения задачи оптимизации по разработанному алгоритму и рассмотрим два варианта: $B' = 0,35$ и $B' = 0,1$. Пусть имеем

$$B' = 0,35; \quad \frac{C'_y}{C'_u} = 0,7; \quad r = 1 \text{ м}; \quad H = 1 \text{ м}; \quad \frac{C_Q + C'_n}{C'_u \cdot r \cdot H} = 0,3.$$

Действуем согласно алгоритму и получим

1) $B' < 0,5$, так как $0,35 < 0,5$; то

$$\chi = 0,7(1 - 2 \cdot 0,35) = 0,7 \cdot 0,3 = 0,21;$$

$$2) \theta = \frac{0,21}{1 + 0,21} \approx \frac{1}{6};$$

$$3) b_0 = 2 \cdot \frac{1}{6} = 0,33 \text{ м};$$

$$4) \mathcal{E}_{\max} = \frac{\frac{1}{6} + 1}{\frac{1}{3} + 1} - \frac{2}{\frac{1}{3} + 1} \cdot 0,3 - \frac{2}{\frac{1}{3} + 1} \cdot 0,35 \cdot 0,7 = 0,05;$$

$$\mathcal{E}_{\max} = 5\%.$$

Полученный эффект весьма низок, так как уровень выброса породы энергией взрыва незначителен (65%). Выполнив идентичные расчеты, установим, что при $B' = 0,1$ значение \mathcal{E}_{\max} резко возрастает и составит $\mathcal{E}_{\max} \approx 0,36$. Таким образом, эти расчеты еще раз подтверждают сделанный ранее вывод [11], что при переходе на шнуровые заряды (взамен ручного способа проходки канав) наибольшая экономическая эффективность проявляется при параметрах взрыва, обеспечивающих повышенный выброс породы энергией взрыва. Так, в рассматриваемых примерах при уменьшении B' в 3 раза значение \mathcal{E}_{\max} возросло в 7 раз.

2. Рассмотрим вопрос оптимизации при принятии за критерий качества себестоимость проходки 1 м канавы сечением 1 м².

Пусть критерий качества имеет вид

$$I = \frac{\Delta C}{S}. \quad (4.27)$$

Выразим сечение выработки

$$S = (b + r)H. \quad (4.28)$$

Дифференцируя (4.27) по b получим уравнение относительно b_0 . Имеем

$$\Delta \dot{C} (b + r) - \Delta C = 0. \quad (4.29)$$

Докажем необходимые и достаточные условия существования экстремальной точки. Дифференцируя дважды формулу (4.27) по b , найдем

$$\ddot{I}_{bb} = \frac{1}{H} \frac{\Delta \ddot{C} (b + r)^3 - 2\Delta \dot{C} (b + r)^2 + 2\Delta C (b + r)}{(b + r)^4}. \quad (4.30)$$

Подставив значение $\Delta \dot{C}$ в формулу (4.30), имеем значение \ddot{I}_{bb} в оптимальной точке

$$\ddot{I}_{bb}(b_0) = \frac{1}{H} \cdot \frac{\Delta \ddot{C}}{b + r}. \quad (4.31)$$

Так как $b_0 > 0$, то из (4.31) следует, что при $\Delta \ddot{C} > 0$ имеем $\ddot{I}_{bb}(b_0) > 0$. Отсюда необходимым и достаточным условием существования экстремальной (минимальной) точки при критерии качества вида (4.27) является выполнение неравенства (4.12), имеющего вид $\chi > -1$. Используя формулы (4.4), (4.3), (4.1) и подставив значения ΔC и $\Delta \dot{C}$ в формулу (4.29), получим

$$\begin{aligned} -C'_y(1 - 2B')(8r^2 - 2ar - b^2) + C'_c(2r + b^2) = \\ = \frac{8r}{H} [(C_Q + C'_n) + V_B B' C'_y]. \end{aligned} \quad (4.32)$$

Откуда

$$B_0 = \sqrt{r^2 + 8r^2 \varepsilon} - r \quad (4.33)$$

или

$$\theta = \sqrt{\frac{1}{4} + 2\varepsilon} - \frac{1}{2}, \quad (4.34)$$

где $0 \leq \theta \leq 1$; $0 \leq \varepsilon \leq 1$ при $0 \leq b_0 \leq 2r$.

Значение ε рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \frac{\frac{C_Q + C'_n}{\Delta C_p} + \frac{C'_y}{C'_n} (1 - B')}{1 + \frac{C'_y}{C'_n} (1 - 2B')}, \quad (4.35)$$

где ΔC_p — стоимость ручной проходки 1 м выработки.

Выразив ε через χ , имеем

$$\varepsilon = \frac{\frac{C_Q + C'_n}{\Delta C_p} + \frac{1}{2} \chi + \frac{1}{2} \frac{C'_y}{C'_n}}{1 + \chi}. \quad (4.36)$$

Формулу (4.36) можно представить в виде

$$\varepsilon = \frac{\frac{C_Q + C'_n}{\Delta C_p} + \chi \frac{1 - B'}{1 - 2B'}}{1 + \chi}, \quad (4.37)$$

где $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Расчет \mathcal{E}_{\max} в данной постановке весьма сложен, поэтому он не приводится.

Алгоритм оптимизации при заданном критерии качества представляется в следующем виде:

- 1) найти χ и проверить выполнение неравенства (4.12);
- 2) определить ε по формуле (4.36) и проверить выполнение неравенства $0 \leq \varepsilon \leq 1$;
- 3) найти значение θ по формуле (4.27) и (4.34);
- 4) установить оптимальное значение $b_0 = 2r\theta$.

Рассмотрим применение данного алгоритма, используя два ранее взятых примера при ($B' = 0,35$ и $B' = 0,1$). Подставив принятые значения, соответственно имеем: $b_0 = 0,5$ и $0,56$ м. Эти данные позволяют сделать вывод, что с учетом себестоимости проходки 1 м³ выработки значение оптимального расстояния между взаимодействующими шнуровыми зарядами ВВ мало зависит от уровня выброса породы энергией взрыва.

Расчет экономической эффективности может быть произведен по формуле

$$\mathcal{E}_{\max} = \frac{I_p - I_{ш}}{I_p}, \quad (4.38)$$

где

$$I_p = \frac{\Delta C_p}{S_0} \text{ и } I_{ш} = \frac{\Delta C_0}{S_0}.$$

Тогда

$$\mathcal{E}_{\max} = \frac{\Delta C_p - \Delta C_0}{\Delta C_p} \cdot 100\%.$$

Во всех задачах, рассмотренных выше, оптимизация проводилась по стоимостному критерию качества, но нами обосновывались возможность и целесообразность для определенных условий применения технологических критериев. Еще раз подчеркнем, что возможны варианты, когда результаты оптимизации одного и того же процесса по технологическим и экономическим критериям качества противоречат друг другу. В этом случае принимается вариант, более полно удовлетворяющий целям оптимизации. В последующих задачах 5, 6 и 7 оптимизация проводится по технологическим показателям.

Задача 5. Оптимизация взаимодействия двух шнуровых зарядов по суммарному расходу ВВ

Используем математическую модель задачи 4 и рис. 21. Примем, что затраты ВВ на проходку 1 м канавы стабильны и равны $2q_{\text{л}}$, а весь объем $V_{\text{д}}$ и $V_{\text{ц}}$ остается при взрыве не выброшенным из выемки выброса. Найдем объем породы, выброшенной из 1 м выработки

$$V_{\text{в}} = \left[(b+r)H - \frac{b^2}{4} \operatorname{tg} \alpha - \frac{\left(H - \frac{b}{2} \operatorname{tg} \alpha\right)^2}{\operatorname{tg} \alpha} \right] (1 - B'), \quad (5.1)$$

где
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{r}.$$

Подставив значения $\operatorname{tg} \alpha$ в формулу (5.1), имеем

$$V_{\text{в}} = 2Hb \left(1 - \frac{b}{4r}\right) (1 - B'). \quad (5.2)$$

Величину $q_{\text{л}}$ найдем по формуле

$$q_{\text{л}} = q(\alpha + \beta n^2) W^2, \quad (5.3)$$

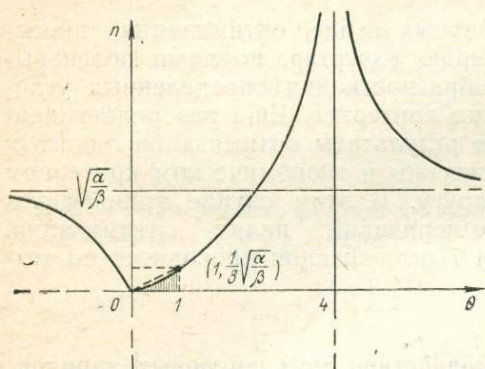
где α , β , q — постоянные величины; n — показатель действия взрыва.

При шнуровых зарядах в двухмерном варианте $f(n) = \alpha + \beta n^2$ так как в общем виде $Q = q \cdot S$, где S — сечение канавы.

Найдем расход ВВ на 1 м³ выброшенной породы

$$q_{ВВ} = \frac{2q_{Л}}{V_{В}} = \frac{qW^2(\alpha + \beta n^2)}{Hb \left(1 - \frac{b}{4r}\right) (1 - B')} \quad (5.4)$$

Параметры $q_{Л}$ и $q_{ВВ}$ во многом определяются значением показателя n . В данных условиях W , H , r , B' , b — постоянные величины; поэтому найдем оптимальное значение показателя n , соответствующее минимуму $q_{ВВ}$. Но в условиях задачи найти оптимальное $n(n_0)$ означает найти r_0 . Дифференцируем (5.4), приравнявая полученное выражение нулю. Имеем уравнение



Имеем уравнение

$$\left[\frac{\alpha W^2 + \beta r^2}{1 - \frac{b}{4r}} \right]'_r = 0, \quad (5.5)$$

которое преобразуем в вид

$$r^3 - \frac{b}{8} r^2 + \frac{b}{8} \cdot \frac{\alpha}{\beta} W^2 = 0. \quad (5.6)$$

Рис. 21. Взаимосвязь показателей n и θ .
 n — показатель действия взрыва, θ — характерный коэффициент

Пусть $b = 0.2r$, где θ определяется из задачи 4 по одному из двух рассмотренных критериев качества. Так как $0 \leq \theta \leq 1$, то уравнение (5.6) примет вид

$$r^3 - \frac{r^3}{4} \theta + \frac{r}{4} \theta \frac{\alpha}{\beta} W^2 = 0. \quad (5.7)$$

Разделив обе части полученного уравнения на $W^3 (W \neq 0)$, применительно к показателю n получим

$$n^3 \left(1 - \frac{\theta}{4}\right) + n \frac{\theta}{4} \frac{\alpha}{\beta} = 0. \quad (5.8)$$

Решение этого уравнения будет

1) $n_0 = 0$;

$$2) n_0 = \sqrt{\frac{\theta \frac{\alpha}{\beta}}{\theta - 4}} = \sqrt{\frac{\theta}{4 - \theta} \left(-\frac{\alpha}{\beta}\right)}. \quad (5.9)$$

Первое решение характеризует проходку канавы одним или двумя зарядами дробления ($r=0$, $a=0$ при $W \neq 0$). Большой интерес представляет второе решение. Рассмотрим вопрос установления оптимального показателя действия взрыва с позиций сочетания экономических и технологических критериев качества. Из

формулы (5.9) следует, что требование экономичности параметров может быть обеспечено выбором определенных значений показателя θ (см. формулу 2.37 и др., а также табл. 17). В качестве критерия технологического характера примем удельный расход $q_{ВВ}$ (5.4). Тогда расчет n_0 может быть выполнен по (5.9). Значение $-1 \leq \theta \leq 0$ не рассматривается, так как оно характеризует вариант, когда заряды меняются местами. Тогда формулу (5.9) можно выразить в виде

$$n_0 = \sqrt{\left| \frac{\theta}{4-\theta} \cdot \frac{\alpha}{\beta} \right|}. \quad (5.10)$$

Формула (5.10) является при данной постановке основной формулой оптимизации по показателю n . Проанализируем коэффициенты α и β (см. формулу 5.3). Коэффициент α соответствует $n=1$ и характеризует часть массы заряда, не зависящую от показателя n , а β характеризует часть заряда, зависящую от показателя n . Причем чем больше значение β и меньше α , тем меньше значение n оптимальное, и, напротив, при малом β и большом α показатель n_0 возрастет. Отсюда следует вывод, что с уменьшением значения n_0 целесообразнее использовать энергию заряда ВВ для дробления породы; с увеличением n_0 более целесообразным взрывы на выброс.

Известно, что при $\alpha/\beta < 1$ имеем $\theta : (4-\theta) < 1$, откуда n_0 также меньше единицы. Следовательно, при этих значениях заряд ВВ действует на дробление породы. Рассмотрим одиночный шнуровой заряд, что характерно при $\theta > 4$ и $b > 8r$, так как при $\theta = 4$ имеем $n \rightarrow \infty$. Пусть взаимодействие шнуровых зарядов ничтожно мало; при этом $\theta \rightarrow \infty$, а член $\frac{\theta}{4-\theta} \rightarrow -1$.

Тогда имеем $n_0 \rightarrow \sqrt{\left| \frac{\alpha}{\beta} \right|}$.

Отсюда оптимальное значение показателя n (при котором $q_{ВВ} = \min$) составит

$$n_0 = \sqrt{\left| \frac{\alpha}{\beta} \right|}. \quad (5.11)$$

Принципиальный характер зависимости $n(\theta)$ на основе формул (5.10) и (5.11) приведен на рис. 25. Так как на отрезке $0 \leq \theta \leq 1$ имеем $n_{ср}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}$, то функцию $n(\theta)$ можно представить в виде

$$n(\theta) = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \cdot \theta. \quad (5.12)$$

При этом кривая $n(\theta)$ на отрезке $\theta = 0 \div 1$ заменяется прямой (пунктир на рис. 21). Вследствие незначительного расхождения формула (5.12) практически приемлема.

Вернемся к исследованию взаимодействующих шнуровых зарядов. Рассмотрим значения n_0 на исследуемом отрезке θ ($0 \leq \theta \leq 1$), который характеризуется наличием объемов переизмельчения и на котором может проводиться экономическая оптимизация. Логично считать, что с увеличением значения b_0 показатель n следует увеличивать. Установление n_0 при заданных W и H можно свести к выявлению оптимального значения параметра r , определяющего при этих условиях коническое сечение канавы (усложненная параболическая форма выемки выброса нами не учитывается).

Найдем численные значения α и β , учитывая, что

$$\alpha + \beta = 1 \text{ и } \alpha = 1 - \beta. \quad (5.13)$$

Тогда из формулы (5.3) имеем

$$q_{\text{л}} = q [1 + \beta (n^2 - 1)] W^2, \quad (5.14)$$

откуда

$$\beta = \left[\frac{q_{\text{л}}}{qW^2} - 1 \right] \frac{1}{n^2 - 1}. \quad (5.15)$$

Для определения пределов практических значений коэффициентов α и β необходимо задать крайние значения параметров формулы (5.14). Рассмотрим, к примеру, вариант, когда пределы изменения параметров составляют: $q_{\text{л}} = 7 \div 10$, кг/м; $q = 0,7 \div 1,5$ кг/м² сечения; $W = 1 \div 3$ м; $n = 2 \div 3$. Тогда для этих конкретных условий получим интервалы значений: $-3,43 \leq \alpha \leq 1,06$, $-0,06 \leq \beta \leq 4,43$.

Понятно, что для разных горных пород α и β различны, но должны быть в рамках установленных пределов. При иных значениях параметров (например, $q_{\text{л}} = 1 \div 3$, $q = 1 \div 2$ и т. д.), используя формулы (5.15) и (5.13), можно установить пределы по α и β . Следует учитывать, что n_0 определяется соотношением этих коэффициентов. Имеем, как правило, $\alpha : \beta \leq 0$, что определяет положительный знак модуля в формуле (5.10). Таким образом, приняв за критерий качества минимальный удельный расход ВВ ($q_{\text{ВВ}}$), можем, используя формулы (5.10) и (5.11), установить оптимальное значение показателя действия взрыва n_0 , что, в свою очередь, позволит оптимизировать процесс проведения канав с использованием энергии взаимодействующих шнуровых зарядов ВВ.

Задача 6. Оптимизация процесса проходки канав сосредоточенными зарядами (по суммарному расходу ВВ)

В задаче 2 рассматривалась оптимизация этого процесса по стоимостному критерию качества. Предполагалось, что параметры r , H , W и L заданы из геологических и технологических соображений.

Рассмотрим эту задачу из условия, что $\Sigma Q = \min$. Найдем для заданных H, W, L такое r , при котором удельный расход на 1 м^3 разрушенной взрывом породы минимален, т. е. имеем $q_p = \min$. Установить параметр r сложнее других рассматриваемых параметров, так как H и L определяются геологическими условиями, а W , как это покажем ниже, устанавливается по оптимальному значению q_p . Для упрощения рассуждений положим, что параметры H, L, W известны, а объем неразрушенных целиков массива пренебрежимо мал в сравнении с общим объемом канавы. Положим, что расстояние a известно и постоянно (хотя бы и неоптимально в свете выводов задачи 2). Исходя из физического смысла q_p и ΣQ , отметим, что оптимизация по этим показателям эквивалентна. Тогда

$$q_p = \frac{\frac{L-2r}{a} + 1}{LS}, \quad (6.1)$$

где q_p — взаимодействующий сосредоточенный заряд, кг;

S — сечение канавы, м^2 ;

L — длина канавы, м ($L \gg a$).

Отсюда

$$\frac{\frac{L-2r}{a} + 1}{L} \approx \frac{1}{a}. \quad (6.2)$$

Учтем, что

$$Q = q(\alpha + \beta n^3) W^3,$$

где α и β — заданные коэффициенты;

q — для данной горной породы постоянная величина.

Выразим

$$q_p = \frac{1}{a} q \frac{\alpha + \beta n^3}{rH} W^3. \quad (6.3)$$

Имеем $r = nW$, откуда

$$q_p = \frac{1}{a} q \frac{1}{H} W^2 \frac{\alpha + \beta n^3}{n}. \quad (6.4)$$

В формуле (6.4) q, H, a и W — величины постоянные; выразим их через v . Тогда (6.4) примет вид

$$q_p = v \frac{\alpha + \beta n^3}{n}. \quad (6.5)$$

На основании (6.4) строим графическую зависимость $q(n)$ (рис. 22), действительную для $\alpha \neq 0, \beta \neq 0$ ($\alpha > 0, \beta > 0$). Оптимальное значение (точка P) соответствует n_0, q_{p0} . Найдем эту точку.

Дифференцируя (6.5) по n и приравнявая производную нулю, имеем уравнение

$$2\beta n^3 - \alpha = 0. \quad (6.6)$$

Из (6.6) получим оптимальное значение n . Имеем

$$n_0 = \sqrt[3]{\frac{\alpha}{2\beta}}. \quad (6.7)$$

Из формулы (6.7) видно, что n_0 зависит только от коэффициентов формулы Борескова и не зависит от тех величин, которые условно были приняты нами постоянными. Если принять наиболее распространенный вариант формулы Борескова, т. е. $\alpha=0,4$; $\beta=0,6$, то получим

$$n_0 = \sqrt[3]{\frac{1}{3}} \approx 0,7.$$

Ранее нами полагалось, что a не зависит от r . Рассмотрим вариант, когда a зависит от r , но задано значение θ . Тогда можем выразить $a=2r\theta$. Формула (6.3) примет вид:

$$q_p = v_1(\theta) \frac{\alpha + \beta n^3}{n^2}, \quad (6.8)$$

где v_1 — некоторая функция от θ (θ — относительный показатель, может быть задан из предыдущих расчетов по экономическим критериям). Очевидно, что

$$q_{ВВ} = v_2(\theta) \frac{\alpha + \beta n^3}{n^2}. \quad (6.9)$$

Так как коэффициент v не зависит от n , следовательно, оптимизация по удельному расходу ВВ (на выброс или на дробление) сводится к оптимизации члена

$$\frac{\alpha + \beta n^3}{n^2} = Z(n). \quad (6.10)$$

Найдем оптимальное значение n . Дифференцируя формулу (6.10), приходим к уравнению

$$\beta n^4 - 2\alpha n = 0. \quad (6.11)$$

Откуда

$$n_1 = 0; \\ n_2 = \sqrt[3]{\frac{2\alpha}{\beta}}. \quad (6.12)$$

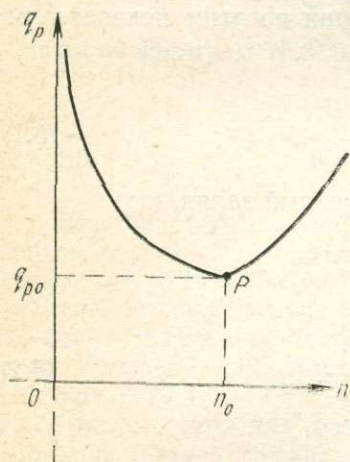


Рис. 22. Зависимость удельного расхода ВВ от показателя действия взрыва.

q_p — удельный расход ВВ, n — показатель действия взрыва, P — оптимальная точка

Решение n_1 означает, что $r=0$, так как $W \neq 0$, это соответствует взрывам на дробление. При взрывах на выброс имеет место n_2 . Подставив в формулу (6.12) значения коэффициентов из формулы Борескова ($\alpha=0,4$ и $\beta=0,6$), получим

$$n_2 = \sqrt[3]{1,333} \approx 1,1.$$

Таким образом, исходя из задач достижения минимального суммарного расхода ВВ или минимальных удельных расходов ВВ, оптимизация процесса проходки канав взрывом может быть осуществлена по значению показателя действия взрыва. Значения этого показателя устанавливаются с учетом характера взрыва и его назначения:

- 1) для взрывов дробления, когда a мало и объем целиков незначителен, $q_p = \text{min}$ при $n \approx 0,7$;
- 2) для взрывов на выброс при произвольном a , зависящем от r , $q_{\text{ВВ}} = \text{min}$ при $n = 1,1$.

Полученный общий результат хорошо сочетается с результатами оптимизации по ΣC .

Задача 7. Многоинтервальная углубка канав взрывом на выброс

В настоящее время этот способ проходки глубоких канав является наиболее распространенным, хотя ряд исследователей отмечают малую экономичность и организационно-технологические недостатки этого способа [9]. В теории взрывных работ до сих пор отсутствуют обоснованные рекомендации по выбору параметров взрыва при многоинтервальной углубке; все расчетные соотношения установлены применительно к условиям одноинтервальной углубки. Рассмотрим вариант двухинтервальной углубки, что соответствует проходке канав глубиной 3 м и более. Оптимизацию процесса выполним по критерию качества $\Sigma Q = \text{min}$, т. е. по минимальному суммарному расходу ВВ. Пояснения к математической постановке задачи приведено на рис. 23.

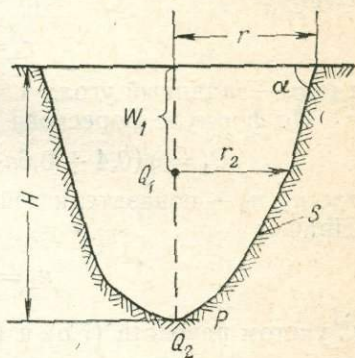


Рис. 23. Схема к постановке задачи по оптимизации многоинтервальной углубки.

Q_1, Q_2 — массы заряда ВВ на первом и втором интервалах; S — сечение канавы, r — радиус воронки.

Пусть задано некоторое сечение S , которое обеспечивается последовательным взрыванием двух зарядов Q_1 и Q_2 , размещаемых соответственно на глубине W_1, W_2 , где $W_2 = H$, т. е. второй заряд размещен в вершине сечения S . Считаем, что радиус воронок выброса, образуемых действием зарядов Q_1 и Q_2 , состав-

ляет r_1 и r_2 . Рассматривается одиночная воронка выброса как элемент расчета; результаты оптимизации процесса действия одиночного заряда затем распространяются на взаимодействующие заряды ВВ и образуемую ими выемку выброса. Считаем приближенно

$$W_2 = H - W_1 \text{ или } H = W_1 + W_2 \quad (7.1)$$

и

$$r_1 = r, \quad (7.2)$$

так как надо получить воронку сечением S и радиусом r . Слои разрушенной породы, оставшейся в воронке после взрыва первого заряда, примерно лежит на глубине W . Задача сводится к определению таких значений Q_1 , Q_2 , W_1 , W_2 , чтобы затраты ВВ на проходку воронки данного сечения S были минимальны. Эта оптимизация эквивалентна оптимизации по удельному расходу ВВ на 1 м^3 выброшенной породы, так как общий объем воронки заранее известен. Приведем решение задачи. Известно, что

$$\frac{r}{r_2} = \frac{H}{W_2}. \quad (7.3)$$

Тогда с учетом (7.1) получим

$$\frac{r}{r_2} = \frac{H}{H - W_1}. \quad (7.4)$$

Откуда

$$r_2 = r - \text{ctg } \alpha \cdot W_1, \quad (7.5)$$

где α — заданный угол.

По формуле Борескова найдем

$$Q_1 = q(0,4 + 0,6n_1^3) W_1^3 \text{ и } Q_2 = q(0,4 + 0,6n_2^3) W_2^3; \quad (7.6)$$

где n_1 , n_2 — показатели действия взрыва.

Причем

$$n_1 = \frac{r}{W_1}; \quad n_2 = \frac{r_2}{W_2}. \quad (7.7)$$

С учетом равенств (7.5) и (7.1) имеем:

$$n_2 = \frac{r - \text{ctg } \alpha W_1}{H - W_1} \quad (7.8)$$

и

$$n_2 = \frac{r}{H}. \quad (7.9)$$

Найдем сумму зарядов ВВ

$$\Sigma Q = Q_1 + Q_2. \quad (7.10)$$

Очевидно, что при подстановке значений n_1 , n_2 из формул (7.7), (7.8), (7.9) в формулы (7.6) имеем все величины постоянными, кроме W_1 . Дифференцируя (7.10) по W_1 и приравнявая

полученное выражение нулю, приходим к уравнению, из которого можно определить оптимальное значение W_1 . Имеем

$$-1,2(H - W_1)^2 + 1,2W_1^2 - 1,8(r - \text{ctg } \alpha \cdot W_1)^2 \text{ctg } \alpha = 0. \quad (7.11)$$

Учитывая (7.1), (7.4) и преобразуя (7.11), получим

$$\frac{W_1}{W_2} = \sqrt{1 + 1,5 \frac{r^3}{H^3}} = \sqrt{1 + 1,5 (\text{ctg } \alpha)^3}. \quad (7.12)$$

Это соотношение между глубинами заложения зарядов можно установить заранее по заданному S . Зная соотношение между W_1 и W_2 , а также параметр H , определим n_1 и n_2 по формулам (7.8) и (7.9). С учетом полученных значений n_1 и n_2 определим соотношение между Q_1 и Q_2 . Имеем, применяя формулы (7.6) — (7.10),

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{1 + 1,5n_1^3}{1 + 1,5\left(\frac{r}{H}\right)^3} \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^3. \quad (7.13)$$

Подставив значение (7.12) в формулу (7.13), получим

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{1 + 1,5\left(\frac{r}{H}\right)^3} (1 + 1,5n_1^3). \quad (7.14)$$

Используя (7.1) и (7.13), находим

$$n_1 = \frac{r}{H} \left[1 + \frac{1}{f(\alpha)} \right], \quad (7.15)$$

где

$$f(\alpha) = \sqrt{1 + 1,5\left(\frac{r}{H}\right)^3}. \quad (7.16)$$

Тогда равенство (7.14) примет вид

$$\frac{Q_1}{Q_2} = f(\alpha) \left[1 + 1,5\left(\frac{r}{H}\right)^3 \left(1 + \frac{1}{f(\alpha)} \right)^3 \right] \quad (7.17)$$

или

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \psi(\alpha). \quad (7.18)$$

Значения функций $f(\alpha)$ и $\psi(\alpha)$ можно затабулировать в виде таблиц. Так, если $\text{ctg } \alpha = 1$, $\alpha = 45^\circ$, то имеем:

$$\frac{W_1}{W_2} = \sqrt{2,5} = 1,6 \quad \text{и} \quad \frac{Q_1}{Q_2} = 1,6 [1 + 1,5 \cdot 4] = 11,2.$$

Отсюда следует, что при $\alpha = 45^\circ$ имеем $Q_1 > Q_2$.

Для варианта, когда $\alpha \rightarrow 90^\circ$, т. е. когда в результате взрыва должна быть образована воронка с вертикальными стенками, имеем:

$$\frac{W_1}{W_2} \rightarrow 1 \quad \text{и} \quad \frac{Q_1}{Q_2} \rightarrow 1.$$

Таким образом, равенство глубин заложения зарядов первого и второго интервалов, а также примерное равенство величин зарядов ВВ при этом, должны быть характерны лишь при образовании взрывом на выброс выработки с вертикальными стенками. Лишь в этом случае будет обеспечен минимальный суммарный расход ВВ. В общем случае (при $\alpha < 90^\circ$) имеем $Q_1 > Q_2$, т. е. основное разрушение производится зарядом Q_1 ; заряд Q_2 используется для разрушения оставшегося объема породы (в контурах S) и выброса ее. Такая дифференциация работы зарядов ВВ позволяет значительно снизить удельный расход ВВ и затраты энергии взрыва на выброс 1 м^3 разрушаемой горной массы. Однако если учесть особенности применения предлагаемой методики на практике, то целесообразнее затабулировать не только функции $f(\alpha)$ и $\psi(\alpha)$, а также функции от α , которые непосредственно ведут к вычислению величин параметров Q_1 , Q_2 , W_1 . Тогда значения Q_1 и Q_2 составят:

$$Q_1 = v_1(\alpha) q W_1^3, \quad (7.19)$$

где

$$v_1(\alpha) = 0,4 + 0,6 (\text{ctg } \alpha)^3 \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + 1,5 (\text{ctg } \alpha)^3}} \right)^3, \quad (7.20)$$

$$Q_2 = v_2(\alpha) \cdot q W_2^3, \quad (7.21)$$

где

$$v_2(\alpha) = 0,4 + 0,6 (\text{ctg } \alpha)^3. \quad (7.22)$$

Соответствующие этим зарядам глубины заложения составят

$$W_1 = H v_3(\alpha), \quad (7.23)$$

где

$$v_3(\alpha) = \frac{1}{1 + \frac{1}{f(\alpha)}} = \frac{\sqrt{1 + 1,5 (\text{ctg } \alpha)^3}}{1 + \sqrt{1 + 1,5 (\text{ctg } \alpha)^3}}. \quad (7.24)$$

$$[W_2 = H [1 - v_3(\alpha)]. \quad (7.25)$$

Следовательно, затабулировав функции $v_1(\alpha)$, $v_2(\alpha)$, $v_3(\alpha)$ в виде таблиц, можно рассчитать оптимальные значения Q_1 , Q_2 , W_1 и запроектировать по указанной методике оптимальную проходку выработок взрывом на выброс многоинтервальным способом. Результаты расчетов можно свести в табл. 18 (форма 3).

Таблица 18

Форма 3

α	v_1	v_2	v_3	f	ψ

Полученные оптимальные значения соответствуют технологии и параметрам, обеспечивающим при многоинтервальной углубке $q_{ВВ} = \min$.

Задача 8. Оптимизация способа проходки

Используя материал предыдущих разделов, можно получить интересные и важные данные по установлению рациональных областей применения энергии взрывчатых веществ при проходке канав, а также по выбору экономически целесообразных способов производства канавных работ. Такая задача является весьма актуальной, особенно с практических позиций.

Нами рассматриваются и сопоставляются ручной способ проходки канав, проходка канав зарядами дробления и зарядами выброса. Известно [11], что с применением этих способов в стране выполняется около 75% всего объема канавных работ. Вопросы разработки экономико-математических моделей стоимости канавных работ при применении землеройной техники посвящены диссертационные работы А. Н. Чохи, М. А. Темес, поэтому нами этот способ не рассматривается.

Используя полученные расчетные соотношения и формулы к задаче 2, можно осуществить сопоставление различных вариантов проходки канав по экономической эффективности (\mathcal{E}_{\max}) и по значению себестоимости $C(a)$. Значения a_0 дают систему отсчета для сопоставления. Такой системой отсчета может служить ручной способ проходки.

Пусть ручной способ проходки представляет систему отсчета ξ_0 , а способ проходки с ВВ характеризуется относительно этой системы некоторыми параметрами ξ_j . При этом полагаем, что ξ_0 и ξ_j существуют в определенных горно-геологических и экономико-географических условиях. С учетом наличия сопоставляемых систем значения a_0 и $C(a_0)$ являются функцией (ξ_0, ξ_j). Тогда $C(a_0) - C_p = \Delta C_j$, где C_p — приведенная стоимость проходки вручную. Допустимые расхождения между системами ξ_0 и ξ_j будет характеризоваться ΔC_j . Сравнивая значения показателя ΔC_j для различных условий, получим возможность установления наиболее экономичного варианта проходки, соответствующего $\Delta C_j = \min$. С использованием этой методики можно установить для различных конкретных участков канавных работ экономически рациональные области применения ручного или взрывного способов проходки.

Полученные условия экономичности ручного способа проходки имеют вид:

$$1) \delta > 0 \text{ или } \frac{\gamma_1 + \gamma_3}{\gamma_2} > 0; \quad (\text{см. 2.37})$$

$$2) a_0 > B_B; \quad (\text{задача 2})$$

$$3) \text{ при } B' > m \text{ имеем } V_B \leq n, \quad (\text{см. 2.5})$$

при $B' < m$ имеем $V_B \geq n$;

$$4) V_B < \frac{C'_n + C'_B}{C'_c - B'C'_y}; \quad (\text{см. 2.3—2.5})$$

$$5) q_{\text{факт}} > q_s, \text{ где } q_s = \frac{\Delta C_p - C_{BB}}{C_{oBBj} + C_{ТВВ}R_j}; \quad (\text{см. 1.5})$$

$$6) \frac{q_s \max j - q_s}{q_s \max j} > k, \quad (\text{см. 1.7})$$

где k — положительное наперед заданное число.

Приведенные неравенства характеризуют экономичность ручного способа проходки с учетом себестоимости основных операций проходческого цикла (п. 1, 2), результата действия взрыва (п. 4), дальности транспортирования ВВ (п. 5) и удельного расхода ВВ на единицу длины канавы заданного сечения S . Значения составляющих параметров и показателей в этих неравенствах приведены в соответствующих задачах и здесь не рассматриваются. Область экономичного применения ручных способов проходки канав может быть определена по данным неравенств п. 5 и 6, учитывающим стоимостные показатели и транспортные издержки на транспортировку ВВ, а также предельный удельный расход ВВ, что характеризует физико-механические свойства среды и применяемую технологию. Граничной областью является условие $q_{\text{факт}} = q_s$. При $q_{\text{факт}} > q_s$ экономичен ручной способ; при $q_{\text{факт}} < q_s$ экономически целесообразнее применение ВМ. Представительным является также неравенство п. 4, включающее объем видимой части выемки и процент грунта, оставшегося в контурах канавы, учитывает единичную стоимость работ на основные операции проходческого цикла, такие как проходка одной зарядной камеры (C'_n), ее зарядание и взрывание (C'_B), включая стоимость ВМ, разрушение целика породы (C'_c) и уборку разрушенной породы (C'_y).

Это неравенство включает две группы показателей: физические (V_B, B') и стоимостные (C'_n, C'_B, C'_c, C'_y). Физические показатели характеризуют эффективность действия зарядов, стоимостные — организацию труда и условия работы. Оптимальный вариант представляет собой синтез разнородных факторов (стоимостных и технологических).

Таким образом, для каждого из участков работ с учетом специфичных его условий можно установить по формулам (2.3) — (2.5) целесообразность проведения канав энергией ВВ. Но важно не только выявить и обосновать экономическую целесообразность использования энергии взрыва при проходке канав, следует также установить целесообразность применения взрывов на выброс или взрывов дробления. Решение приведенных задач позволяет оценить эти области как с технологических позиций, так и по эко-

номической эффективности. Условием экономичности проходки канав взрывом на выброс служит

$$V_v > \frac{C'_n + C'_v}{C'_c - B'C'_y}$$

Степень эффективности применения взрыва на выброс на канавных работах может быть оценена по значению показателей v и θ (см. формулы 2.40, 2.43, 2.51).

Выделим четыре группы по степени экономичности проходки канав взрывом на выброс (табл. 19).

Таблица 19
Степень экономичности проходки канав взрывом на выброс

Группа	Условия проходки канав взрывом на выброс	Пределы значений	
		v	θ
1	Целесообразны	0,1 ÷ 0,5	0,5 ÷ 0,8
2	Весьма целесообразны	0,51 ÷ 0,8	0,3 ÷ 0,49
3	Малозффективны	0 ÷ 0,1	0,81 ÷ 1,0
4	Весьма неэффективны	0,81 ÷ 1,0	0,0 ÷ 0,3

Формально эта группировка способов выполнена по значениям коэффициентов v и θ , но фактически в ее основу заложено деление способов по соотношению объемов переизмельчения и соотношению стоимостей.

Применяя данные табл. 19, можем оценить степень экономичности проходки канав взрывом на выброс по каждому из участков канавных работ. Эту же границу применения взрывов на выброс или взрывов дробления можно установить по технологическому показателю — суммарному расходу $ВВ$ (см. задачу 5). Из формулы (5.11) найдем пределы для отношения $|\alpha/\beta|$, при которых $n_0 \leq 0,7$. Очевидно, что речь может идти об установлении широких пределов для $|\alpha/\beta|$, что характерно при $\theta=1$ (так как при $\theta=0$ имеем $n_0=0$ для любых $|\alpha/\beta|$).

Итак, рассматриваем вариант $\theta=1$, для которого имеем

$$\left| \frac{\alpha}{\beta} \right| = n_0^2 \cdot 3. \quad (8.1)$$

При $n > 0,7$ имеем $|\alpha/\beta| > 1,5$; при $0 \leq n \leq 0,7$ имеем $|\alpha/\beta| \leq 1,5$. Приведенные пределы значений показателя n характеризуют взрыв на выброс ($n > 0,7$) и взрыв дробления ($n < 0,7$). Отсюда следует, что граничной областью для взрывов будут значения отношения $|\alpha/\beta| = 1,5$. Соответственно, взрыв на выброс характеризуется $|\alpha/\beta| > 1,5$ и взрыв дробления $|\alpha/\beta| \leq 1,5$.

С учетом полученных значений можем для данных конкретных условий проходки канав устанавливать технологически рациональные области применения взрывов на выброс и взрывов на дробление. Подчеркнем, что в рассматриваемых условиях техно-

логичность процесса определяется минимальным удельным расходом ВВ. Установив, к примеру, целесообразность проходки взрывом на выброс, можно поставить задачу оптимизации процесса по параметрам, характеризующим начальные условия взрыва и его результат. В частности, можно поставить задачу выбора расчетного сечения канавы, обеспечивающего максимальную экономическую эффективность. В данной постановке задача будет сформулирована так: из всех возможных сечений канав выбрать такое, при котором усредненная экономическая эффективность будет стремиться к максимальному значению. Удовлетворяющее этому условию сечение S рассматривается как оптимальное (S_0). Имеем при $S_{н} \leq S_0 \leq S_{к}$ показатель $\mathcal{E}_{ср} \rightarrow \max$, где $\{S_{н}, S_{к}\}$ — пределы возможного изменения сечения от начального до конечного значения. Алгоритм решения этой задачи представим в виде:

1. Выбрать номинальное значение B' , удовлетворяющее ограничениям

$$1 > B' > \frac{1}{2} \left(1 + \frac{C'_u}{C'_y} \right) \quad (\text{см. 4.8—4.15})$$

или

$$B' < \frac{1}{2} \left(1 + \frac{C'_u}{C'_y} \right), \quad (8.1^*)$$

или

$$\frac{C'_u}{C'_y} > B', \quad \text{где } 0 \leq B' \leq 1. \quad (8.2)$$

2. Найти максимальное V_B , соответствующее остальным ограничениям,

$$V_B = \frac{\pi r_B^3 H}{3}. \quad (8.3)$$

3. Определить параметры канавы (r_B , H , a_0) и \mathcal{E}_{\max} , соответствующие установленным значениям V_B , B' .

Пусть требуется в конкретных условиях пройти канаву сечением

$$1 \leq H \leq 2 \text{ м}, \quad 0 \leq r_B \leq 3 \text{ м}.$$

Значения единичных стоимостных показателей примем

$$C'_n = 0,5; \quad C'_B = 0,2; \quad C'_u = 0,2; \quad C'_y = 0,2.$$

Установим $B' = 0,4$, где $0 < B' < 1$.

Имеем

$$\frac{0,7}{0,2 - B' \cdot 0,2} \geq V_B = \frac{3,333}{1 - B'} \quad \text{или} \quad V_B \approx 5,5 \text{ м}^3.$$

По данным [11]

$$n = \frac{1 - B'}{0,5} + k_B \quad \text{установим } n = 1,4.$$

Далее по значению n , используя формулы автора [11, с. 88—90], определим основные параметры. Так как $H = P + h_p$, где $P = 0,33 W (2n - 1)$, при $n = 1,4$ имеем $h_p / W \approx 0,55$. Получим $H = 0,33 \cdot 1,8 W + 0,55 W = 1,14 W$. При $n = 1,4$ имеем $r = nW = 1,4 W$. Тогда

$$V_v = \frac{\pi r_v^2 H}{3} \approx 1,05 \cdot 2,56 \cdot 1,14 W^3 \approx 5,5 \text{ м}^3.$$

Решая полученное уравнение относительно W , найдем

$$W^3 \approx \frac{5,5}{3} = 1,83.$$

Откуда $W \approx 1,2$ м. Это значение W является в данных условиях оптимальным. В соответствии с этим значением получим оптимальные значения: $H_0 \approx 1,35$ м и $r_{во} \approx 1,9$ м.

Полученные значения параметров выемки выброса и глубины заложения заряда ВВ удовлетворяют установленным ограничениям и дают наиболее эффективный способ проходки канавы энергией взрыва, так как соответствуют минимальной приведенной стоимости.

Задача 9. Последовательность обработки участков канавных работ

Оптимальная последовательность обработки участков канавных работ на поисковой и разведочной стадиях должна обеспечивать получение максимальной геологической информации (I) при наименьших затратах труда и средств, т. е. при большей экономической эффективности. Это условие может быть сформулировано так: обеспечить I_{\max} при \mathcal{E}_{\max} . Для оптимизируемых нами процессов (задачи 1—4) наименьшие затраты соответствуют большим значениям показателя \mathcal{E}_{\max} .

Естественно, что последовательность обработки участков должна быть такой, чтобы обеспечить получение данного объема информации (I) наименьшими объемами физических работ. Наиболее полно этот вопрос рассмотрен в задаче 2. Используя результаты задачи (см. табл. 15), по значениям \mathcal{E}_{\max} можно установить для рассматриваемых условий последовательность обработки канав (по группам). Для наших условий экономически целесообразно проведение канав в следующей очередности: 10, 9, 5, 4, 3 и остальные.

При работах в обусловленной последовательности, если геологическая информация будет обеспечена за счет неполного запроектированного объема проходки канав (например, исключением канав группы 2), то способ достижения требуемого объема I явится оптимальным, так как обеспечит минимальную стоимость единицы информации. Следовательно, при проектировании открытых геологических горных работ рекомендуется проводить расчеты по установлению значений \mathcal{E}_{\max} , а порядок обработки объектов устанавливать по убывающим значениям этого показателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В книге сформулированы основные проблемы оптимизации открытых горноразведочных работ. Показаны роль и значение теории оптимального управления, обоснована необходимость ее применения при решении задач горноразведочного производства. Результаты полученных решений уже сейчас могут быть использованы при проектировании и производстве канавных работ.

Для перехода на оптимизируемое управление горноразведочными работами, в том числе и канавными, на наш взгляд, необходимо решить следующие основные задачи:

1) разработать математический аппарат оптимизации всех процессов и операций проходческих циклов и вспомогательных видов работ;

2) выбрать критерий оптимизации, установить типовые ограничения и на этой основе разработать классификацию типовых задач;

3) создать информационную базу;

4) шире информировать научно-техническую общественность о результатах решения задач по оптимизации горноразведочного производства, а также о результатах внедрения оптимальных способов, параметров, технических средств и показателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болтянский В. Г. Математические методы оптимального управления. М., «Наука», 1969, 307 с.
2. Вагин И. В., Тихонов Н. В. Перспективы механизации и автоматизации проходки подземных горноразведочных выработок в ближайшие годы. — «Разведка и охрана недр», 1973, № 11, с. 20—23.
3. Казбан А. М., Кущев Б. И., Осовский Л. М. Математические методы оптимизации. Воронеж, Изд. Воронежского гос. ун-та, 1972, 80 с.
4. Кудрявцев Л. Д. Математический анализ. М., «Высшая школа», 1973, 614 с.
5. Механический эффект подземного взрыва. Под ред. М. А. Садовского, М., «Недра», 1971, 221 с.
6. Модин А. А. Автоматизированные системы управления. М., «Знание», 1973, 143 с.
7. Петровский И. Г. Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений. М., «Наука», 1970, 279 с.
8. Подлесный С. Н. Скоростная проходка горизонтальных подземных горных выработок. — «Разведка и охрана недр», 1973, № 1, с. 48—51.
9. Прокофьев А. П. Основы поисков и разведки месторождений твердых полезных ископаемых. М., «Недра», 1973, 320 с.
10. Рогов Е. И., Шуруба М. Р. Выбор оптимальной технологии проведения горизонтальных горных выработок. Алма-Ата, «Наука», 1969, 159 с.
11. Смоляницкий А. А. Проходка геологоразведочных канав взрывом. М., «Недра», 1974, 143 с.
12. Трахтенброт Б. А. Алгоритмы и вычислительные автоматы. Ч. 1. М., «Советское радио», 1974, 199 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Общие сведения о теории оптимизации и ЭВМ.	5
Постановка задач теории оптимального управления	5
Алгоритм, алгоритмические языки	9
Оптимизация открытых горноразведочных работ	17
Горноразведочные работы (значение, применение)	17
Обоснование возможности оптимизации горноразведочных работ	20
Решение задач по оптимизации открытых горноразведочных работ	29
Задача 1. Транспортировка ВВ	29
Задача 2. Расстояние между зарядами ВВ	42
Задача 3. Сопоставление шнурового и сосредоточенных зарядов	61
Задача 4. Взаимодействие шнуровых зарядов	65
Задача 5. Оптимизация взаимодействия двух шнуровых зарядов по суммарному расходу ВВ	73
Задача 6. Оптимизация процесса проходки канав сосредоточенными зарядами (по суммарному расходу ВВ)	76
Задача 7. Многоинтервальная углубка канав взрывом на выброс	79
Задача 8. Оптимизация способа проходки	83
Задача 9. Последовательность отработки участков канавных работ	87
Заключение	88
Список литературы	88

ИБ № 260

Александр Абрамович Смоляницкий, Петр Владиленич Попов

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Редактор издательства *В. В. Кузовкин*
 Переплет художника *А. Е. Чучканова*
 Художественный редактор *В. В. Евдокимов*
 Технические редакторы *О. А. Болтунова, О. Ю. Трепенюк*
 Корректор *А. А. Передерникова*

Сдано в набор 21/ХІІ 1976 г. Подписано в печать 15/ІІ 1977 г. Т-00560. Формат 60×90¹/₁₆.
 Бумага № 2. Печ. л. 5,5. Уч.-изд. л. 5,55. Тираж 1250 экз. Заказ 2612/5946-14. Цена 66 коп.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома
 при Государственном комитете Совета Министров СССР
 по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
 109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

2065

НЕДРА