Записки Ленинградского Горного Института, том XIII, вып. 3, 1941
Annales de l'Institut des Mines à Léningrad, vol XIII, liv. 3, 1941

Технико-экономические основы определения границы перехода с открытых работ на подземные

Доц. *П. И. Городецкий*

Technical and economical elements in the determination the boundary of open pit and underground mining (Technischoekonomische Grundlagen der Grenzenbestimmung zwischen Tagebau und Grubenbau)

Docent *P. I. Gorodetsky*

1. Условия, определяющие выбор способа разработки месторождения

При выборе способа разработки месторождения учитываются: 1) естественные условия залегания месторождения и свойства пород, 2) организационно-технические условия, 3) возможность достигнуть тех или иных экономических результатов, 4) ценность руды и потери при разработке.

Зависимость технико-экономических показателей от естественных условий, от организации работ и технической базы — очевидна. Например, стоимость руды из открытых работ зависит от их масштаба и характера механизации, что в свою очередь определяется запасами полезного ископаемого, т. е. границей, до которой открытые работы выгодно продолжать.

В вопросе капиталовложений имеют большое значение такие факторы, как, например, срок существования открытых или подземных работ, от которого зависит техническое вооружение предприятия и масштаб добычи, определяющие в значительной степени стоимость разработки, а следовательно и границу между открытыми и подземными работами.

Изменение стоимости добычи полезного ископаемого при разном положении границы открытых работ происходит за счет ряда обстоятельств, главнейшим из которых является увеличение объема пустых пород на кубометр или тонну добываемого полезного ископаемого, в свою очередь зависящее от глубины разработки при крутом падении или от соотношения между мощностью полезного ископаемого и покрывающих пород при пологом падении. Поэтому коэфициент вскрыши и является обычно основным критерием выгодности открытых работ.

Установление границы открытых работ зависит также от других организационно-технических и естественных условий, например от свойств полезного ископаемого и боковых пород (крепости, трещиноватости, распределения рудного вещества или прослойков), от организации работ, в частности транспорта, от характера применяемых механизмов для добычи, от сроков развития работ, распределения руды по сортам и предъявляемых к ней технических требований, климатических условий, вопросов борьбы с водой, пожарной опасности и т. д.

Большинство факторов технического и организационного характера так или иначе находят известное отражение в стоимости добычи полезного ископаемого, однако влияние некоторых из них трудно учесть заранее, в процессе составления

сметы или калькуляции. К таким факторам относятся, например, климатические условия, влияние сроков развития добычи, влияние числа одновременно работающих уступов, удорожание содержания карьера в безопасном состоянии с глубиной и т. д.

В подтверждение сказанного приведем отдельные примеры из практики. По условиям залегания, при незначительных наносах и большой мощности рудного тела, Кукисвумчоррское апатитовое месторождение в Хибинах выгодно было начать разрабатывать открытым способом (рис. 1). Этому благоприятствовали большая мощность рудной залежи, большое простирание, дававшее возможность широкого фронта работ, и незначительная мощность наносов, прикрывавших выход рудного тела. Обстоятельствами, осложнявшими открытые работы, были: залегание на склоне горы, выше уровня долины на 120—200 *м*, что определяло сложную организацию транспорта руды; падение рудной залежи обратно склону горы, вследствие чего объем вскрыши крепких пород висячего бока быстро возрастает при подвигании границы открытых работ по падению, а также суровые климатические условия заполярья при снеговом покрове в течение 9 месяцев в году и снежной зиме с частыми буранами. [1]

Как показали подсчеты при составлении в 1932 г. технического проекта рудника, разработка открытым способом (при соответствующей механизации) до достижения предельного отношения объема пустых пород к руде на границе открытых работ 2 : 1 должна была давать руду дешевле подземных работ; однако для этого требовались большие капитальные затраты, не освобождавшие от необходимости произвести через известный срок вторичные затраты на подземный рудник, так как из общих запасов открытыми работами могло быть при самых благоприятных условиях взято не более 25—30%. Поэтому открытые работы были оставлены только для первого периода работы рудника, причем предельное отношение пустых пород к руде на границе с подземными работами снизилось до 1 : 1.

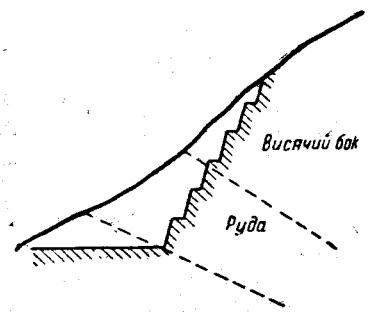


Рис. 1. Схематический разрез карьера апатитового рудника.

Возможность при незначительной глубине от поверхности быстро развить добычу открытыми работами часто является причиной применения открытых работ даже в таких случаях, когда их срок не превышает 2—4 лет. В этом случае обычно вопрос решается не столько экономичностью, сколько организационными соображениями — возможностью параллельно вести добычу и готовить рудник для дальнейшей разработки подземным способом. Кроме приведенного выше примера апатитового рудника, можно указать рудник Темир-Тау в Горной Шории, где для выемки верхней части месторождения была применена система воронок с выдачей руды через проведенные со склона горы штольни.

На многих колчеданных рудниках Урала верхние горизонты вырабатывались открытыми работами даже в тех случаях, когда срок выработки карьера не превосходил 4 лет. Открытым способом здесь снималась обычно покрывающая колчеданное месторождение железная шляпа, часто содержавшая золото, и выщелоченный от меди серный колчедан — сыпучку, выемка которого подземным способом повышает пожарную опасность для рудника; кроме того, при выемке подземным способом неизбежны большие потери.

Встречаются в практике случаи, когда, несмотря на установленную по экономическим соображениям границу открытых работ, последние продолжаются далее этой границы, например, когда подготовка подземного рудника запаздывает и срок открытых работ приходится удлинять во избежание срыва выполнения плана. Этот случай в практике, хотя и возможен, но не должен приниматься

[1] Подробные сведения об открытых работах см. П. Н. Владимиров и Н. С. Морев. Апатитовый рудник им. С. М. Кирова. 1936.

во внимание при расчетах, как зависящий исключительно от плохой организации работ на месте.

Однако продолжение открытых работ при наличии налаженной их организации иногда целесообразно даже при большой вскрыше, например, когда за установленным пределом остается небольшой участок месторождения, разработка которого подземным способом потребовала бы проходки отдельной шахты, следовательно капитальных затрат и освоения подземной системы разработки, или в том случае, когда от этого ставится в зависимость вопрос использования выбранного для открытых работ оборудования.

Таким образом, хотя стоимость разработки является основным критерием выгодности открытых работ, но определенную на этой основе их границу следует считать лишь п е р в ы м п р и б л и ж е н и е м . Для ее уточнения необходимо детально проанализировать каждый конкретный случай, учитывая его технические и организационные особенности, вопрос капиталовложений, сроки развития работ, климатические условия и только после этого принимать окончательное решение.

2. Граница открытых работ и коэфициент вскрыши

Изменение стоимости разработки открытыми работами в зависимости от их границы в основном зависит:

1) от изменения отношения объема пустых пород к объему полезного ископаемого, т. е. коэфициента вскрыши,

2) изменения эксплоатационных расходов по добыче за счет, например, удорожания транспорта с увеличением глубины карьера и увеличения его размеров в плане, удорожания водоотлива, увеличения расходов по содержанию путей, берм и т. д.

Вскрыша для открытых работ имеет то же значение, что подготовительные работы для подземных; затраты на нее учитываются на отдельном счете и погашаются по мере выработки соответствующего подготовленного запаса. Следовательно коэфициент вскрыши характеризует соотношение между объемом подготовительных работ и добычей полезного ископаемого, а потому полная стоимость одной тонны или кубометра полезного ископаемого, добытого открытыми работами, может быть представлена в виде

$$a_0 = a + b \cdot n,$$

где a — стоимость добычи 1 $т$ или 1 $м^3$ полезного ископаемого без учета вскрыши, b — средняя стоимость 1 $м^3$ или 1 $т$ снятой пустой породы, n — коэфициент вскрыши.

Как уже указывалось выше, величины a, b и n — переменны и зависят от границы открытых работ. Зависимость между границей открытых работ и возрастанием коэфициента вскрыши отражает особенности данного месторождения, а потому в каждом конкретном случае определяется на основе топографических и геологоразведочных материалов.

Предельное значение n, при котором еще применим открытый способ разработки, зависит от естественных условий залегания, крепости пород, определяющих применение того или иного метода горных работ и их стоимость, трудности подземной разработки данного месторождения по сравнению с открытым способом, масштабом добычи и т. д.

При многообразии влияющих на величину n факторов в практике горных предприятий коэфициент вскрыши изменяется в весьма широких пределах. Например, на буроугольных рудниках Германии при большом масштабе работ, применении многочерпаковых экскаваторов и эффективной организации транспорта коэфициент вскрыши достигает 4—6; на открытой разработке угля в Соединенных Штатах от 4 до 8, а иногда даже 12 (по объему); у нас в СССР при разработке Керченских бурых железняков фактическое отношение пустых пород к руде около 1,0—1,5, однако экономически предельным можно считать 5—6; на железных рудниках района Месаби в Соединенных Штатах предельным отношением

(взрывные работы) считается 3 : 1; при разработке системой Глори Хол в Аризоне это отношение достигало 4 : 1; для Кукисвумчоррского апатитового рудника в Хибинах в первоначальном техническом проекте оно определялось как предельное 2 : 1 (по объему), но в виду тяжелых климатических и топографических условий, делавших продолжение открытых работ небезопасным, было снижено до 0,8—1,0. При разработке золотоносных россыпей коэфициент вскрыши достигает 10 и более.

Как было сказано выше, возрастание объема вскрыши с углублением открытых работ является главным фактором, определяющим возрастание стоимости полезного ископаемого; однако, если мы обратимся к показателям стоимости добычи без учета вскрыши и стоимости единицы вскрыши, то надо отметить, что они тоже возрастают с увеличением глубины разработки. Закономерность изменения этих показателей стоимости в зависимости от границы открытых работ установить весьма трудно, тем более, что определением границы открытых работ приходится заниматься в начальный период проектирования, когда часто нет достаточного расчетного материала не только для установления этой закономерности, но и для надежного выбора средних значений a и b.

Кроме того, надо иметь в виду, что показатели стоимости, являясь величинами переменными, изменяются в зависимости от положения границы открытых работ прерывно, как это видно из следующих примеров.

Предположим, что решается вопрос о границе открытых работ для крутопадающей мощной рудной залежи. Если глубина карьера большая, то организация и технические средства транспорта за время разработки карьера могут меняться, а именно: на верхних уступах может быть выгодна откатка по рельсовым путям через въездную траншею; по мере углубления работ откатка делается дороже и с известной глубины, возможно, будет заменена наклонным подъемником; наконец, последний по глубине участок перед переходом на подземные работы может быть выработан воронками с перепуском руды по рудоспускам в подземные выработки. Очевидно, изменение организации транспорта вызовет скачкообразное изменение стоимости.

Другой пример. Предположим, разрабатывается пологопадающая пластообразная залежь, причем вскрышные работы производятся экскаватором с перевалкой породы в выработанное пространство. Как известно, максимальная мощность покрывающих пород, которые могут сниматься с перевалкой в выработанное пространство, определяется рабочими размерами экскаватора. Если граница открытых работ определена так, что на части рабочей площади мощность покрывающих пород больше той, которая может быть снята и перемещена в отвал непосредственно экскаватором, то в этом участке пустую породу придется частично вывозить из карьера. Очевидно, что стоимость вскрыши при этом изменится скачкообразно, как только появятся расходы по транспорту породы из карьера.

Принимая при предварительном определении границы открытых работ те или иные стоимостные показатели, мы не можем еще достаточно детально предвидеть организационную схему открытых работ, которая сама зависит от их установленной границы, а поэтому мы не можем быть уверены в том, что эти стоимостные данные будут достаточно точно отвечать конкретным условиям данного случая.

После же предварительного определения границы открытых работ стоимостные показатели могут быть уточнены и положены в основу окончательного определения границы открытых работ с учетом не только экономических, но и организационно-технических соображений.

Поэтому рекомендуется вести расчет в две стадии: 1) сначала определить предварительную границу открытых работ, пользуясь приближенными стоимостными показателями, а затем 2) в условиях предварительно установленной границы открытых работ выяснить организационно-технические условия их производства и путем укрупненного сметного подсчета получить стоимостные показатели, ближе отвечающие данному случаю, которые и положить в основу окончательного определения границ карьера.

Следует отметить, что неточность абсолютной величины принимаемых стоимостных показателей может быть большей, чем изменения их величины в зависимости

от изменения границы карьера; поэтому в известных пределах границы открытых работ можно принимать стоимостные показатели для упрощения предварительных расчетов постоянными.

Обычным в практике проектирования горных предприятий и лежащим в основе большинства известных в литературе расчетных формул принципом определения границы открытых работ является условие, чтобы стоимость полезного ископаемого из открытых работ была равна или меньше стоимости его добычи подземными работами, т. е.

$$a_0 = a + b \cdot n \leq c, \tag{1}$$

где c — стоимость добычи полезного ископаемого подземными работами.

Отсюда следующая зависимость между коэфициентом вскрыши и стоимостными показателями:

$$n \leq \frac{c-a}{b}. \tag{2}$$

По отношению к определяемой из этого условия величине n в литературе и на практике известно два толкования, а именно: 1) определенное из условия (2) отношение объема вскрыши к объему или тоннажу полезного ископаемого при-

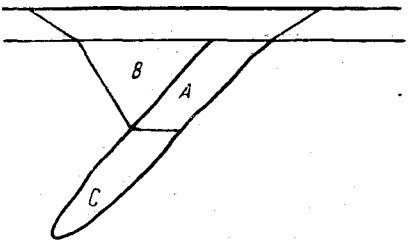


Рис. 2. Схема к формулам (2) и (9).

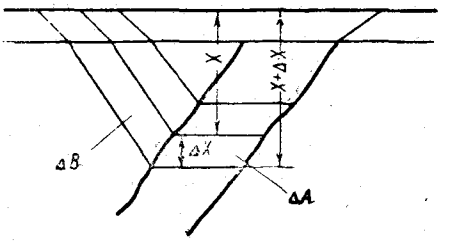


Рис. 3. Схема к формулам (2) и (12).

нимается как среднее для всего карьера, т. е. $n = \frac{B}{A}$ (рис. 2), или же 2) это значение коэфициента вскрыши принимается лишь для границы открытых работ с подземными $n = \frac{\Delta B}{\Delta A}$ (рис. 3).

Если $n = \frac{B}{A}$ представляет средний коэфициент вскрыши для всего карьера и определено из условия (2) равенства стоимости добычи полезного ископаемого открытыми и подземными работами, то это означает, что при определенной таким образом границе открытых работ последние потребуют в среднем тех же эксплоатационных расходов, какие были бы, если бы разработка месторождения велась только подземным способом. Так как в этом случае отношение объема пустых пород к запасу полезного ископаемого в отдельных участках карьера ниже, в других выше среднего, то стоимость добычи открытыми работами в одних участках ниже стоимости добычи подземным способом, в других — дороже подземного; следовательно возникнет вопрос об исключении последних участков из границ открытых работ, если их разработка подземным способом обойдется дешевле.

Поэтому толкование коэфициента вскрыши, определенного из условия $n = \frac{c-a}{b}$, как среднего для всего объема открытых работ — следует признать в общем случае неправильным и не отвечающим основному принципу — вести разработку с наименьшими производственными затратами. Однако могут быть отдельные частные случаи, когда при определении границы открытых работ приходится несколько отступать от этого условия под давлением других обстоятельств, а иногда продолжать открытые работы даже при возрастании $n_{ср} > \frac{c-a}{b}$; такие случаи будут рассмотрены ниже.

Если $n = \frac{\Delta B}{\Delta A}$ (по рис. 3) представляет отношение пустых пород к полезному ископаемому на границе с подземными работами, то очевидно, что средний коэфициент вскрыши для всего карьера будет меньше указанного предельного, а потому средняя стоимость одной тонны полезного ископаемого, добытого открытыми работами, будет ниже стоимости подземных работ; поэтому толкование выражения (2), как дающего значение экономически предельного коэфициента вскрыши на границе открытых работ, а не для карьера в среднем, более правильно.

Необходимо отметить, что, применяя весьма обычный при определении границы открытых работ прием, т. е. разбивая пласт или рудную залежь в разрезе на ряд слоев и определяя для каждого слоя коэфициент вскрыши (рис. 3), получаем постепенное возрастание объема вскрыши по слоям с глубиной; однако отсюда нельзя делать вывод, что такова же будет последовательность изменения объема вскрышных работ по календарным срокам, т. е. что объем вскрыши будет наибольшим в последние годы существования карьера. Распределение объема вскрыши по годам может быть совершенно иным и даже желательно, чтобы оно было иным, а именно — возможно более равномерным в течение всего срока открытых работ, так как этим достигаются лучшие условия использования оборудования и избегаются организационные трудности одновременного производства вскрыши на многих уступах.

Более того, весьма часто вскрышные работы опережают добычу и к концу разработки карьера даже уменьшаются. Как пример можно привести открытые работы апатитового рудника им. С. М. Кирова в Хибинах, где это определялось условиями залегания и стремлением к последовательной отработке уступов сверху вниз; такое же положение будет на Коунраде.

При разработке пологопадающих месторождений стремятся начинать разработку с участка, где коэфициент вскрыши меньше, чтобы сократить срок развития работ и объем первоначальной вскрыши; однако по условиям рельефа, требованиям водоотлива и т. д. это не всегда удается, а потому отношение объема пустых пород к добытому полезному ископаемому и в этом случае может не быть наибольшим в последние годы разработки.

Нетрудно доказать, что календарное изменение коэфициента вскрыши не имеет отношения к определению экономически целесообразной границы открытых работ. Последняя находится в определенной зависимости от вполне конкретных в каждом случае условий залегания и стоимостных показателей, в то время как календарный план разработки может быть при тех же исходных данных построен различно.

3. Краткий обзор наиболее известных работ по методике определания границы разработки открытым способом

Техника нахождения границы открытых работ обычно заключается в составлении ряда вариантов и графическом подборе на планах и разрезах границы карьера, удовлетворяющей условию их выгодности; однако существует ряд работ, имеющих целью дать аналитический метод определения экономически выгодной границы разработки открытым способом. Из них наиболее разработаны и пользуются известностью аналитические расчеты проф. А. И. Стешенко и проф. И. А. Кузнецова. На этих расчетах мы несколько остановимся.

Первая статья проф. А. И. Стешенко по данному вопросу была напечатана в журнале Уголь и Железо № 25 за 1927 г., затем последовал еще ряд статей в разных журналах. Наиболее полное изложение расчетов проф. А. И. Стешенко приведено в его книге — Курс систем разработок рудных месторождений, изд. 1930 г.

Работы проф. Стешенко были подробно разобраны горн. инж. А. В. Фадеевым в его «Критике аналитических работ о предельно выгодной глубине открытых разработок проф. Стешенко и Кузнецова», доложенной им на заседании Ленинградского отделения Горного НИТО в 1939 г. Основные выводы инж. Фадеева по существу правильны и, с разрешения автора, будут учтены ниже, при кратком изложении формул проф. Стешенко.

В основе выводов проф. А. И. Стешенко лежит тот же изложенный выше принцип определения границы открытых работ сравнением стоимости добычи одной тонны или кубометра руды открытым и подземным способом. Всего А. И. Стешенко дает 5 формул, причем указывает следующее:

«*При выводе формул «А» и «В» исходной точкой зрения была средняя стоимость единицы* объема руды за все время существования карьера.

Существует и другая точка зрения, — это стоимость руды, добытой из самого последнего горизонта, каковая является максимальной для экономически выгодной глубины карьера, близкой или равной стоимости руды, добытой из подземных работ под карьером, причем этот горизонт по экономическим соображениям можно рассматривать как последний.

Формула «*С*» соответствует последней точке зрения.

Для более быстрых подсчетов приводится и формула «*D*», дающая приблизительные результаты».

В другом месте у проф. А. И. Стешенко указано:

«Выше, при выводе формул для определения глубины карьеров, не принято во внимание вскрытие боковых пород и наносов на концах залежи для придания должного откоса концевым частям карьера, что при больших простираниях месторождения большой ошибки не дает. Однако при малых простираниях значение означенной вскрыши будет велико, почему ее необходимо учитывать путем дополнительного введения в формулу соответствующих объемов, с каковой целью ниже и выведена формула «*Е*», являющаяся продолжением формулы «*С*».

Все 5 формул выведены, исходя из предпосылок, что стоимостные показатели для руды из открытых и подземных работ и для вскрыши постоянны, поверхность горизонтальна, а рудная залежь имеет форму правильной плиты, т. е. имеет постоянную мощность и постоянный угол падения.

При выводе формулы «*А*» рассматривается вопрос об экономической целесообразности дальнейшей углубки карьера, уже выработанного до глубины m, причем возможная величина дальнейшей углубки x определяется из условия приравнивания средней стоимости одной тонны руды, добытой на участке x из открытых работ, стоимости добычи подземным способом. Это частный случай и в дальнейшем мы на формуле «*А*» останавливаться не будем.

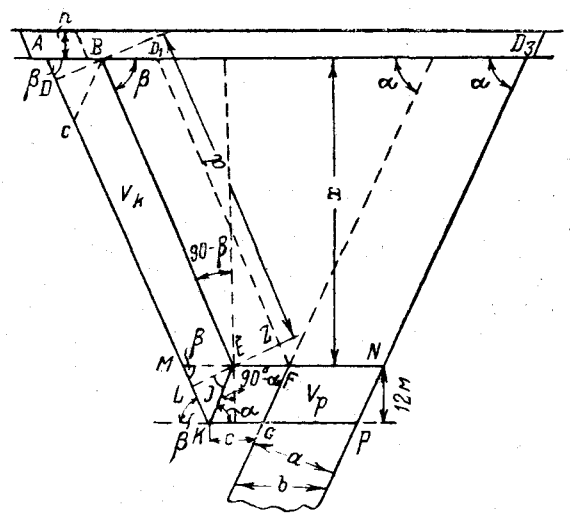


Рис. 4. Схема к формуле «С» проф. А. И. Стешенко.

Формула «*В*» имеет целью дать аналитическое выражение для глубины открытых работ по условию равенства средней стоимости руды, добытой из открытых работ за весь срок существования карьера, стоимости ее добычи подземным способом, т. е. дает не выгодную глубину открытых работ, а такую глубину, при которой открытые работы не дадут убытка по сравнению с разработкой месторождения исключительно подземными работами.

Как было указано выше, такой подход к определению границы открытых работ не отвечает основной задаче технико-экономического расчета — определить искомую величину из условия максимальной выгодности данного варианта разработки и, если может быть применим, то лишь в отдельных частных случаях.

Формула «*С*» выведена из условия определения границы открытых работ, приравнивая стоимость единицы добычи из открытых работ к стоимости подземной разработки не для карьера в среднем (как в формуле «*В*»), а на последнем уступе, как показано на рис. 4 (буквенные обозначения по Стешенко).

Согласно выводу проф. Стешенко, объем боковых пород $V_н$, который нужно вскрыть для получения объема руды $V_р$, равен:

$$12C + Cx + \overline{ME} \cdot x + \text{пл.}\triangle MEK, \tag{3}$$

где C — ширина бермы между рудным и вскрышным уступом, x — глубина карьера, за вычетом последнего уступа, 12 — высота уступа в *м*.

Запас руды последнего уступа равен (по Стешенко):

$$3{,}6\,\frac{12 \cdot a}{\sin \alpha},$$

где 3,6 — объемный вес руды.

Обозначая B—стоимость 1 $м^3$ наносов, Q — стоимость 1$м^3$ вскрыши боковых пород, q—стоимость 1 $т$ руды из открытых работ без вскрыши, складывая стоимость вскрыши на тонну руды со стоимостью добычи руды и приравнивая полученную величину полной стоимости одной тонны руды при подземной разработке—A, проф. Стешенко дает формулу «C»:

$$\frac{Q\left[\frac{12\,x \cdot \cos(\alpha+\beta-90°)}{\sin\alpha \cdot \sin\beta} + Cx + \frac{72\cos(\alpha+\beta-90°)}{\sin\alpha\cdot\sin\beta} + 12\,C\right] + \frac{12\,Bh\cdot\cos(\alpha+\beta-90°)}{\sin\alpha\cdot\sin\beta}}{3{,}6\left(\frac{12\cdot a}{\sin\alpha}\right)} + q = A,$$

В окончательном виде эта формула дана в курсе проф. Стешенко так:

$$\frac{Q\left[\frac{12\,x\cdot\cos(\alpha+\beta-90°)}{\sin\beta} + Cx\cdot\sin\alpha + \frac{72\cos(\alpha+\beta-90°)}{\sin\beta} + 12\,C\cdot\sin\alpha\right] + \frac{12\,Bh\cdot\cos(\alpha+\beta-90°)}{\sin\beta}}{43{,}2\cdot a} + q = A. \tag{5}$$

причем искомая глубина карьера, по А. И. Стешенко, будет равна $x + 12$ *м*.

Данная формула имеет два существенные внешние недостатка, а именно: во-первых, она имеет необычный вид вследствие незаконченных алгебраических и тригонометрических преобразований, хотя представляет всего лишь уравнение первой степени, во-вторых, введение числовых значений для высоты уступа и объемного веса лишают формулу общего вида и, чтобы ею воспользоваться для других значений высоты уступа и объемного веса руды, нужно по существу повторить вывод, начиная с исходных выражений.

В отношении правильности структуры этой формулы сообщим вывод, изложенный в указанной выше работе инж. Фаддеева.

При углублении работ в карьере (рис. 4) для того, чтобы выработать запас руды $V_р$, нужно вскрыть

$$\text{пл.}\,ABEM + \text{пл.}\,MEK + \text{пл.}\,KEFG, \tag{6}$$

но проф. Стешенко учитывает, согласно (4), еще пл. BD_1FE, равную $C \cdot x$, в то время как легко заметить, что пл. BD_1FE должна быть уже снята, чтобы выработать предыдущий уступ, так как, если имеется надобность оставлять берму размером C на данном уступе, то она должна быть предусмотрена и в том случае, когда граница открытых работ переносится на уступ выше.

Таким образом, пл. $BD_1FE = C \cdot x$ не должна входить в приращение объема вскрыши с углублением карьера на один уступ, следовательно в предложенной проф. Стешенко формуле «C» член $C \cdot x$ в скобках в выражении (4) должен быть исключен, соответственно чему должен быть изменен и конечный вид формулы.

С этим заключением необходимо согласиться, но кроме того отметим, что при большой глубине карьера угол β должен представлять не откос уступа, а средний угол откоса борта карьера, так как последний придется разбить на несколько уступов и иметь промежуточные бермы, а не одну берму C. Если понимать величину угла β как среднего угла откоса карьера с учетом берм, то во многих случаях надобность учитывать берму C отпадает, следовательно при $C = 0$ формула упростится.

Следующая предложенная проф. Стешенко формула «*D*» представляет частный случай, когда месторождение выходит непосредственно на поверхность и, хотя она выведена несколько иначе, но представляет частный случай формулы «*C*» при h и C равных 0.

Все четыре формулы «*A*», «*B*», «*C*» и «*D*» решают задачу определения глубины открытых работ для поперечного разреза месторождения, не учитывая дополнительной вскрыши для образования безопасного угла откоса в торцевых его частях (рис. 5).

По проф. Стешенко, с углублением карьера на один уступ, кроме приращения объема вскрыши со стороны висячего бока добавляется дополнительная вскрыша в концах карьера, заштрихованная на рис. 5; распределяя эту дополнительную вскрышу на весь запас вскрываемой в уступе руды, получаем некоторое увеличение объема вскрыши на тонну руды против учитывавшегося ранее.

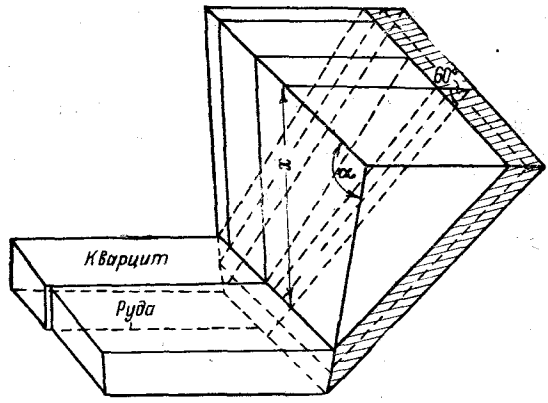


Рис. 5. Схема к формуле «*E*» проф. А. И. Стешенко.

Таким образом, приравнивая теперь полную стоимость тонны руды из открытых работ, с учетом дополнительной вскрыши, к стоимости добычи подземными работами, проф. Стешенко получает формулу «*E*», из которой определяется глубина открытых работ x_2 (рис. 6), меньшая, чем глубина x_1, определяемая без учета дополнительной вскрыши в торцах карьера.

Однако, еще у проф. Кузнецова в его работе «Основные расчеты при разработке рудных месторождений» (ч. II, стр. 46) имеется указание на то, что с целью уменьшения объема вскрыши можно в торцах карьера оставлять треугольники руды (рис. 6); последнее отмечается также и в работе А. В. Фаддеева. Кроме того, глубина карьера вовсе не должна быть одинаковой на всем простирании.

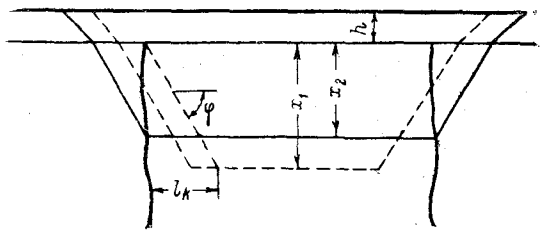


Рис. 6. Глубина открытых работ в разрезе по простиранию.

На практике весьма часто делают карьер ступенчатым, более глубоким в центральной части и уменьшенной глубины в концах; также весьма часто оставляют в концах залежи треугольники руды.

Кроме того, формула «*E*» выведена в предположении формы карьера, изображенной на рис. 7, тогда как практически он чаще всего имеет форму, подобную рис. 8.

Обычно мощность рудного тела в центральной части больше, а в концах залежи уменьшается, следовательно в разных поперечных разрезах получится разная предельная глубина; в формуле же «*E*» исходным условием является равномерная мощность как по простиранию, так и по падению, поэтому она не точна, а определить более или менее точно дополнительный объем вскрыши в торцах карьера возможно только после графического его построения.

Из рис. 6 следует, что размер участков, на которые распространяется влияние дополнительных объемов вскрыши в торцах карьера, определяется из условия

$$l_к = x_1 \cdot \operatorname{ctg} \varphi,$$

где x_1 — глубина карьера, определенная для центральной части карьера без учета дополнительной вскрыши, а φ — средний угол откоса карьера в торцах.

Если общая длина карьера

$$L > 2 \cdot l_к,$$

то для центральной части карьера может приниматься глубина без учета влияния дополнительной вскрыши.

Работы проф. И. А. Кузнецова представляют продолжение работ проф. А. И. Стешенко. Первая статья И. А. Кузнецовым была напечатана в Горном Журнале № 12, за 1930 г.; этому же вопросу посвящена почти вся вторая часть его книги— Основные расчеты при разработке рудных месторождений, изд. 1932 г. Кроме того, имеется еще несколько журнальных статей, часть которых носит полемический характер и в научно-техническом отношении интереса не представляет.

В основе всех расчетов проф. Кузнецова лежит то же условие:

$$a_0 + \lambda \cdot a_к \leqslant q,$$

где приняты буквенные обозначения по Кузнецову: a_0 — стоимость добычи $1 м^3$ руды открытыми работами без расходов на вскрышу; $a_к$ — стоимость $1 м^3$ вскрыши пустых пород; q — стоимость 1 $м^3$ руды из подземных работ; λ — коэфициент вскрыши.



Рис. 7. Идеализированная форма карьера в плане.



Рис. 8. Фактическая форма карьера.

Граница открытых работ во всех рассматриваемых проф. Кузнецовым случаях определяется из условия равенства стоимости открытых и подземных работ для предельного уступа, причем выражается это следующим образом:

$$a_0 + \lambda \cdot a_к - q = 0.$$

Как и у проф. Стешенко, принимаются идеальные условия залегания месторождения: поверхность горизонтальна, мощность наносов постоянна, рудная залежь принимается в виде правильной плиты с постоянными углом падения и мощностью, при одинаковой длине по простиранию на всех горизонтах.

При этом рассматриваются 3 случая угла падения и для каждого из них выводятся свои формулы. В книге И. А. Кузнецова (Основные расчеты при разработке рудных месторождений, ч. II) рассмотрению этих трех случаев, с длинными алгебраическими выкладками, отведено 110 страниц; разбирать работу Кузнецова подробно здесь нет возможности, а поэтому мы ограничимся рассмотрением лишь некоторых принципиальных установок и положений.

Разделение на 3 случая произведено по следующему принципу:

1) месторождения горизонтальные;

2) месторождения с углом падения > угла откоса карьера (вскрыша висячего и лежачего бока);

3) месторождения с углом падения < угла откоса карьера (вскрытие только висячего бока).

Для каждого из этих случаев выводятся отдельные формулы.

Начиная с того, на чем остановился проф. Стешенко, И. А. Кузнецов в своей работе предлагает формулы для решения задачи в плоскости поперечного сечения и объемно, т. е. с учетом дополнительной вскрыши в концах залежи, как это учтено у А. И. Стешенко в формуле «E».

Кроме того, проф. Кузнецов учитывает:

1) первоначальный объем вскрыши V (рис. 9 и 10), распределяя его на весь запас руды в карьере, следовательно в известной доле и на последний уступ, для которого стоимость открытых работ приравнивается стоимости подземных;

2) дополнительный объем руды V_0'' на дне карьера, который, по Кузнецову, может быть взят без дополнительных затрат на вскрышу, а потому причисляется к запасу руды предельного уступа;

3) стоимость добычи руды из открытых работ и вскрыши принимается зависящей от глубины карьера линейно, например:

$$a_0 = a_0' + k_0 \cdot x,$$

где a_0 — стоимость руды на предельном по глубине уступе, a_0' — стоимость руды на первом уступе, k_0 — коэфициент удорожания с глубиной, x — искомая глубина.

Для иллюстрации метода Кузнецова приведем порядок вывода одной из его формул (там же стр. 30—36).

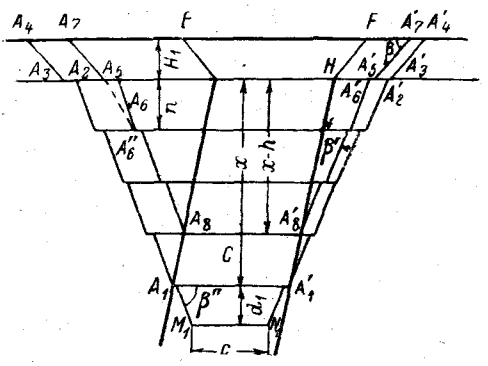


Рис. 9. Разрез по простиранию к формулам проф. И. А. Кузнецова.

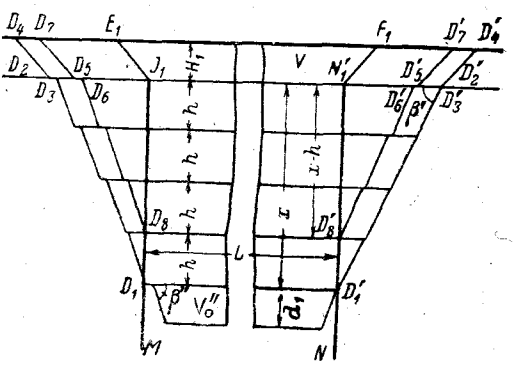


Рис. 10. Разрез вкрест простирания к формулам проф. И. А. Кузнецова.

Общее уравнение предельной глубины карьера берется в следующем виде:

$$\frac{V_n \cdot a_n + W_b \cdot a_k}{V_0} + a_0 - q = 0, \qquad (7)$$

где V_n — объем наносов, приходящийся на предельный горизонт; a_n — стоимость вскрыши 1 $м^3$ наносов; W_b — объем вскрыши боковых пород, приходящийся на предельный горизонт; a_k — стоимость вскрыши 1 $м^3$ боковых пород, причем $a_k = a_k' + k_k \cdot x$;

V_0 — объем руды последнего уступа, включая дополнительный объем на дне карьера, отнесенный ко всему запасу; a_0 — стоимость добычи руды из открытых работ на последнем уступе без учета вскрыши, причем $a_0 = a_0' + k_0 \cdot x$; q — стоимость руды из подземных работ.

При этом V_n слагается из объема первоначальной вскрыши наносов V, отнесенного к общему запасу руды в карьере, и объема наносов, приходящегося на данный уступ и определяемого как разность объемов клина $D_4D_4'D_3'D_3$ (рис. 9), $A_4A_4'A_3'A_3$ (рис. 10) и клина $D_7D_7'D_5'D_5$ (рис. 9), $A_7A_7'A_5'A_5$ (рис. 10).

Объем вскрыши боковых пород W_b также вычисляется как разность объемов двух клиньев. Объем руды представляется как сумма двух объемов:

$$V_0 = V_0' + \frac{V_0'' \cdot h}{x},$$

где V_0'' — дополнительный объем руды на дне карьера.

Выражая объемы в формуле (7) на основании рис. 9 и 10, как функцию искомой глубины x, и подставляя в эту формулу полученные выражения, а также заменяя a_0 и a_k выражениями их как линейной функции от глубины карьера, проф. Кузнецов получает следующее уравнение:

$$\left(\frac{C_1}{x} + C_2 \cdot x + C_3\right) \cdot a_n + (C_4x^2 + C_5x + C_6)(a_k' + k_k \cdot x) + \left(V_0' + \frac{V_0'' \cdot h}{x}\right)(a_0' + k_0 \cdot x - q) = 0, \qquad (8)$$

где C_1, C_2, C_3 и т. д. — представляют ряд постоянных величин более или менее сложного алгебраического вида.

Приводя это уравнение к нормальному виду, получается следующая окончательная формула Кузнецова:

$$C_4 \cdot k_к \cdot x^4 + (C_4 \cdot a'_к + C_5 \cdot k_к) x^3 + (C_2 \cdot a_п + C_5 \cdot a'_к + C_6 \cdot k_к + k_0 \cdot V'_0) x^2 + \\ + (C_3 \cdot a_п + C_6 \cdot a'_к + a'_0 \cdot V'_0 - q \cdot V'_0 + k_0 \cdot V''_0 \cdot h) x + \\ + C_1 \cdot a_п + a'_0 \cdot V''_0 \cdot h - q \cdot V''_0 \cdot h = 0.$$

Для того чтобы воспользоваться формулой Кузнецова, надо проделать большую вычислительную работу и знать не только геометрические элементы месторождения и стоимость открытых и подземных работ, но и коэфициенты удорожания открытых работ с глубиной.

Как было указано выше, замена формы конкретного месторождения, для которого определяется граница открытых работ, идеальной формой уже содержит в себе какое-то приближение.

Для рудных месторождений особенно характерна неравномерная мощность и выклинивание к концам залежи, вследствие чего ошибка от замены конкретных величин мощности и падения залежи в разных участках средними значениями (с целью приведения к форме правильной плиты, для которой выведены разбираемые формулы), может быть весьма значительной, в соответствии с чем может быть весьма значительной и ошибка в определении границы открытых работ.

Это обстоятельство, а также отсутствие критерия для учета размера ошибки, является одной из причин недоверчивого отношения, которое наблюдается к данным формулам. Второй причиной является сложность формул проф. Кузнецова, которые представляют уравнения 4-й степени (у Стешенко формулы «*C*» и «*D*» — первой степени, а «*E*» — второй степени).

Повышение степени уравнений произошло по причинам:

1) распределения на весь объем карьера дополнительной вскрыши в его торцевых частях (как в формуле «*E*» проф. Стешенко);

2) учета в формулах Кузнецова объема первоначальной вскрыши V (рис. 9 и 10) и дополнительного объема руды на дне карьера (распределением на весь запас);

3) принятия закономерности удорожания руды и вскрыши с глубиной как линейной функции глубины карьера.

Что касается последнего, то линейная закономерность удорожания работ в зависимости от глубины принята проф. Кузнецовым совершенно произвольно, без всякого обоснования, хотя в отношении допустимости такой зависимости имеются серьезные сомнения, вытекающие из изложенного выше (стр. 8).

Если даже допустить, как приближенную, принимаемую проф. Кузнецовым зависимость вида

$$a = a_1 + k \cdot x,$$

то возникает вопрос об определяющих эту зависимость величинах a_1 и k, где (по Кузнецову) a_1 — стоимость добычи руды или вскрыши на первом уступе от поверхности, а k — коэфициент удорожания стоимости с глубиной.

Известно, что увеличение стоимостных показателей с глубиной определяется главным образом организацией работ и выбором средств транспорта, что можно обоснованно выявить только тогда, когда предварительное определение границ открытых работ сделано; в то же время формулы Кузнецова, как выведенные для геометрически идеальных условий залегания, пригодны лишь для предварительного определения границы открытых работ.

Отсюда следует, что условное принятие проф. Кузнецовым линейной закономерности увеличения стоимости с глубиной, к тому же при невозможности обоснованного определения параметров, характеризующих эту зависимость (a_1 и k) без выявления границы и организации открытых работ, приводит только к усложнению формул без всякой практической пользы.

В то же время проф. Кузнецов, принимая стоимость открытых работ и вскрыши с глубиной переменной, почему-то считает возможным принимать стоимость подземных работ независящей от глубины.

Так как формулы, основанные на принятии теоретической формы месторождения, могут служить только для предварительного определения границы открытых работ, то нет никакой надобности их усложнять дополнительными условиями, которые к тому же трудно учесть в этой фазе решения данной задачи.

Как было указано выше, формулы проф. Кузнецова, по мнению их автора, уточнены против формул проф. Стешенко, так как проф. Кузнецов учитывает объем первоначальной вскрыши породы, покрывающей выход залежи на поверхность, и дополнительный объем руды на дне карьера. Посмотрим, в какой степени такое уточнение оправдывается.

Учет дополнительного объема руды на дне карьера, который (по выражению Кузнецова) может быть взят без производства дополнительной вскрыши боковых пород, основан на недоразумении, так как, если мы предположим, что граница открытых работ принята уступом выше, то и в этом случае может быть взят на дне карьера такой же объем руды (рис. 11) и также без дополнительной вскрыши. Обратим внимание, что заштрихованные на чертеже площади равны. Дополнительный объем руды может быть взят на каждом уступе, а так как при определении границы карьера стоимость добычи руды из открытых работ приравнивается стоимости ее из подземных работ для последнего слоя, а не для всего карьера, то учитывать в формуле Кузнецова дополнительный объем руды на дне карьера неправильно. Более подробно это доказано инж. А. В. Фаддеевым в его работе, на которую выше мы уже ссылались; здесь же считаем достаточным ограничиться изложенным.

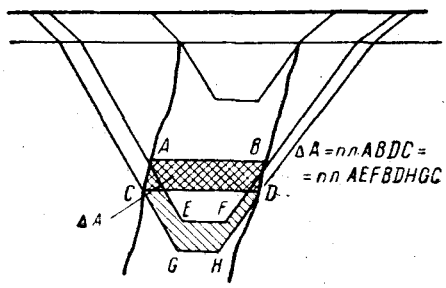


Рис. 11. К вопросу об учете дополнительного объема руды на дне карьера.

Что касается учета в формуле Кузнецова первоначальной вскрыши над выходом залежи, то она, как будет показано ниже, имеет влияние только на абсолютную сумму расходов на вскрышу, следовательно на абсолютную сумму экономии в расходах, которые дают открытые работы по сравнению с подземными, не влияя на положение границы открытых работ.

Мы разобрали только одну формулу Кузнецова; для остальных случаев исходные установки те же; следовательно и другие формулы имеют такие же недостатки, как разобранная, что лишает возможности пользоваться ими для практических целей.

Из других работ, посвященных решению задачи определения границы открытых работ, можно указать статьи М. Гоберман, Пилявского и А. Штединг (Инж. раб. № 4, 1927; № 9, 1928; Горн. Журн. № 4, 1933). В первой статье рассматривается один из частных случаев, причем получается формула, подобная формуле «*C*» проф. Стешенко; вторая статья делает попытку исправить формулу для определения границы открытых работ за счет учета вскрыши в концах рудной залежи; выводы сложны и по существу приводят к таким же условностям, как и формула «*E*» проф. Стешенко.

Статья инж. А. Штединг опубликована позднее и заслуживает известного внимания, так как автор совершенно правильно задается целью получить простую формулу, учитывающую только главнейшие условия и пригодную для быстрого производства предварительных подсчетов. Автор приходит к простым и довольно верным формулам для рассмотренных им случаев; однако в упрощении их он пошел дальше чем это следовало, исключив совершенно влияние наносов.

Общим почти для всех рассмотренных работ, в частности и работ проф. Стешенко и проф. Кузнецова, является то, что в них размер слоя, пограничного с подземными работами, принимается равным высоте уступа; таким образом, глубина

карьера должна получаться обязательно кратной высоте уступа. В этом имеется известная нелогичность, так как нет никаких препятствий для того, чтобы принять последний уступ любой (допустимой, конечно, Правилами безопасности) высоты, иначе говоря, принять границу открытых работ на любой отметке.

Второй общей чертой является то, что все приведенные выше формулы выведены для правильных формы и условий залегания месторождения, тогда как на практике приходится иметь дело с месторождениями, в большей или меньшей мере отличающимися изменчивыми элементами залегания. В этом отношении более надежны формулы, определяющие границу открытых работ в поперечном разрезе, так как, если определять ее отдельно для каждого разреза, то значительно сократятся пределы возможной ошибки.

4. Основные положения к вопросу определения оптимальной границы открытых работ методом автора

Для того чтобы метод решения данной задачи был жизненным и мог рассчитывать на практическое применение, он должен быть достаточно прост и пригоден в широких пределах изменения форм и условий залегания месторождений. Аналитический метод должен основываться на действительном анализе практического содержания задачи, иначе применение математики приведет к абстракции — отходу от действительности. Примером этого являются формулы проф. Кузнецова, который, задавшись идеальной формой месторождения и не проанализировав, какое реальное отражение имеют его математические выводы и введенные им уточнения, пришел к указанным выше ошибкам.

Правильное применение математического метода облегчает решение задачи; математические же (алгебраические) упражнения, не основанные на осторожном анализе принимаемых допущений, могут привести к абсурду.

В отношении проверки аналитических расчетов и их интерпретации лучшим средством нужно признать графическое изображение устанавливаемых зависимостей, что дает, во-первых, наглядность, позволяющую значительно легче заметить возможную ошибку, во-вторых — графическое построение применимо для любых форм месторождения, тогда как чисто аналитический метод пригоден только для форм геометрически правильных.

Прежде чем приступить к изложению предлагаемого решения данной задачи, необходимо уяснить математический ее смысл.

Одной из основных целей работы горного предприятия является борьба за наибольшую рентабельность; иначе говоря, необходимо вести разработку таким способом, чтобы суммарные эксплоатационные расходы на выработку запаса полезного ископаемого данного месторождения были минимальными. Следовательно и в выборе способа разработки, т. е. в определении границы между открытыми и подземными работами, мы должны придерживаться этого принципа.

Если обозначим: A — запас полезного ископаемого открытых работ, C — запас полезного ископаемого подземных работ, B — суммарный объем вскрыши (рис. 2), a — средняя стоимость руды из открытых работ, b — то же пустых пород отнесенная к суммарному объему, c — стоимость тонны руды при подземной разработке запаса A, c_I — то же при разработке нижних горизонтов, то суммарные эксплоатационные затраты за весь период разработки данного месторождения могут быть выражены в виде:

$$S_I = S_{откр} + S_{подз} = A \cdot a + B \cdot b + C \cdot c_I. \qquad (1$$

В случае же, если данное месторождение целиком выработать подземным способом, суммарные эксплоатационные затраты были бы

$$S_{II} = A \cdot c + C \cdot c_I. \qquad (1$$

Рентабельность применения открытых работ, или абсолютная сумма экономии затрат на разработку, которую дает в данном случае применение для части месторождения открытых работ, выразится в виде разности:

$$S = S_{II} - S_I = A \cdot c + C \cdot c_I - A \cdot a - B \cdot b - C \cdot c_I$$

или

$$S = A\ (c - a) - B \cdot b. \tag{11}$$

Так как A и B представляют величины, зависящие от положения границы между открытыми и подземными работами, то очевидно, что наиболее выгодной границе должно удовлетворять условие, чтобы величина S была максимальной.

Если S — максимум, то производная выражения (11) должна быть равна нулю; приращение же величины S при изменении границы открытых работ на величину Δx представляет (см. рис. 3) величину

$$s = \Delta A(c - a) - \Delta B \cdot b. \tag{12}$$

Следовательно отношение пустых пород к полезному ископаемому для предельного (граничного) слоя, удовлетворяющее условию определения наивыгоднейшей границы открытых работ, должно быть равно:

$$n = \lim \left(\frac{\Delta B}{\Delta A}\right)_{\Delta x \to 0} = \frac{c - a}{b}. \tag{13}$$

Разбивая месторождение на ряд полос или слоев и определяя границу открытых работ графическим подысканием на планах и разрезах такой полосы или слоя, для которого удовлетворяется условие (13), мы определим границу открытых работ, соответствующую максимальной их выгодности, но этот метод требует значительного объема работы, а потому вполне естественно стремление многих исследователей вывести аналитическую формулу, дающую после подстановки ряда известных величин значение выгодной границы или глубины открытых работ.

Однако, какой бы мы из формул, приведенных в предыдущем разделе, ни воспользовались (конечно, с теми оговорками и поправками, которые вытекают из их анализа), получив значение глубины открытых работ, мы не можем быть еще уверены в ее технической и экономической целесообразности и даже в целесообразности открытых работ вообще для данного случая. Критерием этого могут быть только абсолютные цифры запаса полезного ископаемого, объема вскрышных работ и абсолютная сумма экономии эксплоатационных затрат, которая в ряде случаев может оказаться настолько незначительной, что нецелесообразность открытых работ будет очевидной, несмотря на найденную их наивыгоднейшую границу.

Поэтому решение задачи о выгодности открытых работ должно состоять:

1) в определении границы, соответствующей максимальной выгодности,

2) в определении абсолютной величины этого максимума,

3) в определении запаса полезного ископаемого при разработке открытыми работами до найденной границы.

Для месторождения геометрически правильной формы сравнительно легко установить зависимости между отдельными величинами и таким образом решить задачу аналитически; для месторождений неправильной формы более удобен, а часто единственно возможен — графический метод. Последний удобен еще тем, что дает легко читаемую картину изменения функции, т. е. по графику мы можем видеть, как изменятся интересующие нас величины, если мы отступим в ту или иную сторону от наивыгоднейшей границы открытых работ.

5. Применение предлагаемого метода при определении границы перехода на подземные работы для правильной пластообразной залежи

Сначала рассмотрим наиболее простой случай—геометрически правильную залежь или пласт постоянной мощности с постоянным углом падения при горизонтальной поверхности (т. е. тот же случай условий залегания, для которого выведены все формулы проф. Кузнецова и проф. Стешенко), а затем перейдем к общему случаю месторождения любой формы.

Предположим, что задача решается для месторождения, поперечный разрез которого изображен на рис. 12, причем приняты следующие обозначения:

m — горизонтальная мощность залежи; h — вертикальная мощность наносов; α — угол падения залежи; γ и β — средние углы откоса карьера с учетом берм; β_0 — угол откоса карьера по наносам; A — запас полезного ископаемого для открытых работ в данном поперечном разрезе, т. е. на 1 *пог. м* длины месторождения по простиранию при глубине разработки x (или $x + h$ от поверхности) в $м^3$; $B = B_0 + B_1 + B_2$ — суммарный объем снимаемых пустых пород в $м^3$ тоже на 1 *пог. м* длины месторождения по простиранию; k — коэфициент извлечения запаса полезного ископаемого при разработке открытыми работами; a — стоимость добычи полезного ископаемого открытыми работами без учета вскрыши в руб. за 1 $м^3$; b — стоимость 1 $м^3$ коренных пород; b' — стоимость 1 $м^3$ наносов; c — стоимость добычи полезного ископаемого подземными работами.

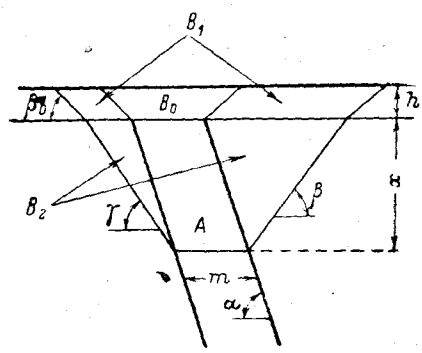


Рис. 12. Схема к выводу формул (15), (16), (17).

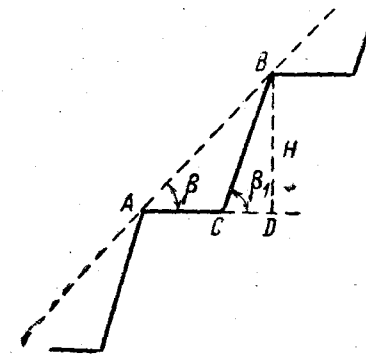


Рис. 13. Схема к формуле (14).

Стоимостные показатели в данном случае примем постоянными, средними для всего карьера, хотя их величина несомненно зависит в известной мере от глубины открытых работ.

Результат определения границы открытых работ в большей степени будет зависеть от того, насколько удачно будут выбраны или подсчитаны абсолютные величины стоимостей, чем от их изменения с глубиной. При решении подобных задач подбор стоимостных показателей вызывает большие затруднения, тем более затруднительно определение их зависимости от глубины; поэтому для предварительного (в первом приближении) определения границы открытых работ, пока еще не ясна организация последних, приходится принимать стоимости добычи и вскрыши условно постоянными, средними для данного карьера.

В отношении угла падения месторождения принимаем более общий случай крутого падения, когда вскрываться должна порода и со стороны висячего, и со стороны лежачего боков (рис. 12), причем углы β и γ представляют не углы откоса уступов, а средние безопасные углы откоса бортов карьера с учетом берм. После нее принято с целью избежать усложнения вида уравнений, так как средние углы откоса карьера β и γ могут быть заранее вычислены из выражения (рис. 1

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{H}{d + H \cdot \operatorname{ctg}\beta_1}, \qquad (1$$

если известны — высота уступа H, ширина бермы d и угол откоса стенок уступа

Так как проектирование открытых работ начинается с определения их границы, а высота уступа, ширина бермы и т. д. определяются обычно позднее то в таких случаях значения средних безопасных углов β и γ могут быть приняты непосредственно по практическим данным (конечно, с известным приближением в то время как относительно величин H и d данных еще не будет. Поэтому проще вильнее в приводимых ниже формулах указывать средние углы откоса бортов β и γ.

Переходим к установлению геометрических зависимостей. Условимся, что началом координат будем считать отметку выхода залежи под наносами. Тогда извлекаемый запас полезного ископаемого для открытых работ в данном поперечном разрезе (рис. 12):

$$A = k \cdot m \cdot x.$$

Объем вскрыши наносов над выходом залежи:

$$B_0 = m \cdot h + h^2 \cdot \operatorname{ctg} \beta_0 = (m + h \cdot \operatorname{ctg} \beta_0) \cdot h.$$

Объем вскрыши пород висячего и лежачего боков как сумма площадей двух треугольников, имеющих общую высоту x:

$$B_2 = \frac{\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{ctg} \gamma}{2} \cdot x^2.$$

Объем остальной части вскрываемых наносов:

$$B_1 = h (\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{ctg} \gamma) x,$$

где $(\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{ctg} \gamma) x$ является суммой оснований двух параллелограммов B_1.

Подставляя найденные значения в уравнение (11) и имея в виду, что в данном случае $B = B_0 + B_1 + B_2$, получим:

$$S = f(x) = k \cdot m (c - a) x - \frac{b (\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{ctg} \gamma)}{2} \cdot x^2 - b' \cdot h (\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{ctg} \gamma) \cdot x - \\ - (m + h \cdot \operatorname{ctg} \beta_0) \cdot h \cdot b'. \quad (15)$$

Очевидно, выгодность открытых работ будет максимальной, когда производная этой функции будет равна 0, откуда

$$\frac{dS}{dx} = k \cdot m (c - a) - b (\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{ctg} \gamma) x - b' \cdot h (\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{ctg} \gamma) = 0 \quad (16)$$

$$x = \frac{c - a}{b} \cdot \frac{k \cdot m}{\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{ctg} \gamma} - \frac{b'}{b} \cdot h. \quad (17)$$

В формулах (16) и (17) можно исключить b', заменив мощность наносов h через $h_{\text{привед}}$ по пропорции:

$$h \cdot b' = h_{\text{привед}} \cdot b,$$

откуда

$$h_{\text{привед}} = \frac{b'}{b} \cdot h. \quad (18)$$

Тогда эти формулы получат следующий вид:

$$S = k \cdot m (c - a) x - \frac{b (\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{ctg} \gamma)}{2} \cdot x^2 - b \cdot h_{\text{привед}} (\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{ctg} \gamma) x - \\ - (m + h \cdot \operatorname{ctg} \beta_0) \cdot b \cdot h_{\text{привед}}. \quad (19)$$

$$\frac{dS}{dx} = k \cdot m (c - a) - b (\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{ctg} \gamma) (x + h_{\text{привед}}). \quad (20)$$

$$x = \frac{c - a}{b} \cdot \frac{k \cdot m}{\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{ctg} \gamma} - h_{\text{привед}}. \quad (21)$$

Нетрудно заметить, что формулы, выведенные для случая, когда угол падения больше безопасного угла откоса карьера (рис. 12), остаются верными и для угла падения a меньше угла γ, так как, когда вскрыша боковых пород производится только с висячего бока, достаточно лишь заменить угол γ углом α.

Если месторождение имеет большую горизонтальную мощность, то после вскрыши объема B_0 (рис. 14) имеется возможность углубиться и взять запас полезного ископаемого A_0 без вскрыши боковых пород. В этом случае вскрыша боковых пород начнется не с $x = 0$, как в рассмотренном случае (рис. 12), а с момента, когда глубина открытых работ достигнет величины $x = x_0$.

Если обратимся к рис. 14, то заметим, что запас полезного ископаемого, получаемый без вскрыши боковых пород — A_0, можно также понимать как дополнительный запас, который может быть взят ниже последнего уступа, сущность дела от этого не изменится.

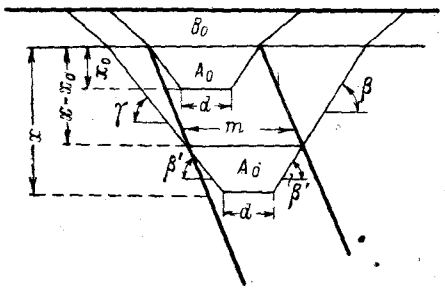


Рис. 14. Схема к формулам (22)—(26).

Если d — минимальная ширина выемки для возможности вести открытые работы, β' — угол откоса уступа, m — по-прежнему горизонтальная мощность, то запас A_0 (с учетом коэфициента извлечения — k) и дополнительное углубление карьера x_0 могут быть представлены выражениями:

$$x_0 = \frac{m-d}{2} \cdot \operatorname{tg}\beta'. \qquad (22)$$

$$A_0 = k\left(\frac{m+d}{2}\right) \cdot x_0 = k \cdot \left(\frac{m^2-d^2}{4}\right) \cdot \operatorname{tg}\beta'. \qquad (23)$$

Учет запаса A_0 повлияет на значение S в сторону увеличения; при этом формулы (19), (20) и (21), в соответствии с обозначениями, принятыми на рис. 14, изменяются таким образом:

$$S = k \cdot m(c-a)(x-x_0) - \frac{b(\operatorname{ctg}\beta + \operatorname{ctg}\gamma)}{2}(x-x_0)^2 -$$
$$-b \cdot h_{\text{привед}}(\operatorname{ctg}\beta + \operatorname{ctg}\gamma)(x-x_0) - (m + h \cdot \operatorname{ctg}\beta_0) \cdot b \cdot h_{\text{привед}} +$$
$$+ \frac{ak \cdot (m^2-d^2)}{4} \operatorname{tg}\beta'. \qquad (24)$$

$$\frac{dS}{dx} = k \cdot m(c-a) - b(\operatorname{ctg}\beta + \operatorname{ctg}\gamma)(x - x_0 + h_{\text{привед}}). \qquad (25)$$

$$x = \frac{c-a}{b} \cdot \frac{k \cdot m}{\operatorname{ctg}\beta + \operatorname{ctg}\gamma} + x_0 - h_{\text{привед}}. \qquad (26)$$

Интересно отметить, что во всех рассмотренных выше работах (например Кузнецова и Стешенко) за основу принималось углубление карьера на один уступ, а по нашему методу искомая глубина карьера может иметь любое значение, что более правильно, так как ограничивать глубину карьера величиной кратной высоте уступа — нелогично и, более того, в большинстве случаев при предварительном определении границы открытых работ высота уступа нам еще неизвестна.

Из полученных выражений производной $\frac{dS}{dx}$ весьма легко выясняется, в чем заключаются допущенные проф. Кузнецовым ошибки, а именно — неправильно понятая зависимость границы открытых работ от объема первоначально вскрыши и дополнительного объема руды на дне карьера.

Как видно из выражений (15), (19) и (24), объем вскрыши наносов над выходом месторождения нами учитывается, но так как он не зависит от глубины x, то при взятии производной обращается в нуль и в уравнение $\frac{dS}{dx} = 0$, а также в конечную формулу для определения x не входит; то же получилось с объемом полезного ископаемого A_0, когда мы учли при составлении уравнения для выемку дополнительного клина полезного ископаемого на дне карьера (формулы 24—26).

Таким образом, отсутствие необходимого анализа привело проф. Кузнецова к указанным выше ошибкам.

Проанализируем выражения (15) — (21) графически, причем значения x будем откладывать по оси абсцисс. $S = f(x)$ представляет уравнение второй степени, а именно — параболу с осью, параллельной оси ординат. Положение максимума этой кривой определяется формулой (17) или (21). График уравнения (

или (19) показан на рис. 15. Следует заметить, что так как отрицательные значения x исключаются, график ограничивается только областью положительных значений x.

График $\frac{dS}{dx}$ представляет прямую линию, отсекающую отрезок OA и OB на осях координат; точка пересечения этой прямой с осью x соответствует наиболее выгодной глубине открытых работ и определяется из уравнения:

$$x = \frac{c-a}{b} \cdot \frac{k \cdot m}{\operatorname{ctg}\beta + \operatorname{ctg}\gamma} - h_{\text{привед}}.$$

Значение максимума S получается подстановкой определенного из последней формулы значения x в уравнение (15) или (19).

В общем виде выводить формулу для определения S_{max} мы не будем, так как получится алгебраическое выражение довольно сложного вида, кроме того делать это практически бесполезно. Значительно проще в каждом конкретном случае, определив по формуле (21) численное значение x, подставить его в уравнение (19) и таким образом получить величину S_{max}.

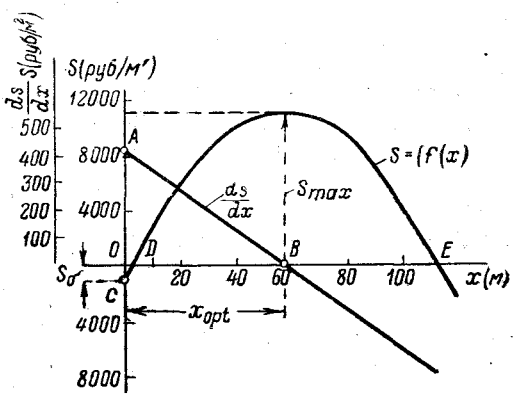


Рис. 15. График уравнений (15), (16), (19), (20).

Обращаясь к уравнению (19) или (15) и к его графику, замечаем, что при $x = 0$

$$\overline{OC} = S_0 = -(m + h \cdot \operatorname{ctg}\beta_0) \cdot b \cdot h_{\text{привед}} = -(m + h \operatorname{ctg}\beta_0) \cdot b' \cdot h. \qquad (27)$$

Это выражение представляет сумму тех затрат на вскрышу объема наносов B_0, покрывающих выход полезного ископаемого (рис. 12), которые должны быть произведены до начала добычи полезного ископаемого.

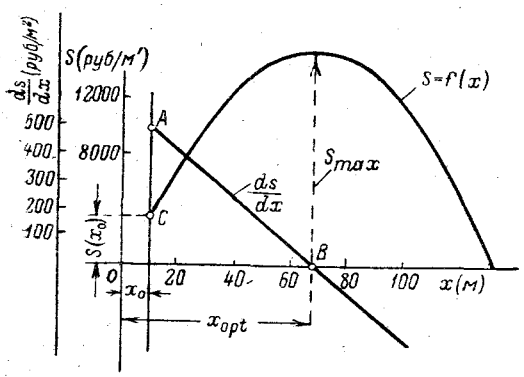


Рис. 16. График уравнений (24) и (25).

С углублением работ в пределах от $x = 0$ до $x = \overline{OD}$ значения S остаются отрицательными, т. е. открытые работы, если их ограничить этой глубиной, дадут убыток по сравнению с подземными; в пределах от $x = \overline{OD}$ до $x = \overline{OE}$ значения S положительны, следовательно открытые работы выгодны, причем их выгодность сначала возрастает с глубиной, затем начинает уменьшаться и при значении $x = \overline{OE}$ становится равной 0. Эта точка соответствует определению границы открытых работ по условию (рис. 2):

$$n_{\text{ср}} = \frac{B}{A} = \frac{c-a}{b}.$$

Уравнения (15) и (19) являются квадратными уравнениями при условии, что стоимостные показатели принимаются как величины постоянные; если их представить в виде функции от x, то степень уравнения соответственно повысится. В частности, если принять линейную зависимость стоимостных показателей от глубины разработки (как принято у проф. Кузнецова), то получим уравнение 3-й степени, график которого будет представлять кубическую параболу.

Если обратимся к уравнениям (24) — (26), учитывающим выемку объема полезного ископаемого A_0, то нетрудно заметить, что графики функций $S = f(x)$ и $\frac{dS}{dx}$ изменятся следующим образом.

Парабола $S = f(x)$ остается прежней, но ее положение изменяется, а именно — начинать ее строить надлежит не с $x = 0$, как для уравнения (19), а с $x = x_0$, причем при $x = x_0$ значение функции $S = f(x)$ будет равно (см. рис. 16):

$$S_{x_0} = -(m + h \cdot \operatorname{ctg} \beta_0) \cdot b' \cdot h + \frac{ak(m^2 - d^2)}{4} \cdot \operatorname{tg} \beta'. \qquad (27а)$$

Это выражение представляет собой $(-B_0 \cdot b' + A_0 \cdot a)$ по рис. 14.

Соответственно положению параболы изменится и график ее производной.

Посмотрим, как влияет на положение графика функции $S = f(x)$ величина мощности наносов h.

При $h = 0$, т. е. когда месторождение выходит непосредственно на поверхность, из формулы (27) имеем:

$$S_0 = -(m + h \cdot \operatorname{ctg} \beta_0) \cdot h \cdot b' = 0.$$

Следовательно, в этом случае парабола (рис. 15) пройдет через начало координат ($\overline{OC} = 0$ и $\overline{OD} = 0$).

В случае, соответствующем рис. 16, будем иметь по формуле (27а) при $h = 0$:

$$S_{x_0} = \frac{ak \cdot (m^2 - d^2)}{4} \cdot \operatorname{tg} \beta'.$$

Если будем изменять значение h, постепенно увеличивая, то парабола, представляющая функцию S, будет понижаться, а положение максимума перемещаться ближе к началу координат, т. е. наивыгоднейшая глубина открытых работ и их рентабельность будут уменьшаться; наконец, при определенном значении h точка максимума опустится до оси абсцисс, а вся парабола будет расположена ниже оси, т. е. при всех значениях x открытые работы будут невыгодны.

Интересно отметить, что и в последнем случае определяемая из формул (21) или (26) наивыгоднейшая глубина открытых работ может иметь положительное значение (определяя положение максимума параболы), хотя абсолютная величина $S_{max} \leqslant 0$. Следовательно нельзя ограничиться определением глубины открытых работ, а необходимо проверить, будет ли при полученном значении x положительной и каково абсолютное значение величины S, как величины, характеризующей рентабельность открытых работ.

Это относится ко всем способам определения границы карьера, основанным на установлении ее по равенству стоимости полезного ископаемого из открытых и подземных работ для граничного слоя.

Такая проверка может быть сделана более точно после окончательного построения карьера, когда будут получены общий запас руды для открытых работ и суммарный объем вскрыши с учетом торцов карьера, въездной траншеи и т. д. или же предварительный подсчет достигаемой экономии может быть сделан сразу после того, как предварительная глубина открытых работ для поперечных разрезов месторождения определена по приведенным выше формулам.

В первом случае, очевидно, подсчет достигаемой экономии в производственных затратах, поскольку общие объемы уже подсчитаны, может быть произведен по формуле вида:

$$S_{общ} = A(c - a) - B \cdot b, \qquad (28$$

где A — общий запас руды для открытых работ и $B = B_0 + B_1 + B_2 + \ldots$ — общий объем вскрыши пустых пород, а b понимается как средняя стоимость вскрыши, приведенная к суммарному объему.

Во втором случае, когда требуется, хотя бы и не вполне точно, но быстро подсчитать сумму достигаемой экономии от открытых работ при принятой для отдел

ных разрезов их глубине, для карьеров, имеющих большую длину или площадь в плане, можно предложить воспользоваться общеизвестной формулой, применяемой для подсчета запасов по поперечным параллельным сечениям:

$$S = \frac{S_{\text{I}} + S_{\text{II}}}{2} \cdot l,$$

где S_{I}, S_{II} — экономия в производственных затратах, вычисленная для соответствующего поперечного разреза (на 1 *пог. м* длины месторождения по простиранию), l — расстояние между разрезами.

Как было выше указано, на участки, прилегающие к концам залежи, оказывает влияние дополнительная вскрыша, необходимая для образования откоса в торцах карьера. Для карьеров большой длины по простиранию ее влияние незначительно и мы можем с этими дополнительными объемами при решении данной задачи не считаться, но для карьеров, глубоких и имеющих небольшую длину, это влияние надо учитывать.

Без построения карьера и детального подсчета объемов, не зная еще объема дополнительной вскрыши в торцах, мы можем определить величину $S_{\text{общ}}$ только для части карьера, на которую дополнительная вскрыша не влияет, т. е. исключив крайние участки. Этим мы несколько занизим величину $S_{\text{общ}}$, но получим все же результат, который позволит нам сделать предварительное суждение о выгодности открытых работ.

Как уже было выяснено выше (см. рис. 6), длина участка по простиранию (с каждого конца залежи), на который распространяется влияние дополнительной вскрыши, равна

$$l_{\text{к}} = x \cdot \operatorname{ctg} \varphi,$$

где x — глубина карьера, определенная для ближайшего поперечного сечения, а φ — средний угол откоса торцевых бортов карьера.

Если расстояния между разрезами обозначим (начиная с конца залежи до первого разреза) через l_0, l_1, l_2, $l_3 \ldots l_n$, то исключая часть карьера, на глубину которой оказывает влияние вскрыша торцов, величина $S_{\text{общ}}$ ориентировочно может быть подсчитана по формуле:

$$S_{\text{общ}} = S_{\text{I}}(l_0 - l_{\text{к}}) + \frac{S_{\text{I}} + S_{\text{II}}}{2} \cdot l_1 + \frac{S_{\text{II}} + S_{\text{III}}}{2} \cdot l_2 + \ldots + S_{\text{n}}(l_{\text{n}} - l_{\text{к}_1}). \quad (29)$$

Из изложенного вытекают два весьма важных следствия, а именно:

1) если при окончательном построении карьера коэфициент вскрыши в концевых участках карьера в среднем принимается по условию $n_{\text{ср}} = \frac{c-a}{b}$, т. е. по условию равенства стоимости открытых работ стоимости подземных, то величина $S_{\text{общ}}$ останется такой же, как по формуле (29); если же для концевых участков $n_{\text{ср}} < \frac{c-a}{b}$, то они дают приращение величины $S_{\text{общ}}$;

2) если длина карьера меньше удвоенной величины участка, на который распространяется влияние дополнительной вскрыши для торцевых откосов, т. е.

$$L < 2l_{\text{к}} = 2x \cdot \operatorname{ctg} \varphi, \quad (30)$$

определение глубины карьера по поперечным сечениям, т. е. по формулам (15) — (26), даст неверный результат, заведомо завышенный.

Поэтому в тех случаях, когда месторождение имеет небольшую длину по простиранию, вернее, когда получается небольшая величина отношения $\frac{L}{x}$ (практически, меньше 4—5), от решения по данным формулам надлежит отказаться и рекомендуется применить метод вариантов, подсчитывая объемы на основании построения (для каждого варианта) карьера на разрезах и в плане.

Определив границы открытых работ и проверив, какова абсолютная сумма достигаемой при этом экономии в расходах на разработку, мы должны обратить

внимание еще на третий фактор, от которого зависит выбор способа разработки месторождения, а именно — на запас руды для открытых работ.

Если запас слишком мал и не обеспечивает ни достаточного масштаба работ, ни достаточного их срока — открытые работы могут быть или отвергнуты, или организованы (как носящие временный характер) с малой механизацией и с небольшим размером добычи. В последнем случае мы должны пересмотреть, насколько отвечают выявившимся организационно-техническим условиям принимавшиеся нами при определении границы открытых работ стоимостные показатели (a, b, c).

Если при их выборе исходили из другого понимания масштаба и организации открытых работ, эти показатели должны быть исправлены, а соответственно новым их значениям пересчитаны граница открытых работ и сумма достигаемой экономии в производственных затратах.

Обращая вновь внимание на графики (рис. 15 и 16), отметим дополнительно еще одно удобство графического изображения интересующих нас зависимостей. При проектировании разработки месторождения открытыми работами по вполне понятным причинам не приходится слепо следовать установленной для отдельных поперечных разрезов границе; имея график — мы легко можем определить (конечно, относительно), в какой степени отступления в ту или иную сторону повлияют на изменение рентабельности применения открытых работ.

6. Графо-аналитический метод определения границы открытых работ для месторождения неправильной формы

Выше нами рассмотрен пример месторождения правильной формы, однако на практике, в особенности в области разработки рудных месторождений, чаще приходится встречаться с месторождениями неправильными, для которых пренебрежение действительной формой и чрезмерное ее упрощение могут послужить причиной существенной ошибки.

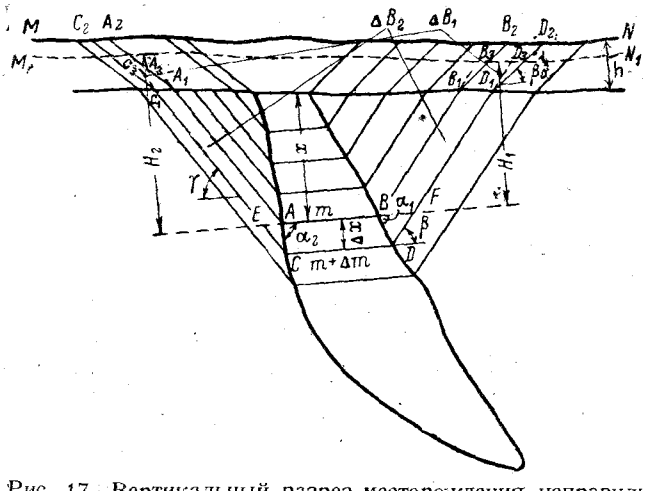


Рис. 17. Вертикальный разрез месторождения неправильной формы.

Представим неправильной формы рудную залежь неравномерной мощности, изображенную в разрезе на рис. 17, где приняты следующие обозначения: m — переменная горизонтальная мощность залежи; α_1 — переменный угол падения висячего бока; α_2 — то же лежачего бока; h — переменная вертикальная мощность наносов; β_0 — угол откоса карьера в наносах; β и γ — средние углы откоса карьера с учетом берм; x — глубина открытых работ; k — коэфициент извлечения запасов полезного ископаемого при разработке открытым способом; a — стоимость добычи полезного ископаемого открытыми работами, без учета вскрыши, в руб. за 1 $м^3$; b — стоимость 1 $м^3$ коренных пород в руб.; b' — стоимость съема 1 $м^3$ наносов; c — стоимость добычи полезного ископаемого подземными работами.

Для упрощения нашей задачи исключим b', заменив мощность наносов через мощность $h_{\text{привед}}$ по условию:

$$h \cdot b' = h_{\text{привед}} \cdot b; \quad h_{\text{привед}} = h \cdot \frac{b'}{b}.$$

В соответствии с этим нанесем на разрезе (рис. 17) вместо MN новую приведенную линию поверхности M_1N_1. Разобьем разрез на ряд горизонтальных слоев и выделим один из слоев величиной Δx. При увеличении глубины открытых работ на Δx приращение их выгодности по сравнению с подземным способом разработки:

$$s = \Delta A \cdot (c - a) - \Delta B \cdot b, \tag{31}$$

где: ΔA — приращение запаса полезного ископаемого для открытых работ, ΔB — приращение объема пустых пород с углублением работ на Δx (в данном разрезе, на единицу длины по простиранию).

На основании рис. 17 приращение извлекаемого запаса полезного ископаемого с углублением открытых работ на Δx:

$$\Delta A = \frac{m + (m + \Delta m)}{2} \cdot k \cdot \Delta x, \tag{32}$$

причем m и $(m + \Delta m)$ — горизонтальные мощности залежи на глубине x и $(x + \Delta x)$.

Приращение объема пустых пород определяется суммой площадок $\Delta B = \Delta B_1 + \Delta B_2$, где $\Delta B_1 =$ пл. $B_1B_2D_2D_1 +$ пл. $A_1A_2C_2C_1$ представляет вскрышу наносов, а $\Delta B_2 =$ пл. $BB_1D_1D +$ пл. AA_1C_1C — вскрышу коренных пород.

Из рис. 17 следует, что при стоимости 1 $м^3$ вскрыши наносов b' расходы на вскрышу объема наносов, представленных площадкой $B_1B_2D_2D_1$, будут равны $\overline{B_1D_1} \cdot h \cdot b'$, но так как $h \cdot b' = h_{\text{привед}} \cdot b$, то можно написать, что

$$\overline{B_1D_1} \cdot h \cdot b' = \overline{B_1D_1} \cdot h_{\text{привед}} \cdot b,$$

следовательно площадка $B_1B_2D_2D_1$ может быть заменена площадкой $B_1B_3D_3D_1$ при условии, что вместо стоимости вскрыши наносов b' будем принимать стоимость вскрыши коренных пород b.

Так как это рассуждение относится и к площадке $A_1A_2C_2C_1$, то на основании рис. 17 можем написать:

$$\Delta B = \Delta B_1 + \Delta B_2 = \text{пл. } B_1B_3D_3D_1 + \text{пл. } A_1A_3C_3C_1 + \text{пл. } BB_1D_1D + \text{пл. } AA_1C_1C = \text{пл. } BB_3D_3D + \text{пл. } AA_3C_3C;$$

но из того же чертежа следует, что

$$\text{пл. } BB_3D_3D = \text{пл. } BB_3D_3F + \text{пл. } BFD;$$

$$\text{пл. } AA_3C_3C = \text{пл. } AA_3C_3E + \text{пл. } AEC,$$

причем

$$\overline{BF} = (\operatorname{ctg}\alpha_1 + \operatorname{ctg}\beta) \cdot \Delta x,$$

$$\overline{AE} = (\operatorname{ctg}\gamma - \operatorname{ctg}\alpha_2) \cdot \Delta x.$$

Следовательно, если обозначим через H_1 и H_2 разность вертикальных отметок рассматриваемого горизонта открытых работ и соответствующих точек на линии условной поверхности M_1N_1, то приращение объема вскрыши, соответствующее данному углублению карьера на Δx, может быть представлено выражением:

$$\begin{aligned}\Delta B &= \text{пл. } BB_3D_3F + \text{пл. } BFD + \text{пл. } AA_3C_3E + \text{пл. } AEC = \\ &= H_1(\operatorname{ctg}\alpha_1 + \operatorname{ctg}\beta) \cdot \Delta x + H_2(\operatorname{ctg}\gamma - \operatorname{ctg}\alpha_2) \cdot \Delta x + \\ &+ (\operatorname{ctg}\alpha_1 + \operatorname{ctg}\beta)\frac{(\Delta x)^2}{2} + (\operatorname{ctg}\gamma - \operatorname{ctg}\alpha_2)\frac{(\Delta x)^2}{2}.\end{aligned} \tag{33}$$

Подставляя в уравнение (31) полученные выражения (32) и (33) для ΔA и ΔB, в пределе, при $\Delta x \to 0$, будем иметь:

$$\begin{aligned}&\lim(s)_{\Delta x \to 0} = dS = \\ &= k \cdot m(c - a)\,dx - H_1(\operatorname{ctg}\alpha_1 + \operatorname{ctg}\beta) \cdot b \cdot dx - H_2(\operatorname{ctg}\gamma - \operatorname{ctg}\alpha_2) \cdot b \cdot dx,\end{aligned} \tag{34}$$

откуда

$$\frac{dS}{dx} = k \cdot m(c-a) - H_1(\operatorname{ctg}\alpha_1 + \operatorname{ctg}\beta)\cdot b - H_2(\operatorname{ctg}\gamma - \operatorname{ctg}\alpha_2)\cdot b, \qquad (35)$$

где H_1, H_2, m, α_1 и α_2 зависят от x.

Сравним полученное выражение (при неправильной форме месторождения и произвольном профиле поверхности) с выражением (20) для месторождения правильной формы.

При горизонтальной поверхности и равномерных наносах $H_1 = H_2 = x + h_{\text{привед}}$, а для равномерной мощности $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$; подставляя это в выражение (35), получим полное совпадение с выражением (20):

$$\frac{dS}{dx} = k \cdot m(c-a) - (x + h_{\text{привед}})(\operatorname{ctg}\beta + \operatorname{ctg}\gamma)\cdot b,$$

следовательно уравнение (20) есть частный случай общего уравнения (35).

Искомая глубина открытых работ должна соответствовать их максимальной выгодности, следовательно она определяется для нашего случая неправильного месторождения условием:

$$\frac{dS}{dx} = k\cdot m(c-a) - H_1(\operatorname{ctg}\alpha_1 + \operatorname{ctg}\beta)\cdot b - H_2(\operatorname{ctg}\beta - \operatorname{ctg}\alpha_2)\cdot b = 0. \qquad (36)$$

При выводе формул (35) и (36) мы исходили из условия, что вскрыша боковых пород начинается при $x = 0$ и открытые работы заканчиваются горизонтальной площадкой на глубине x. Если предусматривается выемка дополнительно еще объема полезного ископаемого A_0 (см. рис. 14), который не потребует увеличения объема вскрыши боковых пород (с оставлением в бортах карьера треугольников полезного ископаемого), то аналогично полученному в предыдущем разделе соотношению между формулами (21) и (26) найденную по формуле (36) глубину открытых работ надлежит увеличить на величину (22):

$$x_0 = \frac{m-d}{2}\cdot \operatorname{tg}\beta'.$$

Так как мы рассматриваем месторождение неправильной формы при любом рельефе поверхности, то выразить функциональную зависимость H_1, H_2, m, α_1, α_2 от искомой глубины x аналитически мы не можем, однако, располагая разрезами и планами месторождения, построенными на основании данных разведки, мы можем при определении глубины карьера итти двумя путями.

1) Определять выгодную глубину открытых работ методом вариантов, задаваясь рядом значений x и подставляя полученные для этих значений измерением по чертежу величины в выражение (36); искомый вариант будет тот, для которого выражение (36) обращается в нуль.

2) На основании разреза месторождения, основанного на геолого-разведочных данных, построить графики изменения величин: m; $H_1(\operatorname{ctg}\alpha_1 + \operatorname{ctg}\beta)$; $H_2(\operatorname{ctg}\gamma - \operatorname{ctg}\alpha_2)$; затем, по этим графикам построить график функции $\frac{dS}{dx}$, который и определит положение наивыгоднейшей глубины карьера.

Преимущество первого способа заключается в том, что он не требует графических построений; однако экономия времени на решение не будет достигнута, если не удастся быстро подобрать нужный вариант. Поиски последнего можно несколько упростить в том случае, когда в условиях данного конкретного примера возможно без большой ошибки принять поверхность горизонтальной и приведенную мощность наносов $h_{\text{привед}}$ постоянной. Тогда выражение (36) упростится так:

$$\frac{dS}{dx} = \frac{k\cdot m(c-a)}{b} - (x + h_{\text{привед}})(\operatorname{ctg}\alpha_1 + \operatorname{ctg}\beta + \operatorname{ctg}\gamma - \operatorname{ctg}\alpha_2) = 0. \qquad (37)$$

Стоимостные показатели a, b и c, входящие в уравнения (35), (36) и (37), как уже неоднократно было отмечено, могут с глубиной карьера изменяться, что может быть учтено при построении графиков, если принимать для разных значений

глубины, учитывая организационно-технические соображения, различные значения стоимостных показателей.

Достоинством второго способа — определения искомой глубины путем построения графика $\frac{dS}{dx}$ — является возможность получить полную картину изменения выгодности открытых работ с глубиной, чего не может дать способ вариантов.

Построение графиков можно сделать очень просто, без больших вычислений, пользуясь следующими приемами. Основой должны служить разрезы, построенные на основании геолого-разведочных данных (рис. 18). Сначала, пользуясь соотношением (18), построим приведенную линию поверхности M_1N_1; затем разобьем разрез на ряд горизонтальных слоев линиями *1*, *2*, *3*, *4* и т. д., проведем для каждого слоя наклонные линии под углами β и γ до пересечения с линией условной поверхности M_1N_1 и опустим из этих точек перпендикуляры до пересечения с соответствующими горизонтальными линиями *1*, *2*, *3*, *4* и т. д.

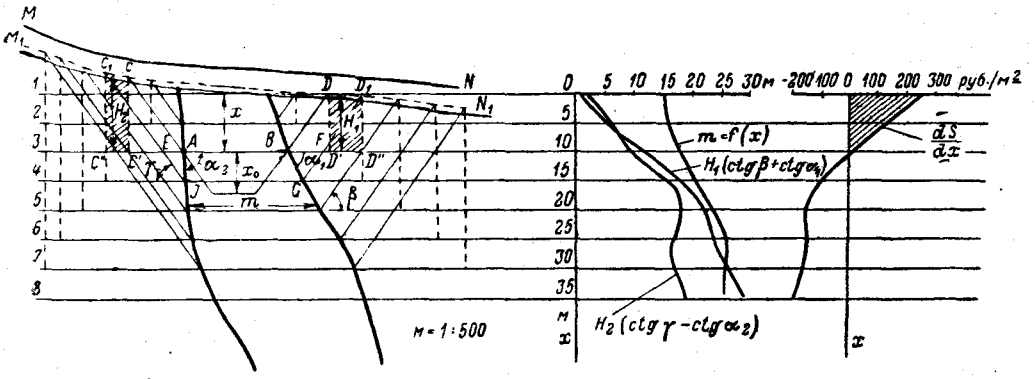


Рис. 18. Графический метод определения границы открытых работ.

Возьмем в качестве примера хотя бы 3-й слой, на глубине x.

Очевидно, отрезок $\overline{AB}$ представляет в масштабе нашего чертежа горизонтальную мощность залежи — m, соответствующую данной глубине x, а $\overline{DD'}$ и $\overline{CC'}$ представляют величины H_1 и H_2 в уравнении (20).

Кроме того, из рис. 17 следует, что

$$\text{пл. } DD_1D''D' = \text{пл. } BDD_1F = \overline{BF} \cdot \overline{DD'},$$

а

$$\text{пл. } CC_1C''C' = \text{пл. } ACC_1E = \overline{AE} \cdot \overline{CC'};$$

но по рис. 17 и 18 имеем, что

$$\overline{BF} = (\operatorname{ctg}\alpha_1 + \operatorname{ctg}\beta) \cdot \Delta x;$$

$$\overline{AE} = (\operatorname{ctg}\gamma - \operatorname{ctg}\alpha_2) \cdot \Delta x:$$

следовательно, входящие в интересующее нас уравнение (35) величины:

$$H_1(\operatorname{ctg}\alpha_1 + \operatorname{ctg}\beta) = \frac{\text{пл. } DD_1D''D'}{\Delta x};$$

$$H_2(\operatorname{ctg}\gamma - \operatorname{ctg}\alpha_2) = \frac{\text{пл. } CC_1C''C'}{\Delta x}.$$

Эти площадки, заштрихованные на рис. 18, легко могут быть измерены по чертежу и результат измерения, разделенный на Δx, нанесен в виде графика. Отсюда следует, что для построения интересующего нас графика уравнения (35)

$$\frac{dS}{dx} = k \cdot m(c - a) - H_1(\operatorname{ctg}\alpha_1 + \operatorname{ctg}\beta) \cdot b - H_2(\operatorname{ctg}\gamma - \operatorname{ctg}\alpha_2) \cdot b$$

мы можем весьма просто, пользуясь линейкой и циркулем, предварительно построить вспомогательные графики зависимости от глубины x входящих в указанное выше уравнение величин: m; H_1 (ctg α_1 + ctg β) и H_2 (ctg γ — ctg α_2); а затем, имея эти вспомогательные графики, нетрудно построить и график функции $\frac{dS}{dx}$.

Вспомогательные графики и график $\frac{dS}{dx}$ удобно располагать, как показано на рис. 18.

Очевидно, что наиболее выгодное значение x соответствует точке пересечения графика $\frac{dS}{dx}$ с осью абсцисс.

В предыдущем разделе, при рассмотрении вопроса о границе открытых работ для правильного месторождения было установлено, что для решения данной задачи недостаточно определить положение выгодной границы, а необходимо также выяснить, каковы абсолютная величина достигаемой при этом экономии в расходах и величина запаса полезного ископаемого для открытых работ.

Ответ на вопрос о запасе полезного ископаемого для открытых работ дает график $m = f(x)$, построенный на рис. 18, причем в том случае, если дополнительно карьер углубляется еще на величину x_0, то дополнительный запас A_0 должен быть прибавлен к запасу, определяемому по графику $m = f(x)$ для глубины x.

Соответственно две другие кривые определяют объем вскрыши.

Располагая рядом разрезов для данного месторождения, суммарный запас полезного ископаемого определим по известной формуле подсчета по поперечным сечениям.

Последний график на рис. 18 представляет функцию $\frac{dS}{dx}$, следовательно для данного разреза экономия производственных затрат при применении открытых работ (по сравнению с подземными) будет представлять:

$$S = \int \left(\frac{dS}{dx}\right) dx + C.$$

Постоянная C будет иметь различное значение в зависимости от следующих условий:

1) если месторождение выходит непосредственно на поверхность, т. е. $h = 0$, то $B_0 = 0$; на основании уравнений (15) и (27), а также рис. 12, 15 и 17 в этом случае, при $x = 0$, имеем:

$$C = S_0 = 0, \tag{38}$$

2) если B_0 представляет объем вскрыши наносов над выходом месторождения, которые должны быть сняты, чтобы можно было приступить к выемке первого слоя, то при $x = 0$ будем иметь на тех же основаниях:

$$C = S_0 = -B_0 \cdot b', \tag{39}$$

3) в том случае, когда при большой мощности залежи предполагается углублять карьер для выемки дополнительного запаса полезного ископаемого A_0, на основании уравнений (24) и (27а) и рис. 14 и 16 получим:

$$C = -B_0 \cdot b' + A_0 \cdot a, \tag{40}$$

4) наконец, для случая, когда мощность наносов $h = 0$, но выемка запаса A_0 предусматривается, будем иметь:

$$C = A_0 \cdot a. \tag{41}$$

Обращаясь к рис. 18, видим, что заштрихованная площадь, ограниченная кривой $\frac{dS}{dx}$ и осями координат, представляет в масштабе диаграммы величину

$$\int_0^x \left(\frac{dS}{dx}\right) dx.$$

Таким образом, для определения абсолютной величины экономии производственных расходов по добыче, т. е. величины S, требуется: построить указанным выше способом график $\frac{dS}{dx}$ и измерить, учитывая масштаб чертежа, площадь, ограниченную этой кривой и осями координат, затем прибавить к полученной величине или вычесть из нее в зависимости от знака величину постоянной C, определяемой на основании чертежа и известных нам стоимостных показателей по условиям (38) — (41).

При переходе от разрезов к подсчету достигаемой применением открытых работ экономии расходов по разработке для всего объема карьера рекомендуется (по прежнему) формула (29).

Следует заметить, что, применив графическое интегрирование, можно было бы построить также график $S = f(x)$, однако в нем нет особой необходимости.

В этом разделе мы рассмотрели случай графического построения при постоянной величине стоимостных показателей; нетрудно убедиться в том, что метод применим при переменном их характере, надобно лишь построить, кроме графиков изменения геометрических параметров, кривые изменения стоимости работ, учитывая которые и строить затем график $\frac{dS}{dx}$.

7. Определение границы открытых работ для пологопадающих месторождений

Этот случай представлен на рис. 19; его особенность в том, что здесь выемка полезного ископаемого ведется по падению без разделения на горизонтальные слои.

Так как для проектирования открытых работ и для подсчета запасов при пологом падении обычно пользуются вертикальной мощностью пласта или залежи, то и мы будем принимать за известную нам величину вертикальную мощность m_b, которая в различных участках месторождения может быть разной, следовательно является величиной переменной.

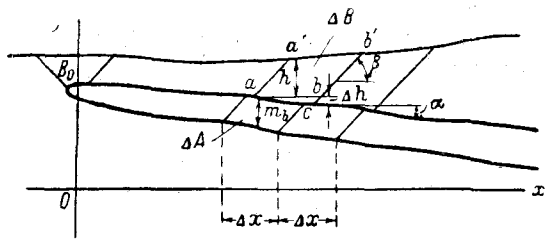


Рис. 19. Определение границы открытых работ для случая пологого падения.

Переменную вертикальную мощность покрывающих пород обозначим через h, причем не будем разделять на наносы и коренные породы, имея в виду, что тем же методом, как было изложено выше, мы можем заменить мощность наносов и коренных пород общей мощностью $h_{\text{приведен}}$.

Угол падения месторождения α не является в общем случае величиной постоянной; однако, благодаря небольшим его значениям, он может быть заменен в ряде случаев средним углом падения, так как эта неточность незначительно отразится на результате.

Разобьем разрез нашего месторождения, изображенный на рис. 19, на ряд небольших полос, шириной в плане Δx и рассмотрим одну из полос, условившись, что наклонные линии проведены нами под углом β, который представляет средний угол откоса борта карьера.

Из рис. 19 имеем, что запас полезного ископаемого в полоске равен

$$\Delta A = k \cdot m_b \cdot \Delta x,$$

а объем вскрыши пустой породы, представляющий приращение общего объема вскрыши при прирезке к открытым работам данной полоски,

$$\Delta B = \text{пл. } aa'b'b + \text{пл. } abc =$$
$$= h(\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\beta) \cdot \Delta h + (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\beta) \cdot \frac{(\Delta h)^2}{2}.$$

Но так как Δh связано с Δx следующим соотношением:

$$\Delta h = \Delta x \cdot \operatorname{tg} \alpha, \tag{42}$$

то, подставляя это значение Δh в выражение для ΔB, будем иметь:

$$\Delta B = h(\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\beta) \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot \Delta x + (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\beta) \cdot \frac{(\Delta x \cdot \operatorname{tg}\alpha)^2}{2} =$$
$$= h\left(1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta}\right)\Delta x + (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\beta)\frac{(\Delta x \cdot \operatorname{tg}\alpha)^2}{2}.$$

Подставляя полученные значения для ΔA и ΔB в общее уравнение (31)

$$s = \Delta A\,(c - a) - \Delta B \cdot b$$

в пределе при $\Delta x \to 0$, получим:

$$\lim (s)_{x \to 0} = dS = k \cdot m_b (c - a)\,dx - h\left(1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta}\right) \cdot b \cdot dx, \tag{43}$$

откуда

$$\frac{dS}{dx} = k \cdot m_b (c - a) - h\left(1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta}\right) \cdot b. \tag{44}$$

Наиболее выгодная граница открытых работ должна соответствовать максимуму S, следовательно

$$\frac{dS}{dx} = k \cdot m_b (c - a) - h\left(1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta}\right) \cdot b = 0;$$

откуда получим выражение для предельно выгодной мощности вскрыши:

$$h = \frac{c - a}{b} \cdot \frac{k \cdot m_b}{1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta}}. \tag{45}$$

Так как мощность полезного ископаемого может сильно меняться, пользоваться этой формулой неудобно; поэтому лучше определять не максимальную мощность вскрыши, а предельное отношение вертикальной мощности вскрыши к мощности полезного ископаемого:

$$n = \frac{h}{m_b} = \frac{c - a}{b} \cdot \frac{k}{1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta}}. \tag{46}$$

Пользуясь данными разведки, на плане месторождения можно построить изолинии равных отношений $\frac{h}{m_b}$ и контур карьера принять по изолинии, соответствующей отношению $n = \frac{h}{m_b}$, определенному по формуле (46).

Формула (46) показывает связь между так называемым геологическим коэфициентом вскрыши, т. е. отношением вертикальных мощностей, и объемным коэфициентом вскрыши, представляющим отношение приращения объемов.

Предельное значение объемного коэфициента вскрыши, соответствующее экономически выгодной границе открытых работ, определяется условием

$$n = \frac{\Delta B}{\Delta A} = \frac{c - a}{b},$$

а геологический коэфициент вскрыши определяется формулой (46).

Обычно, потери полезного ископаемого невелики, почему коэфициент извлечения может быть принят за единицу, следовательно для перехода от предельного объемного коэфициента вскрыши к геологическому необходимо умножить его на величину переходного коэфициента

$$\frac{1}{1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta}}.$$

Если месторождение залегает горизонтально, т. е. $\alpha = 0$, то этот переходный коэфициент обращается в единицу; следовательно при $\alpha = 0$ граница открытых работ определяется формулой:

$$n = \frac{h}{m_b} = \frac{c - a}{b}.$$

С увеличением угла падения величина множителя уменьшается; чтобы выяснить его влияние на результат, зададимся несколькими значениями углов α и β и полученные значения $\frac{1}{1+\frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta}}$ выпишем в следующую табличку:

α	0°	5°	5°	5°	10°	10°	10°
β	0—90°	40°	50°	60°	40°	50°	60°
$\frac{1}{1+\frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta}}$	1,0	0,89	0,93	0,95	0,83	0,87	0,91

Как видно из этих цифр, значением множителя $\frac{1}{1+\frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta}}$ пренебрегать не следует, особенно при угле падения месторождения более 5° и при пологих углах откоса бортов карьера.

Определение абсолютной величины экономии производственных расходов при найденной по уравнению (46) и плану месторождения границе открытых работ может быть сделано путем обычного подсчета запаса полезного ископаемого в контуре карьера и объема пустой породы, а затем подстановки полученных цифр в формулу (29):

$$S_{\text{общ}} = A_{\text{общ}} \cdot (c - a) - B_{\text{общ}} \cdot b.$$

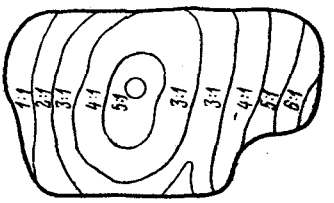


Рис. 20. План залежи с изолиниями равных отношений вертикальных мощностей вскрыши к руде.

Можно было бы еще поступить так: построить для отдельных разрезов месторождения графики уравнения (44), по которым, измеряя площади (аналогично тому, как это было рассмотрено в разделе 6), получить значение S, а затем определить $S_{\text{общ}}$ по формуле (29) подсчетом по поперечным сечениям.

В данном случае быстрее и проще подсчитывать $S_{\text{общ}}$ по первому способу, а потому строить графики $\frac{dS}{dx}$ нет надобности.

Остановимся теперь на одном вопросе, имеющем весьма большое практическое значение.

Определив предельное значение $n = \frac{h}{m_b}$, соответствующее наивыгоднейшей границе открытых работ при принятых нами стоимостных показателях, мы не можем формально принять границу по соответствующей изолинии и на этом считать решение задачи законченным.

Месторождения с небольшим углом падения часто бывают весьма изменчивой мощности, а при неровной поверхности и мощность покрывающих пород колеблется в широких пределах, поэтому изолинии равных отношений обычно имеют сложные очертания. Построение границы карьера по изолинии может в этом случае оказаться практически неправильным решением.

Например, предположим, что изолинии равных отношений имеют вид, изображеный на рис. 20, причем по формуле (46) мы определили величину предельного отношения 4 : 1. Из чертежа следует, что если мы примем границу открытых работ по этой изолинии, в средине карьера останется невыработанный островок

залежи. Очевидно, что оставлять этот участок для подземной разработки нецелесообразно и он должен быть отнесен к открытым работам.

Второй возможный случай — когда вне изолинии, определяющей границу открытых работ, остаются небольшие участки полезного ископаемого, выработка которых подземными работами, требуя дополнительных капитальных затрат, вряд ли будет целесообразной. В этом случае стоит пойти на то, чтобы выработать все месторождение открытыми работами, использовав то оборудование, которое все равно должно быть приобретено для открытых работ.

Можно привести еще много разнообразных примеров, подтверждающих необходимость критического подхода, с учетом практических данных, к вопросу определения границы открытых работ.

8. Примеры определения границы открытых работ

Приведем несколько примеров применения изложенного в разделах 4—7 метода.

Пример 1.

Определить экономически выгодную границу открытых работ для правильной пластообразной залежи, имеющей средний угол падения $\alpha = 50°$ (рис. 21).

Определение границы открытых работ будет произведено тем точнее, чем больше имеется поперечных разрезов. В данном случае для упрощения ограничимся тремя типичными разрезами.

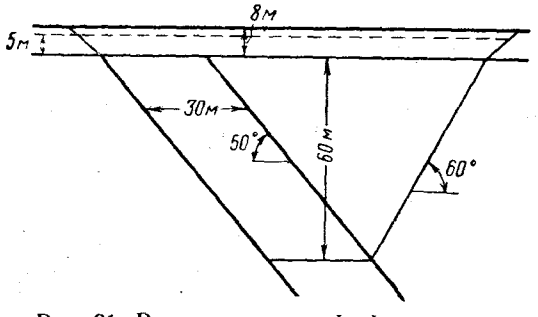


Рис. 21. Разрез по линии *I—I* рисунка 22.

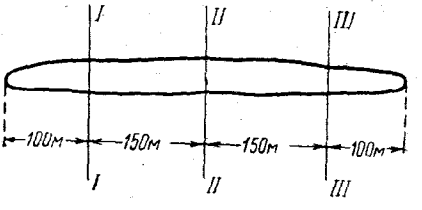


Рис. 22. Горизонтальный разрез рудной залежи (к примеру 1).

Общая длина залежи по простиранию 500 *м*. Расположение разрезов и расстояния между ними показаны на рис. 22.

Данные для расчета:

Горизонтальная мощность залежи (средняя):

I разрез . . . . . $m = 30$ *м*
II » . . . . . $m = 35$ »
III » . . . . . $m = 30$ »

Мощность наносов (средняя):

I разрез . . . . . $h = 8$ *м*
II » . . . . . $h = 6$ »
III » . . . . . $h = 6$ »

Средний угол откоса борта карьера $\beta = 60°$; так как угол падения залежи 50° — вскрыша лежачего бока не производится.

Угол откоса карьера в наносах (глины) . . . . $\beta_0 = 40°$
Объемный вес полезного ископаемого 3,0
Объемный вес боковых пород 2,5
Объемный вес наносов 2,0

Абсолютные отметки поверхности над выходом залежи:

I разрез . . . . . +312 *м*
II » . . . . . +308 »
III » . . . . . +305 »

Стоимостные показатели приняты следующие:

Стоимость добычи полезного ископаемого открытыми работами, без учета вскрыши	$a = 5$ руб. за 1 $т$
Стоимость вскрыши коренных пород	$b = 5$ руб. за 1 $м^3$
Стоимость вскрыши наносов	$b' = 3$ руб. за 1 $м^3$
Стоимость добычи полезного ископаемого подземным способом	$c = 10$ руб. за 1 $т$
Годовая добыча полезного ископаемого	300 000 $т$
Коэфициент извлечения запаса при разработке открытыми работами — k	0,95

Решение.

1. Приведем стоимостные показатели к цене за 1 $м^3$:

$$\begin{aligned} a &= 15 \text{ р./}м^3; \\ b &= 5 \quad » \\ b' &= 3 \quad » \\ c &= 30 \quad » \end{aligned}$$

2. Заменяя стоимость вскрыши наносов b' стоимостью вскрыши коренных пород b, определим для каждого разреза $h_{\text{привед.}}$ по формуле (18):

$$h_{\text{привед.}} = \frac{b'}{b} \cdot h:$$

для I разреза

$$h_{\text{привед.}} = \frac{3}{5} \cdot 8 = 4{,}8 = 5 \text{ } м$$

для II разреза

$$h_{\text{привед.}} = \frac{3}{5} \cdot 6 = 3{,}6 = 4 \text{ } »$$

для III разреза

$$h_{\text{привед.}} = \frac{3}{5} \cdot 6 = 4 \text{ } м$$

3. Приступая к определению глубины открытых работ, мы должны предварительно условиться, будем ли мы ограничивать дно карьера горизонтальной площадкой шириной, равной мощности залежи (рис. 12), или будем брать открытым способом дополнительный запас A_0, оставляя треугольники полезного ископаемого в бортах карьера (рис. 14). В зависимости от нашего решения воспользуемся формулой (21) или (26).

В данном случае, учитывая сравнительно небольшую ширину карьера и затруднения с последующей выемкой треугольников полезного ископаемого, оставляемых в бортах карьера, мы примем первое решение и в соответствии с этим воспользуемся формулой (21):

$$x = \frac{c-a}{b} \cdot \frac{k \cdot m}{(\operatorname{ctg}\beta + \operatorname{ctg}\gamma)} - h_{\text{привед}};$$

в нашем случае, так как угол падения α меньше среднего угла откоса карьера одним из бортов карьера будет служить лежачий бок; следовательно угол γ в этой формуле заменяем углом α:

$$x = \frac{c-a}{b} \cdot \frac{k \cdot m}{(\operatorname{ctg}\beta + \operatorname{ctg}\alpha)} - h_{\text{привед}}.$$

Подставляя известные нам значения входящих в формулу величин, определим выгодную глубину открытых работ для наших разрезов:

$$x_{\text{I}} = \frac{30-15}{5} \cdot \frac{0{,}95 \cdot 30}{(0{,}58+0{,}84)} - 5 = 58 \text{ } м$$

$$x_{\text{II}} = \frac{30-15}{5} \cdot \frac{0{,}95 \cdot 35}{(0{,}58+0{,}84)} - 4 = 70 \text{ } »$$

$$x_{\text{III}} = \frac{30-15}{5} \cdot \frac{0{,}95 \cdot 30}{(0{,}58+0{,}84)} - 4 = 59 \text{ } »$$

4. Проверим допустимость применения формулы (21) по условию (30):

$$L > 2x \cdot \operatorname{ctg} \varphi = 2 \cdot 59 \cdot \operatorname{ctg} 60^\circ = 70 \ м,$$

следовательно в данном случае подсчет по параллельным сечениям вполне допустим, так как $L = 500$ *м*.

5. Получив значения выгодной глубины открытых работ, дальше можем приступить непосредственно к построению карьера, руководствуясь при этом полученными значениями x_I, x_{II} и x_{III} как первым приближением.

6. Решение задачи может быть продолжено в тех случаях, когда нас интересует более полное выяснение выгодности применения открытого способа разработки предварительно, до детального проектирования карьера.

Определение абсолютной величины достигаемой при этом экономии производственных расходов и приходящегося на долю открытых работ запаса полезного ископаемого может быть выполнено изложенным в разделе 5 способом.

Однако, прежде чем приступить к дальнейшим подсчетам, следует откорректировать полученные значения x_I, x_{II} и x_{III}, принимая во внимание необходимость выдержать определенные отметки уступов в карьере.

Определим, какие у нас получились отметки дна карьера, воспользовавшись известными нам отметками поверхности:

Абс. отметки дна карьера (предварительные):

I разрез . . . . . $+312 - 8 - 58 = +246$ *м*
II » . . . . . $+308 - 6 - 70 = +232$ »
III » . . . . . $+305 - 6 - 59 = +240$ »

Принимая высоту уступа 12 *м* и отметку нижнего уступа $+232$ *м*, в нашем карьере мы должны получить следующие отметки уступов:

$$+232;\ +244;\ +256;\ +268;\ +280;\ +292.$$

Поэтому окончательно принимаем абсолютные отметки дна карьера:

I разрез . . . . . $+244$ *м*
II » . . . . . $+232$ »
III » . . . . . $+244$ »

Следовательно откорректированные значения **x** будут:

$$x_I = 60 \ м; \qquad x_{II} = 70 \ м; \qquad x_{III} = 55 \ м$$

7. Сделаем предварительный подсчет запаса полезного ископаемого для открытых работ, исключив участки в концах карьера, на которые оказывает влияние дополнительная вскрыша (аналогично формуле 29):

$$A_{общ} = A_I (l_0 - l_к) + \frac{A_I + A_{II}}{2} \cdot l_1 + \frac{A_{II} + A_{III}}{2} \cdot l_2 + A_{III} (l_з - l_{к_1});$$

где:

$$l_к = x_I \cdot \operatorname{ctg} 60^\circ = 60 \cdot 0{,}58 = 35 \ м$$

$$l_{к_1} = x_{III} \cdot \operatorname{ctg} 60^\circ = 55 \cdot 0{,}58 = 32 \ »$$

Запас руды по поперечным разрезам подсчитываем по формуле (без учета потерь) $A = m \cdot \mathbf{x}$:

I разрез . . . . . $A_I = 30 \cdot 60 = 1800$ *м*²
II » . . . . . $A_{II} = 35 \cdot 70 = 2\,450$ »
III » . . . . . $A_{III} = 30 \cdot 55 = 1\,650$ »

$$A_{общ} = 1\,800\,(100 - 35) + \frac{1\,800 + 2\,450}{2} \cdot 150 + \frac{2\,450 + 1\,650}{2} \cdot 150 + \\ + 1\,650\,(100 - 32) = 856\,000 \ м^3$$

или

$$A_{общ} = 856\,000 \cdot \gamma_1 = 856\,000 \cdot 3{,}0 = 2\,560 \text{ тыс. } т.$$

8. При заданной годовой добыче 300 000 m время существования открытых работ:

$$t = \frac{A_{\text{общ}} \cdot k}{300\,000} = \frac{2\,560\,000 \cdot 0{,}95}{300\,000} = 8{,}5 \text{ лет.}$$

9. Определим приблизительную величину экономии производственных расходов при принятой границе открытых работ.

Для подсчета по отдельным разрезам применим формулу (19), причем угол γ заменим в ней углом α:

$$S = k \cdot m(c - a) \cdot x - \frac{b(\operatorname{ctg}\beta + \operatorname{ctg}\alpha)}{2} \cdot x^2 - b \cdot h_{\text{привед}}(\operatorname{ctg}\beta + \operatorname{ctg}\alpha)x - (m + h \cdot \operatorname{tg}\beta_0) \cdot b \cdot h_{\text{привед}}.$$

Если бы мы предусматривали выемку дополнительно запаса полезного ископаемого на дне карьера A_0, то следовало бы применить формулу (24).

В данном случае производим подсчет по разрезам по формуле (19), подставляя значения

$x_{\text{I}} \cdot x_{\text{II}}$ и x_{III}:

$$S_{\text{I}} = 0{,}95 \cdot 30(30 - 15) \cdot 60 - \frac{5(0{,}58 + 0{,}84)}{2} \cdot 60^2 - 5 \cdot 5(0{,}58 + 0{,}84) \cdot 60 - (30 + 8 \cdot 1{,}19) \cdot 5 \cdot 5 = 11\,100 \text{ руб/м}^1$$

$$S_{\text{II}} = 0{,}95 \cdot 35(30 - 15) \cdot 70 - \frac{5(0{,}58 + 0{,}84)}{2} \cdot 70^2 - 5 \cdot 4(0{,}58 + 0{,}84) \cdot 70 - (35 + 6 \cdot 1{,}19) \cdot 5 \cdot 4 = 16\,600 \text{ руб/м}^1$$

$$S_{\text{III}} = 0{,}95 \cdot 30(30 - 15) \cdot 55 - \frac{5(0{,}58 + 0{,}84)}{2} \cdot 55^2 - 5 \cdot 4(0{,}58 + 0{,}84) \cdot 55 - (30 + 6 \cdot 1{,}19) \cdot 5 \cdot 4 = 11\,800 \text{ руб/м}^1$$

Подсчет величины $S_{\text{общ}}$ для всего карьера производим по формуле (29), которая дает приближенную величину $S_{\text{общ}}$, но удобна для пользования. Кроме того нам для предварительного определения и не нужна особая точность. Формула (29) имеет следующий вид:

$$S_{\text{общ}} = S_{\text{I}}(l_0 - l_{\text{к}}) + \frac{S_{\text{I}} + S_{\text{II}}}{2} \cdot l_1 + \frac{S_{\text{II}} + S_{\text{III}}}{2} \cdot l_2 + S_{\text{III}}(l_3 - l_{\text{к}_1}),$$

следовательно:

$$S_{\text{общ}} = 11\,100(100 - 35) + \frac{11\,100 + 16\,600}{2} \cdot 150 + \frac{16\,600 + 11\,800}{2} \cdot 150 + 11\,800(100 - 32) = 5\,735\,000 \text{ руб.}$$

10. На этом можно считать предварительное решение задачи законченным, так как мы получили все необходимые данные для суждения об экономичности открытых работ, о запасе полезного ископаемого и о выгодной глубине.

Следующим этапом должно быть проектирование карьера с учетом всех технических и организационных факторов. При этом уточнятся контур карьера, отметки уступов, объем вскрыши и запас полезного ископаемого, а также стоимостные показатели; следовательно изменится граница открытых работ, соответствующая их максимальной выгодности, и абсолютная величина этого максимума.

Так как в процессе проектирования будут получены общий объем вскрыши и запас полезного ископаемого для открытых работ, то, пользуясь уточненными стоимостными показателями, мы сможем произвести проверку величины S по формуле (28):

$$S_{\text{общ}} = A_{\text{общ}}(c - a) - B_{\text{общ}} \cdot b_{\text{средн}},$$

а глубины открытых работ по формуле (21).

Следует заметить, что благодаря общему свойству кривых в области максимума некоторое отступление в ту или иную сторону от $x_{\text{наивыгодн}}$ не влечет зна-

чительного изменения абсолютной величины S. Так, график 15 построен в масштабе, соответствующем числовым значениям, определенным в данном примере для разреза I; из него следует, что при ограничении глубины карьера уступом выше или уступом ниже абсолютная величина S изменяется не более 3—5%, что несомненно лежит в пределах точности наших подсчетов.

К выбору величины стоимостных показателей, если они принимаются по данным практики, или к определению их путем предварительного сметного подсчета — следует относиться с большой внимательностью, так как они существенно влияют на характер кривой.

Пример 2.

Определить экономически выгодную границу открытых работ для разработки неправильной штокообразной залежи магнетита в крепких боковых породах, разрез которой изображен на рис. 18.

Данные для расчета:

Мощность рудной залежи	от 15 до 25 *м*
Мощность покрывающих наносов в среднем	4 *м*
Угол падения	по чертежу
Разработка предполагается воронками	
Угол откоса как по руде, так и по боковым породам	55°
Угол откоса по наносам	35°
Минимальная ширина площадки на дне воронки	8 *м*
Объемные веса:	
руды	3,5
боковых пород	2,8
наносов	2,0

Стоимостные показатели:

Стоимость добычи руды открытыми работами, со спуском через рудоскат и подземной доставкой	7 руб./*т*
Стоимость вскрыши наносов скрепером с отвалом на поверхности	3 руб./*м*³
Стоимость вскрыши боковых пород с взрывными работами, с перепуском через рудоскат и подземной доставкой	5 руб./*т*
Стоимость добычи руды подземным способом	12 руб./*т*

Годовая добыча не задается, так как данный шток представляет лишь один из участков рудника.

Решение.

1. Приведем стоимостные показатели к цене за 1 *м*³:

$$a = 7 \cdot 3{,}5 = 24{,}5 \text{ руб./м}^3$$
$$b = 5 \cdot 2{,}8 = 14 \quad »$$
$$b' = 3 \quad »$$
$$c = 12 \cdot 3{,}5 = 42 \quad »$$

2. Построим на разрезе (рис. 18) приведенную линию поверхности M_1N_1 на основании соотношения (18):

$$h_{\text{привед}} = \frac{b'}{b} \cdot h = \frac{3}{14} h = 0{,}21\, h.$$

3. Разобьем разрез горизонтальными линиями через 5 *м* ($\Delta x = 5$ *м*) и проведем систему наклонных линий BD и AC под углом, равным углу откоса воронки; в нашем случае $\beta = \gamma = 55°$.

Из точек пересечения наклонных линий с линией приведенной поверхности M_1N_1 опустим перпендикуляры DD' до пересечения с соответствующей горизонтальной линией.

4. Приступим к построению вспомогательных графиков, как описано в разделе 6 настоящей работы.

График $m = f(x)$ строится без вычислений, простым измерением горизонтальной мощности по чертежу; графики $H_1(\operatorname{ctg}\alpha_1 + \operatorname{ctg}\beta)$ и $H_2(\operatorname{ctg}\gamma - \operatorname{ctg}\alpha_2)$ строятся на основании измерения площади прямоугольников $DD_1D''D'$ и $CC_1C''C'$ в масштабе чертежа и деления полученной величины на расстояние между горизонтальными сечениями тоже в масштабе чертежа, — результат будет представлять искомую величину, выраженную тоже в масштабе чертежа.

Предположим, например, пл. $DD_1D''D' = 2{,}2\ см^2$, а $\Delta x = 1\ см$; следовательно, для 3-го горизонтального сечения (масштаб чертежа при фотографировании изменился):

$$H_1(\operatorname{ctg}\alpha_1 + \operatorname{ctg}\beta) = \frac{2{,}2}{1} = 2{,}2\ см \left(\text{(верно для масштаба } \frac{1}{500}\right).$$

Полученные величины откладываем как ординаты для графика $H_1(\operatorname{ctg}\alpha_1 + \operatorname{ctg}\beta) = f(x)$.

5. График $\frac{dS}{dx}$ строим, пользуясь построенными вспомогательными графиками по уравнению (35):

$$\frac{dS}{dx} = k \cdot m(c-a) - H_1(\operatorname{ctg}\alpha_1 + \operatorname{ctg}\beta)\cdot b - H_2(\operatorname{ctg}\gamma - \operatorname{ctg}\alpha_2)\cdot b.$$

В нашем случае имеем: $c - a = (42 - 24{,}5) = 17{,}5$ и $b = 14$, следовательно

$$\frac{dS}{dx} = 0{,}95 \cdot 17{,}5\,m - 14\,[H_1(\operatorname{ctg}\alpha_1 + \operatorname{ctg}\beta) + H_2(\operatorname{ctg}\gamma - \operatorname{ctg}\alpha_2)].$$

6. Из графика этого выражения, построенного на рис. 18, определяем, что $\frac{dS}{dx} = 0$ при $x = 10\ м$; однако это значение x определяет глубину воронки при условии, что дно воронки имеет ширину, равную горизонтальной мощности залежи.

Так как по условию ширина воронки на дне должна быть 8 *м*, то мы можем без дополнительной вскрыши боковых пород еще углубить воронку согласно установленному в разделе 5 соотношению (22) на величину $x_0 = \frac{m-d}{2} \cdot \operatorname{tg}\beta'$.

В нашем случае $\beta' = \beta = \gamma = 55°$, d — по условию задачи равно 8 *м*, а горизонтальную мощность на глубине $x = 10\ м$ определяем по графику $m = f(x)$; в результате подстановки этих величин в формулу (22) получим:

$$x_0 = \frac{18-8}{2} \cdot \operatorname{tg} 55° = 7\ м.$$

Таким образом, искомая экономически выгодная глубина разработки данного штока воронкой будет равна

$$X = x + x_0 = 10 + 7 = 17\ м.$$

7. Экономическая рентабельность разработки открытым способом при определенной выше границе разработки воронками может быть определена, как и для первого примера, или после построения границы на плане и разрезах и уточнения объемов пустой породы и руды, или ориентировочно по формуле (29).

Пример 3.

Определить границу открытых работ при разработке пологопадающей пластообразной залежи бурого железняка.

Средний угол падения $\alpha = 5°$; минимальная мощность рудной залежи 2 *м*; максимальная мощность 6 *м*. Минимальная мощность покрывающих пород 6 *м*; максимальная 16 *м* в участке, где мощность уменьшается до 2—3 *м*. Объемный вес руды 2,0. Общий запас руды 1,5 млн. *т*, годовая добыча 300 тыс. *т*.

Вскрыша может производиться многочерпаковым экскаватором с перевалкой в выработанное пространство породы транспортером.

Угол откоса уступов $\beta = 40°$.

Стоимостные показатели:

Стоимость добычи руды открытыми работами, без учета вскрыши	4,5 руб./$т$
Стоимость вскрыши пустой породы	2,5 руб./$м^3$
Стоимость добычи руды подземным способом	12 руб./$т$

Р е ш е н и е.

1. Приводим стоимостные показатели к цене за 1 $м^3$:

$$a = 4{,}5 \cdot 2 = 9 \text{ руб./}м^3$$
$$b = 2{,}5 \quad »$$
$$c = 12 \cdot 2 = 24 \quad »$$

2. Определяем величину отношения вертикальной мощности пустых пород к вертикальной мощности руды, удовлетворяющую условию наивыгоднейшей границы открытых работ по уравнению (46):

$$n = \frac{h}{m_b} = \frac{c-a}{b} \cdot \frac{k}{1+\frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta}} = \frac{(24-9)}{2{,}5} \cdot 0{,}88 = 5{,}3.$$

3. Пользуясь данными разведки по скважинам, строим на плане месторождения изолинию $\frac{h}{m_b} = 5{,}3$.

4. Обращая внимание на форму данной изолинии, наносим на плане границу карьера, учитывающую технические условия разработки.

5. Производим подсчет запаса руды для открытых работ при построенной на плане их границе (пользуясь данными разведки по скважинам); подсчитываем также объем вскрыши.

6. Не приводя самого подсчета, предположим, что, проделав указанную выше работу, мы получили следующие значения:

$$A = 1\,200\,000 \text{ } т, \quad B = 1\,550\,000 \text{ } м^3.$$

Следовательно на подземные работы остается 300 000 $т$ запаса руды.

7. Имея в виду сомнения в целесообразности организации подземного участка для такого небольшого остающегося запаса, сравним два варианта открытых работ: при указанной выше их границе и когда открытыми работами вырабатывается весь запас месторождения. При этом мы предусматриваем, что стоимостный показатель, принятый нами выше для подземной добычи, соответствует условию, когда для подземных работ остается небольшой тоннаж руды.

8. Производим подсчет величины $S_{общ}$ для первого варианта по формуле (28):

$$S_{общ} = A(c-a) - B \cdot b =$$
$$= \frac{1\,200\,000}{2}(24-9) - 1\,550\,000 \cdot 2{,}5 = 5\,100\,000 \text{ руб.}$$

9. Производим подсчет величины $S_{общ}$ для второго варианта, когда открытыми работами вырабатывается весь запас залежи. Предположим, что объем вскрыши в этом случае, подсчитанный по плану и данным разведки по скважинам, равен 2 450 000 $м^3$:

$$S_{общ} = \frac{1\,500\,000}{2}(24-9) - 2\,600\,000 \cdot 2{,}5 = 4\,750\,000 \text{ руб.}$$

Разница в экономичности этих двух вариантов находится в пределах точности наших расчетов, так как составляет меньше 10%. Поэтому в данном случае должен быть принят второй вариант, имеющий дополнительное преимущество в том, что все месторождение будет выработано только одним открытым способом, т. е. не потребуется ни капитальных затрат, ни времени на освоение подземного способа разработки.

8. Заключение

Порядок определения экономически выгодной границы открытых работ вытекает из приведенных выше примеров. На этих примерах мы могли убедиться, что предварительное определение границы открытых работ рекомендуемым методом не требует большой вычислительной работы и в то же время позволяет проанализировать влияние различных факторов в каждом конкретном примере.

Однако, определив путем технико-экономического расчета границу открытых работ и проверив, какова при этом величина ожидаемой экономии производственных расходов по сравнению с подземными работами, а также запас полезного ископаемого для открытого способа разработки, все же мы должны считать полученный результат предварительным.

Окончательное решение относительно границы между открытыми и подземными работами, а также определение их выгодности могут быть получены лишь в результате технического проектирования, так как только при этом возможно выяснить воздействие целого ряда организационно-технических факторов, влияющих на объемы вскрыши и полезного ископаемого, а также на величину стоимостных показателей. В то же время мы не должны забывать о том, что нельзя подходить формально к принимаемым для расчета значениям стоимостных показателей; на них следует смотреть как на относительные, условные величины, которые в процессе работы рудника вследствие рационализации системы разработки, развития стахановских методов и улучшения использования оборудования могут значительно измениться.

При выборе способа разработки необходимо кроме того считаться с следующим обстоятельством. Если по условиям залегания и технико-экономическим подсчетам определилось, что часть месторождения должна разрабатываться открытым, а вторая часть подземным способом, капиталовложения потребуются и на открытую, и на подземную разработку, причем при переходе на подземные работы может быть использована лишь часть сооружений и весьма незначительная часть оборудования; если же применить только один способ разработки для всего запаса месторождения, то в большинстве случаев капиталовложения будут по абсолютной величине меньшими, чем при разработке двумя способами. В частности, возможны и в практике работ бывают случаи, когда открытые работы продолжаются значительно далее их кажущегося экономически выгодного предела.

Поэтому с точки зрения целесообразности капиталовложений применение для месторождения двух способов разработки оправдывается в случаях:

1) когда обеспечен достаточный для нормальной амортизации основных средств срок существования как открытых, так и подземных работ,

2) когда применение открытых работ в комбинации с подземными дает значительную экономию производственных расходов, оправдывающую дополнительные капиталовложения,

3) когда применение того или другого способа разработки вызывается требованиями безопасности или технической необходимостью.

Из всего изложенного вытекает, что данная задача должна решаться на основе комплексного учета всех факторов, причем предварительную границу открытых работ рекомендуется определять изложенным выше методом.

Summary

In determination the limit of open pit and underground mining technical and economical factors are to be considered.

The ratio of overburden and waste rock stripped to the ore reserve is the principal criterion of utility of the open pit mining. Many attempts were made to give the mathematic solution of this problem, but complicated formulas and mistakes in mathematic interpretation prevented from using it in practice (see Part 3).

The purpose of this article is to give the solution of this problem on the base of determination of the most profitable open pit. It is possible to give the general

formulas (9) and (10) showing the expenses conserning the mining of the deposit by two variants.

1) a part of deposit (A) is mined by open pit and another part (C)-by underground method. (Fig. 2);

2) all tonnage of deposit (A + C) is mined by underground method.

The difference between the expenses S_{11} and S_1 is represented by formula (11) where a, b, c — denote the costs (per cu. m. or ton) of ore from open pit, rock which must be stripped and ore from underground mining.

Since A and B are depending from depth of open pit, the most profitable limit of open pit can be determined as soon as we find the maxima of function $S = f(x)$. For a regular form of ore deposit it is difficult to write algebraic formulas for A and B (Fig. 12), on the basis of which the formula (11) will have another form (15). From the derivative of this function (16) the formula for the depth of open pit will be (17). Another form of this formula is (21).

The graphic interpretation of formulas given above is shown on the Fig. 15.

A graphic method is recommended for the irregular deposit; it is described in part 6 (Fig. 17 and 18).

For the flat deposit it is necessary to determine the ratio of overburden to ore or coal (not a depth of open pit); therefore the formula (46) must be used.

Factor $\frac{1}{1+\frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta}}$ takes into consideration the angle of dip and slope of open pit.

It is proposed to use the formulas given in this paper for determination the limit of open pit in several vertical sections of orebody.

Then total economy of expenses can be found by formula (29).

On the basis of this figures it will be possible to make more definite conclusion about the profit of open pit mining.

In the part 8 of this paper a few examples of this method are illustrated.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Надо читать
42	11 сверху	it is difficult	it is not difficult