



Горн. инж. М. П. БРОДСКИЙ

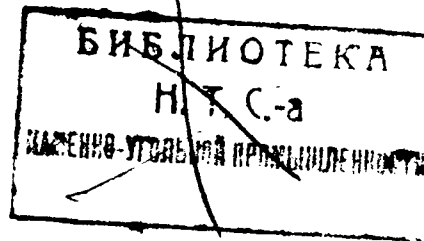
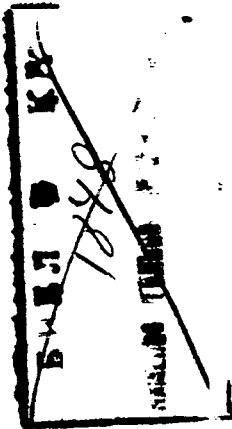
622.287  
Б 88

НОВАЯ ТЕОРИЯ

Э43

# ДАВЛЕНИЯ ПОРОД НА ПОДЗЕМНУЮ КРЕПЬ

1383



0 НОЯ. 1948

ОПТИ НКТИ СССР

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ  
ГОРНО-ГЕОЛОГО-НЕФТЯНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКВА • ЛЕНИНГРАД • НОВОСИБИРСК

Г—10—5—2

прот ТКК № 125

К печати подготовили

Редактор Г. Томлин

Технический редактор Н. Н. Руриковский

ГОС. ПУБЛИЧНАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
БИБЛИОТЕКА СССР

10071  $\frac{6}{60}$

↓  
4153

Сдано в набор 12/X 1933 г.

Подписано к печати 16/XI 1933 г.

Формат 69 × 94  $\frac{1}{16}$ .

Тираж 3.000 экз.

Знаков в 1 печ. л. 48000.

Горгенфтисиздат № 156/85.

Объем 4  $\frac{1}{2}$  л.

Заказ № 1621.

Уполн. Главлита № В-71352.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	5
<b>I. ШТОЛЬНООБРАЗНЫЕ ВЫРАБОТКИ</b>	
1. Критический обзор существующих теорий и исследование вопроса .	7
2. Штольнообразные выработки в рыхлых породах . . . . .	17
3. Штольнообразные выработки в устойчивых породах . . . . .	26
<b>II. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ВЫРАБОТКИ</b>	
4. Критический обзор существующих теорий и исследование вопроса .	35
5. Давление на крепь вертикальных выработок в рыхлых породах . . .	39
6. Вертикальные выработки в рыхлых породах . . . . .	40
7. Вертикальные выработки в устойчивых породах . . . . .	47
<b>III. РАСЧЕТ КРЕПЛЕНИЯ</b>	
8. Крепление дверцами окладами в рыхлых породах . . . . .	51
9. Крепление в переходной породе . . . . .	55
10. Крепление в устойчивых породах . . . . .	57
11. Сводчатое крепление штольнообразных выработок. Крепление тоннеля . . . . .	58
12. Расчет крепления вертикальных выработок круглого сечения . . . .	67
13. Расчет крепления вертикальных выработок прямоугольного сечения . . . . .	68

## ПРЕДИСЛОВИЕ

С момента появления в свет труда проф. М. М. Протодьяконова „Давление горных пород на рудничную крепь“<sup>1</sup> прошло более 26 лет, и с тех пор, как нам известно, в русской горной литературе не было опубликовано ни одной работы, которая разрешила бы важнейший в горном искусстве вопрос о законах явлений, происходящих в породах при проведении горных выработок.

Как и до появления указанного труда, проектировщик при проектировании шахтного строительства продолжает оставаться беспомощным в вопросе об установлении размеров необходимой крепи, так как, в сущности, теории о давлении горных пород не существует.

Сам проф. Протодьяконов в предисловии к своей работе отмечает: „До сих пор в горной литературе я не встречал автора, который задавался бы подобной задачей“, и выражает опасение, что его теории рискует не угодить и практикам и теоретикам, так как при разрешении означенной задачи он выбрал не путь строгого математического анализа, а „средний путь—полуэмпирический, полурациональный“<sup>2</sup>. Что опасение проф. Протодьяконова оказалось основательным, в этом можно убедиться при решении конкретных примеров по его теории. Кто из горняков, производивших такой расчет, не знает, что получаемые при этом совершенно невероятные результаты можно приблизить к опытным данным, лишь вводя практические „поправки“, удваивающие и даже утраивающие в одну или другую сторону данные, полученные путем теоретического расчета.

Предлагаемая новая теория давления пород на подземную крепь на основе подробного анализа явлений, происходящих в породах при проведении подземных выработок, имеет своей задачей вскрыть законы, коим подчиняются эти явления, и тем заполнить существеннейший пробел в горном деле.

При разрешении поставленной задачи автор придерживался такого порядка. Вначале были подвергнуты исследованию явления, происходящие при проведении выработок в рыхлых, сыпучих породах; здесь все подлежащее учету элементы вполне надежны, не вызывают никаких сомнений и могут быть проверены на опыте. Затем анализу подвергались явления в устойчивых породах.

Такой порядок исследования оказался весьма продуктивным, так как он дал возможность установить общие законы, свойственные устойчивым и неустойчивым породам, и привел к ряду важных выводов, из которых перечислю главные:

<sup>1</sup> Проф. М. М. Протодьяконов. Давление горных пород на рудничную крепь. Екатеринослав 1907.

<sup>2</sup> Там же, предисловие автора.

- 1) независимость величины давления пород на крепь штольнеобразных выработок от глубины их заложения;
- 2) выгоднейшая форма свода при креплении бетоном, кирпичом и другими материалами;
- 3) максимальное давление пород, могущее встретиться при проведении выработок в устойчивых породах;
- 4) постоянство давления пород на крепь подземных вертикальных выработок и др.

Излишне говорить о том, что выводы эти имеют принципиально важное значение для техники горного дела, меняя в корне существовавшее ранее представление о законах давления пород и размерах крепления выработок.

Особенно это относится к вертикальным выработкам, в которых размер давления пород связывался раньше с глубиной их, в зависимости от чего рассчитываемая толщина крепи обычно увеличивалась по мере углубления этих выработок.

Удалось ли мне разрешить поставленную задачу или предлагаемую теорию постигнет участь других теорий, трактующих этот же вопрос, которые при свете новых изысканий и практических данных оказались несостоятельными, — покажет будущее. Мы же питаем уверенность, что компетентный читатель, ознакомившись с настоящим трудом, убедится в том, что автор в процессе работы не руководствовался предвзятыми выводами, а это является тем обстоятельством, которое освобождает исследователя от необходимости притягивать истину, так сказать, „за волосы“.

В настоящей работе практические данные хотя и служили для проверки математического анализа и теоретических выводов, однако нигде аналитический расчет не „подогнан“ под практические данные.

Выражаю свою глубокую благодарность проф. А. М. Терпигореву за его ценные замечания, которые были учтены мною в настоящем труде.

А В Т О Р

# I. ШТОЛЬНООБРАЗНЫЕ ВЫРАБОТКИ

## 1. КРИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕОРИЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСА

Вопрос о размерах крепи, возводимой в подземных выработках в зависимости от давления на нее горных пород, вводит нас в наименее изученную область горного искусства. Нельзя сказать, чтобы это обстоятельство объяснялось недостатком исследований или чтобы вопрос не представлял большого практического интереса. Проф. Протодьяконов в своем труде „Давление горных пород на рудничную крепь“<sup>1</sup> ссылается на 49 источников. Если к этому добавить труд д-ра-инж. Comerell'a и Lucas'a (Комерелля и Люкаса), статьи проф. Романовского в „Горном журнале“ (№ 33 и 41 за 1900 г.), где описаны результаты обследований многих специалистов, то станет ясно, что в попытках дать удовлетворительный ответ на этот вопрос недостатка не было. Что касается практического интереса данного вопроса, то мы не считаем нужным распространяться о нем ввиду его явной очевидности.

Однако, несмотря на большое число обследований, эту область горного искусства следует считать совершенно неизученной, что можно объяснить лишь сложностью вопроса, отсутствием сведений о системах напряжений, действующих на крепь в зависимости от крепости пород, глубины выработок и др., трудностью классификации пород по признаку их устойчивости, отсутствием какой бы то ни было закономерности в наблюдающихся на практике явлениях, сопровождающих обрушение крепи, затруднительностью производства непосредственного опытного наблюдения и т. д.

Вот почему проектировщик при проектировании шахтного строительства вынужден определять толщину крепи на основании практических данных, так как если бы он вздумал обратиться к существующим теориям, то натолкнулся бы на большое разнообразие методов расчетов, притом основанных на совершенно противоречивых принципах.

Исключительное значение приобретает этот вопрос при расчетах крепления ответственных подземных выработок большого сечения (тоннелей, метрополитенов, рудничных дворов, насосных и других камер и пр.) как по тяжелым последствиям, могущим повлечь обрушения неправильно рассчитанной, а потому недостаточно надежной, крепи, так и по трудности работ, связанных с восстановлением таких выработок в случае их обвала.

Этим объясняется то обстоятельство, что наибольшее число исследований принадлежит авторам трудов о способах постройки тоннелей и метрополитенов;

<sup>1</sup> М. М. Протодьяконов. Давление горных пород на рудничную крепь. Екатеринбург 1907.

при этом вопросу о давлении на крепь тоннеля уделено самое большое (а в некоторых случаях исключительное) внимание.

При обзоре соответствующей литературы бросается в глаза особенно большое столкновение мнений по вопросу о том, в какой мере на крепь подземной выработки влияет глубина ее заложения.

Так как этот вопрос является одним из наиболее спорных, мы остановимся на выразителях двух противоположных и промежуточной точек зрения.

Проф. М. М. Протодьяконов, как это видно из первой части его упомянутого выше труда <sup>1</sup>, в обзоре литературы вопроса утверждает, что с большей глубиной штольнообразной выработки давление на ее крепь увеличивается. Однако ни в один из выводов формул, относящихся к штольнообразным выработкам, не входит глубина их заложения. Это явное противоречие не находит себе объяснения ни в цитируемом труде, ни в последующих опубликованных им статьях и трудах по этому вопросу.

Весьма разноречивы мнения авторитетов, цитируемых в труде д-ра инж. Комерелля <sup>2</sup>.

Sulman (К. Кульман), например, категорически утверждает, что чем глубже заложена выработка от дневной поверхности, тем давление породы на ее крепь больше; однако же он вынужден признать, что на больших глубинах, на основании такого допущения, постройка тоннелей была бы вовсе невозможна <sup>3</sup>.

К такому же выводу приходит и Гейм, в результате анализа явлений, наблюдавшихся при проведении Сямплонского тоннеля, описанных Вильманом <sup>4</sup>.

Между этими двумя противоположными точками зрения промежуточное место занимает точка зрения Bierbaumer'a (Бирбаумера) <sup>5</sup> (рис. 1).

По Бирбаумеру, если через  $b$  обозначим ширину штольнообразной выработки, через  $h$  — расстояние ее от дневной поверхности и через  $\gamma$  — вес 1 м<sup>3</sup> породы, то не весь вес толщи породы  $g = bh\gamma$ , доходящей до дневной поверхности, давит на крепь. Действительное давление меньше вследствие противодействия, обусловленного трением, вызываемым боковым давлением пород.

Вес  $bh\gamma$  необходимо поэтому умножить на некоторый коэффициент  $\theta < 1$ , зависящий от глубины заложения выработки от дневной поверхности и от угла трения породы  $\delta$ .

Поэтому

$$P = g\theta = \theta bh\gamma.$$

Для определения коэффициента  $\theta$  Бирбаумер дает следующее выражение:

$$\theta = 1 - \frac{\Delta h}{\frac{\Delta h + b}{2} + \sqrt{\left(\frac{\Delta h + b}{2}\right)^2 - ht^2}}$$

<sup>1</sup> М. М. Протодьяконов. Давление горных пород на рудничную крепь. Екатеринбург 1907, стр. 43.

<sup>2</sup> Statische Berechnung von Tunnelmauerswerk.

<sup>3</sup> Die graphische Statik.

<sup>4</sup> Geologische Nöchlese.

<sup>5</sup> Die Dimensionierung des Tunnelmauerswerkes.



где  $h$  — глубина выработки,  
 $t$  — внешняя высота выработки,  
 $b$  — ширина ее,

$$= \operatorname{tg} \left( 45 - \frac{\rho}{2} \right), \quad \Lambda = \tau^2 \operatorname{tg} \rho,$$

$\rho$  — угол трения.

Из этого выражения определяют  $\theta$ .

Умножением  $\theta$  на  $h$  и на  $b\gamma$  определяют тот фактический, по Бирбаумеру, вес объема породы, с которым необходимо считаться при расчете размеров крепления.

Исследование с помощью приведенных выражений величины коэффициента  $\theta$  приводит к следующим результатам.

С увеличением глубины заложения выработки от дневной поверхности  $\theta$  уменьшается и, таким образом, влияние глубины заложения по мере углубления непрерывно падает. Лишь с глубины 200 м и больше для пород соответственно их углам естественного откоса и ширине выработки, например 5 м, оно достигает:

$\rho = 15^\circ$	$20^\circ$	$25^\circ$	$30^\circ$	$35^\circ$	$40^\circ$	$45^\circ$
$\theta = 0,35$	0,24	0,17	0,11	0,07	0,05	0,03

Эти значения для  $\theta$  Бирбаумер считает минимальными, т. е. с глубины, большей 200 м,  $\theta$  не меняется, и, следовательно, давление на крепь подземной выработки по мере увеличения вертикального расстояния ее от дневной поверхности непрерывно возрастает.

Если определить по приведенной формуле высоту объема давящей породы для одной и той же выработки, но заложеной на разных глубинах, то обращает на себя внимание отсутствие закономерности в возрастании давления в зависимости от глубины.

Так, если определить высоту объема давящей породы для выработки, длина пролета которой 5 м и высота 10 м, проводимой по породам с естественным откосом  $\rho = 30^\circ$ , то для глубины 50 м по Бирбаумеру имеем:

$$\tau = \operatorname{tg} \left( 45^\circ \frac{\rho}{2} \right) = 0,58;$$

$$\Lambda = \tau^2; \operatorname{tg} = 0,18;$$

$$\theta = 1 - \frac{\lambda h}{\frac{\Lambda h + a}{2} + \sqrt{\frac{(\Lambda h + a)^2}{2} + \tau^4 h t}}$$

$$= 1 - \frac{0,18 \cdot 50}{\frac{9 + 5}{2} + \sqrt{49 + 50 \cdot 10 \cdot 0,116}} = 0,48.$$

Высота объема давящей породы

$$h_1 = h\theta = 50 \cdot 0,48 = 24 \text{ м.}$$

Определяя эту высоту для разных глубин, получаем:

Глубина $h$ , м	$\theta$	$h_1$	Высота давящ. объема, м	Возраста- ние дав- лен. %
50	0,48		24,0	
60	0,44		26,4	110
70	0,41		28,7	108
80	0,38		30,5	106
90	0,36		32,4	105
100	0,34		34,0	108

Мало вероятно, чтобы возрастание давления с 50 до 80 м сначала падало бы, с тем, чтобы с глубины 100 м начать снова увеличиваться. Такие колебания возрастания давления мы установили на многочисленных примерах.

Лишь для пород с небольшими углами естественного откоса, не превышающими  $30^\circ$ , для выработок сравнительно небольшого сечения, заложенных на разной глубине, не превышающей 40 м, наблюдается некоторая закономерность в возрастании этого давления.

Независимо от того, оказывает ли глубина заложения подземной выработки влияние на величину давления пород на ее крепь, стоит вопрос о зоне распространения области разрушенных пород над выработкой при обрушении крепи, т. е. вопрос о том, какую часть объема породы, окружающей выработку, следует считать активной.

Здесь подлежат разрешению два вопроса:

- 1) какова высота объема давящей на крепь породы и
- 2) каковы очертания границ области разрушенных пород над подземной выработкой.

Совершенно очевидно, что крепь выработки, проведенной в крепких породах, испытывает меньшее давление, чем в рыхлых, и, стало быть, объем давящей породы здесь меньше, чем в породах рыхлых.

Отсюда вытекает необходимость классифицировать породы по их крепости. А так как характерным признаком для суждения об устойчивости пород служит свойственный рыхлой породе угол естественного откоса, то и классификация этих рыхлых пород производится по означенному признаку.

Однако, обращаясь к этой характеристике, мы наталкиваемся на ряд разногласий в методах оценки крепости пород отдельными исследователями, разногласий, вполне понятных ввиду многочисленности факторов, влияющих на устойчивость не только различных пород, но даже одной и той же породы.

Комередль, Люкас и ряд других приводимых в их трудах исследователей означенного вопроса разграничивают все породы на две группы:

- 1) рыхлые с разными углами естественных откосов от  $0$  до  $45^\circ$  и
- 2) скалистые (feste Felsen) с углом естественного откоса, равным  $45^\circ$ , независимо от большей или меньшей их крепости.

Проф. М. М. Протодьяконов, придерживающийся классификации пород по проф. Rzicha (Ржиха), подразделяет их на группы с углами естественного откоса от  $0$  до  $90^\circ$ .

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что характеристика рыхлых пород у всех упомянутых исследователей совпадает.

Это обстоятельство приводит нас к заключению, что лишь для рыхлых пород угол естественного откоса установлен вполне надежно ввиду возможности проверки этого угла на непосредственном опыте; что же касается второй группы пород — пород устойчивых, то разногласия в оценке их крепости становятся вполне понятными, если принять во внимание те разнообразные факторы, которые влияют на их устойчивость.

В № 1 „Горного журнала“ за 1927 г. проф. Протодыяконов говорит о том, что углы откоса для устойчивых пород и, стало быть, коэффициенты трения для них, принятые в его теории, „в основе своей взяты готовыми у проф. Ржиха“; классификация же устойчивых пород по признаку их условных углов откоса для Донбасса потребовала некоторых вдополнений и исправлений, основанных на наблюдении и опыте.

Угол откоса для твердых пород — величина условная; для всех устойчивых пород, как бы крепки они ни были, угол естественного откоса является величиной постоянной и равен, как мы видели,  $45^\circ$ . Против такого взгляда возражать трудно, так как как бы устойчива ни была порода, она, имея неестественный откос, будет разрушаться более или менее быстро — в зависимости от ее крепости — до тех пор, пока не примет угла естественного откоса, равного  $45^\circ$ .

Но для установления условных углов откосов никакие наблюдения, никакой опыт в горном деле не могут оказаться действительными, так как, во-первых, на устойчивость пород, как мы видели, влияет так много различных факторов, имеющих каждый сам по себе столь важное значение, что если бы и удалось произвести наблюдение над разрушением какой-нибудь породы, то распространить этот опыт на все другие такие же породы никак нельзя: совершенно невозможно представить себе наличие всех факторов, влияющих на устойчивость испытываемой породы, у других, даже одноименных пород. А, во-вторых, если величины углов откосов определены путем наблюдений<sup>1</sup>, то крайне важно установить момент такого наблюдения, — совпал ли он с моментом придания породе неестественного угла откоса, или наблюдение произведено впоследствии. Время играет решающую роль в данном вопросе, и дать ответ, какой именно откос следует признать правильным для характеристики устойчивости данной породы, — тот, который образовался немедленно, или тот, который образуется спустя час, день, неделю и т. д., — никакая практика не в состоянии.

Поэтому мы в отличие от всех теоретиков по данному вопросу отказались в нашей теории от метода определения степени устойчивости пород в зависимости от условного угла для группы так называемых устойчивых пород.

Выводит ли всех исследователей на путь точного анализа явлений давления пород, происходящих при проведении подземных выработок, установление по тому или иному признаку степени крепости и устойчивости пород?

Для определения распространения зоны разрушенных пород и очертания границ ее над выработкой при обрушении крепи, без чего расчет размеров крепи совершенно немыслим, существуют десятки самых противоречивых теорий и гипотез.

Выше мы ознакомились с теорией Бирбаумера, теорией, которую сле-

<sup>1</sup> Об этом говорится в статье проф. Протодыяконова в августовском номере „Горного журнала“ за 1909 г.

дует отвергнуть при расчетах крепления выработок, заложенных на глубине от поверхности, превышающей 40 м, и проведенных по породам, достаточно рыхлым.

Engesser (Энгессер) также связывает глубину заложения выработки с величиной давления породы на ее крепь<sup>1</sup>.

Для определения величины давления на крепь выработки он выводит следующее выражение:

$$R = b_2 \gamma \left( \frac{h \operatorname{tg} \left( \frac{90 - \rho}{2} \right)}{2h \operatorname{tg} \rho + b \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90 - \rho}{2} \right)} + \frac{\operatorname{tg} \rho}{6} \right),$$

где  $b$  — ширина выработки,  
 $\gamma$  — вес единицы породы,  
 $h$  — глубина выработки.

Однако для больших глубин и для пород со значительным углом трения Энгессер влияние глубины отрицает и размеры давления определяет вне зависимости от глубины ( $h$ ), а именно:

$$R = b^2 \gamma \left[ \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90 - \rho}{2} \right) \frac{\operatorname{ctg} \rho}{2} + \frac{\operatorname{tg} \rho}{6} \right].$$

Проверяя последнюю формулу на отдельных примерах, Комерелль приходит к заключению, что определенные по Энгессеру силы, действующие на крепь выработки, оказываются очень малыми, вследствие чего рассчитанная по этим формулам крепь выработки также получается крайне слабой.

Чтобы закончить рассмотрение известных нам источников в части, касающейся определения сил, действующих на крепь выработок в так называемых связных породах, мы остановимся, по возможности кратко, на теории проф. Протодяконова<sup>2</sup>.

Как известно, М. М. Протодяконов на основании опытных данных констатирует, что при обрушении крепи не вся порода до дневной поверхности обрушивается в выработку даже в том случае, если она представляет собой простую закладку, а что на некоторой высоте над последней образуется свод, как бы принимающий на себя давление остальной породы до дневной поверхности.

Отсюда он заключает, что поверхность этого свода есть кривая возможного равновесия сил трения между частицами давящих пород и весом самой породы над выработкой.

Окончательные выводы, к которым он приходит на основании этих рассуждений и из рассмотрения взаимодействия частиц породы друг на друга, сводятся к тому, что свод ограничен параболической кривой и что высота его

$$b = \frac{a}{2f},$$

где  $b$  — высота параболы давящей породы,  $a$  — полупролет выработки и  $f$  — тангенс угла трения (коэффициент трения) для данной породы.

<sup>1</sup> Ueber den Erddruck gegen innere Stützende, S. 91.

<sup>2</sup> Давление горных пород на рудничную крепь. Екатеринбург 1907; см. также „Горный журнал“, 1909, № 3, стр. 220 — 231.

Чтобы приблизить получающиеся по означенной формуле крайне недостаточными результаты вычисленных размеров крепления к практическим, проф. Протодяконов вводит коэффициент 2, и формула принимает вид:

$$b = \frac{a}{2}.$$

В новой статье, опубликованной в „Горном журнале“<sup>1</sup>, проф. М. М. Протодяконов вводит в формулу дополнительный коэффициент 2 ( $2 \times 2 = 4$ ), очевидно, признавая недостаточным ранее введенный коэффициент 2.

После введения двух коэффициентов (2 и 2) результирующая формула может рассматриваться как эмпирическая только в том лишь случае, если, как об этом говорит в той же статье проф. М. М. Протодяконов, результат расчетов по ней совпадает с опытом. Ниже мы будем еще иметь возможность установить причину расхождения теоретического вывода этого исследователя с практикой.

Итак проф. Протодяконов, Бирбаумер и все другие исследователи, отстаивающие ту точку зрения, что давление породы на крепь подземных штольнообразных выработок не зависит от глубины их или что зависимость эта сохраняется лишь до известной глубины, совершенно не устанавливают тех причин, под влиянием которых объем породы, приходящийся над выработкой, не погружается в нее и не давит всей своей массой на свод штольнообразной выработки.

По Бирбаумеру сдвигание этого объема нейтрализуется напряжением, возникающим от трения в плоскостях скольжения между этим объемом и окружающей, так сказать, пассивной боковой породой.

Совершенно очевидно, что это напряжение не может быть постоянным на всем протяжении от свода выработки до дневной поверхности, так как при постоянстве этого напряжения и постоянстве веса элементов давящего объема породы, приходящегося над выработкой, последний либо сдвигался бы целиком в выработку, либо вовсе не оказывал бы никакого давления на ее крепь.

В действительности при поломке крепи в выработку погружается лишь часть этого объема, ближайшая к ее своду.

Какие же силы удерживают остальные части этого объема? Каковы законы изменения этих сил, каковы их величины и направление? Вот вопросы, на которые не дает ответа ни один из исследователей вопроса, не исключая и Бирбаумера.

Проф. Протодяконов, основываясь на том, что при обрушении выработки над ней образуется свод, поверхность которого представляет собою, повидимому, кривую равновесия всех сил, — сил, заметим кстати, ему неизвестных, считает, что сдвигание давящего объема парализуется „нажатием“ частиц в этом своде в пределах самого объема давящей породы.

Это определение также ничего не объясняет.

Действительно, если „нажатие“ частиц имеет место в пределах объема давящей породы, приходящегося над выработкой, то почему свод образуется лишь на определенной высоте от выработки? Ниже этого свода порода обрушивается в выработку, остальная же часть поддерживается этим сводом и не оказывает давления на крепь.

Совершенно очевидно, что решать поставленную задачу путем одного

<sup>1</sup> „Горный журнал“ № 2, 1925.

лишь признания существования кроме силы тяжести толщи породы, приходящейся над выработкой, других сил, вступающих во взаимодействие с первой, без учета этих сил в формулах, определяющих давление на крепь выработки, — равносильно тому, чтобы решать уравнение со многими неизвестными при наличии одного лишь условия.

Мы должны признать, что кроме силы тяжести породы, приходящейся над выработкой, боковые породы при обрушении выработки не остаются пассивными; при этом вызываемое ими боковое давление, во-первых, не действует непосредственно на крепь выработки, а вступает во взаимодействие с силой тяжести толщи породы над выработкой и, во-вторых, что это боковое давление не остается постоянным на всем протяжении от свода выработки до дневной поверхности.

Мы видим, что отсутствие сведений о величине и о законах изменения бокового давления, в зависимости от твердости пород и от вертикального расстояния между выработкой и поверхностью, является тем основным обстоятельством, наличие которого вызывает обилие самых разнообразных и самых противоречивых мнений по вопросу о влиянии глубины заложения выработок на величину давления, да и вообще в вопросе о давлении пород на рудничную крепь.

Как указывалось выше, боковое давление одних и тех же пород над одной и той же выработкой не есть величина постоянная на всем протяжении от свода этой выработки до дневной поверхности; это мы заключаем из того, что при обрушении крепи имеет место

осадка не всего находящегося над выработкой объема породы, а только части его — ближайшей к ее своду.

Поэтому мы можем сделать весьма важный вывод, имеющий в нашей теории большое значение, что боковое давление пород на толщу, приходящуюся непосредственно над выработкой, по мере удаления от выработки в направлении к дневной поверхности увеличивается и, складываясь с давлением элементов вертикального объема, приходящегося над сводом выработки, в результате дает все уменьшающиеся силы вплоть до того пункта, где они достигнут нуля.

Итак, отсутствие сведений о законах изменения бокового давления приводит, как мы видели, Бирбаумера к необходимости введения в его расчетные формулы сложных выражений для  $\theta$ , которые в конечном результате все же не дают правильного решения вопроса. То же можно сказать о других теориях, отличающихся от упомянутой лишь более или менее остроумной комбинацией величины  $\rho$  и расстояний между дневной поверхностью и выработкой, но все же оставляющих вопрос о напряжениях, действующих на крепь подземных штольнообразных выработок, совершенно открытым.

Нам нет нужды останавливаться подробно и перечислять все работы по интересующему нас вопросу, появившиеся до последнего времени, так как в большинстве случаев каждая новая работа подвергает критическому анализу все предшествующие.

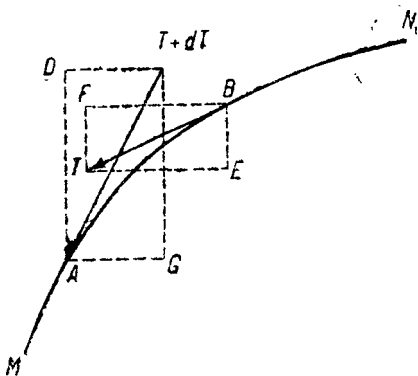


Рис. 2.

Поэтому мы ограничимся здесь лишь краткой оценкой метода определения давления породы на крепь штольнеобразных выработок, применяемых проф. Протодяконовым, так как, несмотря на популярность его, насколько нам известно, она до настоящего времени не подвергалась критике в соответствующей литературе<sup>1</sup>. Проф. Протодяконов пытается дать математический анализ вопроса. Посмотрим, к чему он приводит.

Чтобы не повторять известных формул, приведенных в его трудах, мы остановимся лишь на интересующих нас в данном случае (рис. 2). Обозначая глубину заложения выработки от дневной поверхности через  $H$  и вес единицы объема породы через  $\delta$ , он определяет вес бесконечно узкого объема породы, давящей на свод выработки:

$$dp = \delta H \cdot dx.$$

Под влиянием давления поод частицы в своде будут прижаты друг к другу.

Силу этого „нажатия“ проф. Протодяконов обозначает на части кривой свода  $MN_1$  в точке  $A$  через  $T + dT$  и в элементарном от нее расстоянии на той же кривой — в точке  $B$  через  $T$ . Направление этих сил нажатия совпадает, конечно, с касательными в этих точках.

Из того условия, что при устойчивости свода проекция всех сил на оси  $x$ -ов должна быть равна 0, проф. М. М. Протодяконов заключает, что равны между собой и горизонтальные проекции сил  $T$  и  $T + dT$  —  $AG$  и  $BF$  и что вообще во всякой точке кривой свода горизонтальная составляющая есть постоянная величина.

Основываясь на этом, проф. М. М. Протодяконов приходит к заключению, что образующийся над выработкой свод при обрушении крепи имеет параболическую форму и что высота этого свода

$$b = \frac{a}{2f}.$$

Таким образом мы видим, что эта задача со многими неизвестными (неизвестны форма кривой свода, силы, слагающиеся с давлением  $P$  вертикального столба породы над сводом выработки, и вовсе неизвестны силы, уравновешивающие это давление) решена при помощи одного лишь даного — вертикального давления  $P$ .

Очевидно, нельзя согласиться с приведенным способом решения поставленной задачи, как нельзя согласиться и с тем, что „нажатие“ в точке  $A$  изображается одной силой  $T + dT$ , а в  $B$  — силой  $T$ .

Ведь выражение „нажатие“ в каждой точке предопределяет наличие в этой точке по меньшей мере двух сил, а не одной. Проекция совокупности этих сил в каждой точке кривой свода на оси  $x$ -ов равна 0, а не проекции горизонтальных составляющих каждой одной силы в любой точке свода. Чтобы эти проекции горизонтальных составляющих всех сил, действующих во всех пунктах свода, были равны между собой, необходимо заранее задаться условием, а не доказывать, что свод над выработкой имеет параболическую форму.

<sup>1</sup> Статья проф. Динника в № 7 „Инженерного работника“ за июль 1925 г. опровергает теорию проф. Протодяконова в части, касающейся определения давления на крепь вертикальных выработок. В этой статье проф. Динник констатирует, что отдельные случаи совпадения теоретических выводов проф. Протодяконова с практикой объясняются лишь удачно подобранными коэффициентами.

В труде „Материалы для урочного положения горных работ“<sup>1</sup> проф. М. М. Протодяконов дает довольно скромную оценку своей теории, цитированной выше, называя выводы из нее „неточным законом природы“ и „рабочей гипотезой“. Однако, он тут же приводит следующее новое доказательство того, что свод обрушения имеет параболическую форму.

Это новое доказательство сводится к следующему.

На произвольную часть свода  $MO$  (рис. 3), образующегося при обрушении крепи штольнообразной выработки, действует:

- 1) в точке  $O$  — горизонтальная реакция  $T$  правой части свода;
- 2) посредине абсциссы  $X$  проходит равнодействующая  $PX$  вертикального давления на горизонтальную проекцию  $X$ , если на единицу действует давление  $p$ ;
- 3) в точке  $M$  — касательная реакция  $W$  нижней части свода.

Момент силы  $T$  относительно точки  $M$  —  $Ty$ .

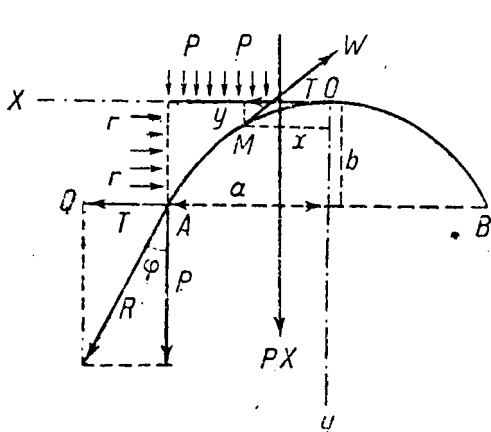


Рис. 3.

$$\text{Момент силы } px = \frac{px^2}{2}.$$

Момент силы  $W = 0$ , значит

$$\frac{px^2}{2} = Ty.$$

Это есть уравнение параболы.

Пользуясь этим выводом, проф. Протодяконов приходит к тому же заключению, которое приведено выше, т. е. что

$$b = \frac{a}{2f}.$$

И здесь легко доказать, что вывод сделан неверно.

Действительно, пусть выработка находится от поверхности на расстоянии  $b = \frac{a}{2f}$ , определенном проф. Протодяконовым; тогда совершенно

очевидно, что высота давящего объема меняется в пределах от 0 до  $\frac{a}{2f}$ ; соответственно меняется и  $p$ , стало быть, мы не имеем относительно точки  $M$  момента силы  $\frac{px^2}{2}$ .

Означенный момент силы может иметь место лишь тогда, когда свод имеет не параболическую форму, а когда он совершенно отсутствует.

Таким образом, поставленная задача с данными, коими оперирует проф. М. М. Протодяконов, не могла быть разрешена, и попытка его в этом направлении не увенчалась успехом.

Мы видели выше, что из этих сил нам известна лишь сила, действующая вниз (вес объема над выработкой), и коэффициенты трения пород.

Совершенно неизвестно боковое давление пород, от которых зависит трение вызывающее напряжения, направленные в противоположную направлению вертикального столба породы сторону.

В направлении определения этих сил мы и поведем наши исследования.

<sup>1</sup> Изд. ЦК горнорабочих СССР, Москва 1925, ч. II, стр. 1, „Крепление“, стр. 6.



## 2. ШТОЛЬНООБРАЗНЫЕ ВЫРАБОТКИ В РЫХЛЫХ ПОРОДАХ

Свои исследования (мы начнем следующими общими предпосылками, которые положим в основу расчетов:

1) будем считать, что углы естественных откосов для „несвязных“ пород, какими, например, являются песок галечник и все другие, для которых этот откос не превышает  $45^\circ$ , установлены вполне надежно;

2) давление всего объема породы, приходящегося над выработкой, равно весу этого объема, высота коего доходит до дневной поверхности (вес этого объема, а не давление на крепь);

3) боковое давление, противодействующее вертикальному давлению толщи породы, приходящейся над выработкой, увеличивается по мере удаления от этой выработки в направлении к дневной поверхности (см. стр. 14).

Основываясь на этих принципах, мы следующим аналитическим способом определяем искомые силы, действующие на крепь подземных выработок, для расчета величины давления и размеров их крепления.

Пусть мы имеем подземную выработку  $ABCD$  (рис. 4) на вертикальной глубине  $h$  от дневной поверхности.

Представим себе далее, что мы вздумали освободить потолок выработки  $DC$  от давления приходящегося над ним призматического объема породы  $DOMC$ .

Если для этого начнем извлекать тот вертикальный объем породы, который приходится над выработкой, то едва только мы начнем, например, выбирать часть  $OILM$  этого объема, обнаружатся искомые боковые силы, ранее уравновешенные реакцией стенок столба  $OILM$ , теперь освобожденные и потому совершающие работу, выражающуюся в перемещении частиц боковой породы по наклонным площадкам  $KI$  и  $TL$ , представляющим собою естественные откосы. Это перемещение будет продолжаться до тех пор, пока углы  $KIZ$  и  $TLF$  не станут равны углам естественных откосов для данной породы<sup>1</sup>.

Итак, мы обнаружили существование боковых сил, под влиянием которых сдвигаются по наклонным плоскостям  $KI$  и  $TL$  призмы  $KIO$  и  $TLM$ .

Продолжая выбирать дальше столб  $ODCM$ , мы обнаружим, что боко-

<sup>1</sup> Ввиду того что в дальнейших рассуждениях, связанных с выводами кривых обрушения, мы имеем дело с объемами прямых призм (прямоугольных параллелепипедов и прямоугольных призм), боковые ребра которых перпендикулярны плоскости чертежа и равны 1, — для облегчения чтения работы эти тела обозначены фигурами их оснваний. Фигуры, являющиеся прямоугольниками, плоскости которых перпендикулярны плоскости чертежа, а одна из сторон лежит в плоскости чертежа, обозначены этими сторонами. Плоскости, перпендикулярные плоскости чертежа, обозначены на чертеже следами их.

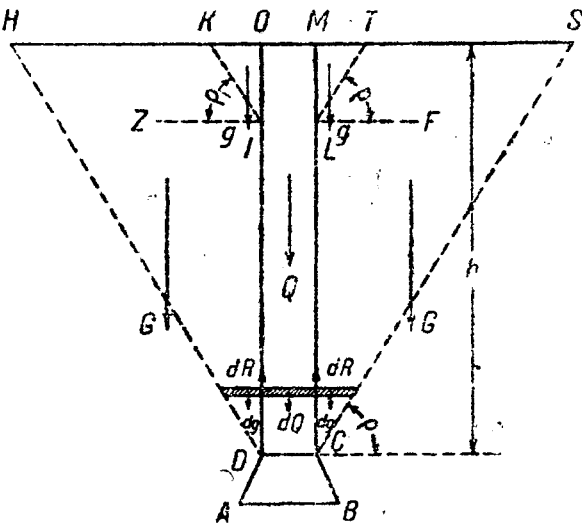


Рис. 4.

вые призмы увеличиваются, а в связи с этим увеличиваются их веса  $G$  и  $G$ .

Когда будет выбран весь вертикальный объем  $ODCM$ , силы  $G$  и  $G$  будут представлять собою веса призматических объемов  $HOD$  и  $SMC$ .

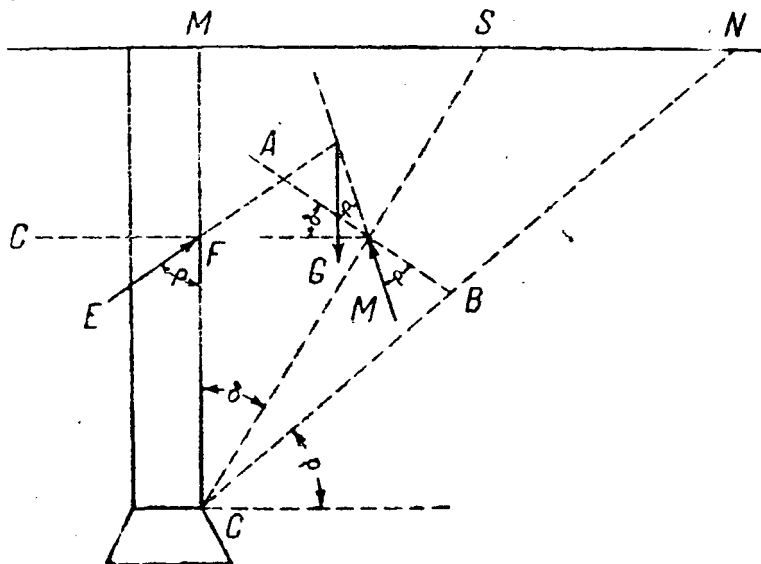


Рис. 5.

Отсюда мы заключаем, что давящую породу над подземной штольнюобразной выработкой необходимо рассматривать как состоящую из трех активных объемов: объема  $ODCM$ , приходящегося непосредственно над выработкой, и объемов  $HOD$  и  $SCM$ , сдвигающихся по наклонным плоскостям  $HD$  и  $SC$  и давящих на вертикальный столб  $ODCM$ , создавая трение в плоскостях скольжения  $OD$  и  $MC$ .

Таким образом, на крепь выработки приходится давление, представляющее собою разность из  $Q$  — веса объема породы  $OMCD$  — и сопротивления, зависящего от коэффициента трения (тангенса угла естественного откоса), свойственного данной породе, и бокового давления, вызываемого силами  $G$  и  $G$ .

Как известно из статики сооружений, при давлении грунта на подпорную стенку, в случае отклонения последней, позади нее образуется плоская поверхность скольжения  $SC$  (рис. 5), по которой происходит обрушение призмы  $SCM$ .

Обозначим временно угол, образуемый этой плоскостью скольжения с вертикалью, через  $\delta$ . На призму действуют три находящиеся в равновесии силы — сопротивление

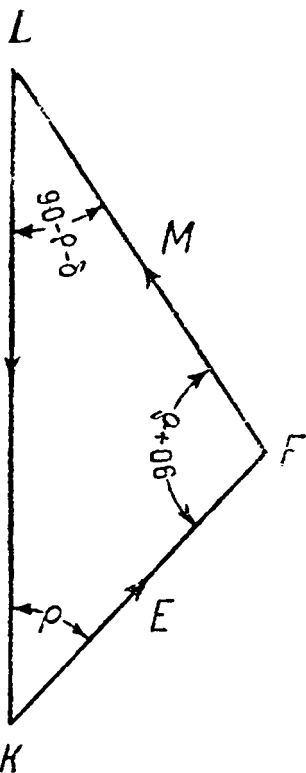


Рис. 5а.

пассивной массы земли  $M$ , вес призмы  $G$  и реакция плоскости  $MC—E$ .

При этом направление силы  $M$  образует с нормалью  $AB$  к плоскости скольжения  $SC$  угол  $\rho$ , равный углу естественного откоса; направление силы  $E$  образует тоже угол трения с нормалью, совпадающей с направлением плоскости  $MC$ .

Кроме того, как видно из чертежа, направление  $G$  образует с  $M\bar{\xi}$  угол  $(90^\circ - \rho - \delta)$  и с  $E$  угол  $\rho$  (рис. 5а).

Когда известна сила  $G$ —вес призмы  $MSC$ , мы можем построить треугольник сил  $M$ ,  $G$  и  $E$ — $LFK$  (рис. 5а), из которого определяем силу  $E$  по формуле:

$$\frac{E}{G} = \frac{\sin(90^\circ - \rho - \delta)}{\sin(90^\circ + \delta)},$$

откуда:

$$E = \frac{G \sin(90^\circ - \rho - \delta)}{\sin(90^\circ + \delta)}. \quad (1)$$

Так как призма  $MSC$  ограничена плоскими поверхностями  $MC$  и  $MS$ , мы по закону Рехана имеем:

$$MS = SN.$$

Отсюда

$$\delta = \frac{90^\circ - \rho}{2}.$$

Значит обрушение пород происходит по плоскости скольжения, наклоненной к вертикали под указанным углом.

Вставив это значение в выражение (1), определяем:

$$E = G \frac{\sin \frac{90^\circ - \rho}{2}}{\sin \left( 135^\circ - \frac{\rho}{2} \right)}. \quad (16)$$

Сделав приведенную предпосылку, перейдем к рассмотрению элемента массы давящей породы высотой  $dy$ , находящегося в расстоянии  $y$  от вершины свода выработки  $DNTC$  (рис. 6).

Если вес единицы объема— $\gamma$ , то вес объема  $ckbd$  при ширине выработки  $a$ :

$$dQ = \gamma a dy.$$

Выше мы установили, что обрушение породы в случае извлечения призмы  $ODCM$  произойдет по плоскости скольжения  $SC$ , наклоненной к вертикали под углом

$$\delta = \frac{90^\circ - \rho}{2}.$$

Вес элемента  $ckbf$  в этом случае:

$$dG = \gamma y dy \operatorname{tg} \delta.$$

Этот элемент находится в равновесии под влиянием уравновешивающих его сил  $dM$ ,  $dG$  и  $dE$ , из коих направление  $dM$  образует с нормалью

к плоскости  $SC$  угол  $\rho$ ; тот же угол образует направление  $dE$  с нормалью, совпадающей с плоскостью  $MC$  вследствие трения в этой плоскости.

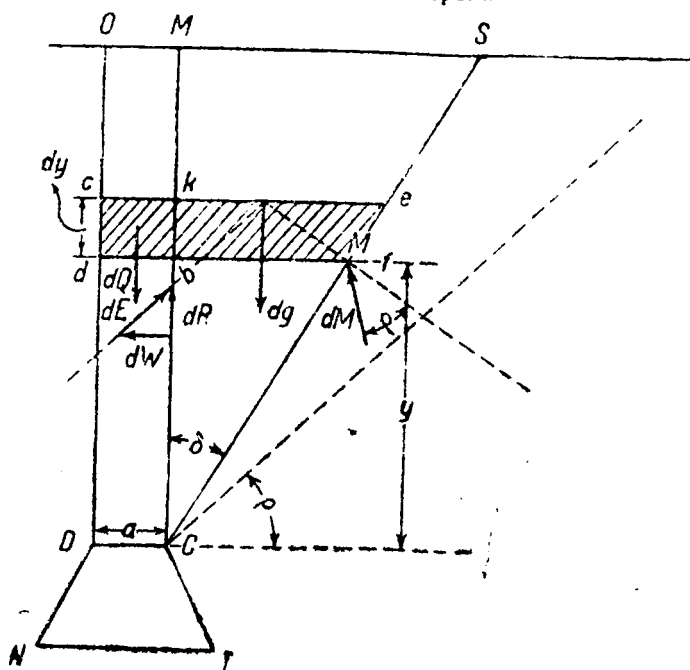


Рис. 6.

Построив силовой треугольник (рис. 6а), мы определяем давление  $dE$  на стенку  $kb$ :

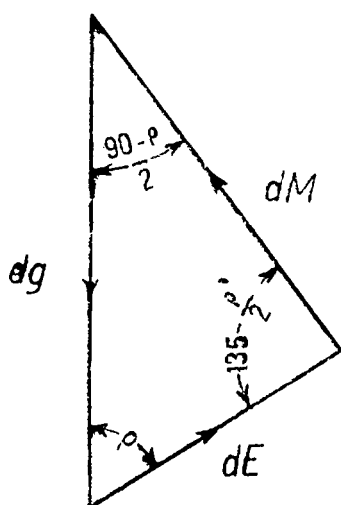


Рис. 6а.

$$dE = dG \cdot \frac{\sin \frac{90^\circ - \rho}{2}}{\sin \left( 135^\circ - \frac{\rho}{2} \right)} =$$

$$= \gamma y dy \operatorname{tg}^2 \delta \frac{\sin \frac{90^\circ - \rho}{2}}{\sin \left( 135^\circ - \frac{\rho}{2} \right)}$$

Давление на элемент  $ckbd$  составит

$$dW = dE \sin \rho = \gamma y dy \operatorname{tg}^2 \delta \frac{\sin \left( \frac{90^\circ - \rho}{2} \right) \sin \rho}{\sin \left( 135^\circ - \frac{\rho}{2} \right)}$$

и сопротивление сдвигу этого элемента

$$dR = dE \operatorname{tg} \rho = \gamma y dy \operatorname{tg}^2 \delta \operatorname{tg} \rho \frac{\sin \left( \frac{90^\circ - \rho}{2} \right) \sin \rho}{\sin \left( 135^\circ - \frac{\rho}{2} \right)}$$

или после упрощения

$$dR = \gamma dy \frac{\sin\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right) \sin^2 \rho}{\sin\left(\frac{45^\circ + \rho}{2}\right) (1 + \sin \rho)} \quad (2)$$

Сдвигению элемента  $abcd$  сопротивляются  $2 dR$ , или

$$2 dR = 2 \gamma dy \frac{\sin\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right) \sin^2 \rho}{\sin\left(45^\circ + \frac{\rho}{2}\right) (1 + \sin \rho)} \quad (3)$$

Обозначив

$$\frac{\sin\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right) \sin^2 \rho}{\sin\left(45^\circ + \frac{\rho}{2}\right) (1 + \sin \rho)} = f, \quad (4)$$

имеем:

$$2 dR = 2 \gamma f dy.$$

Остающееся давление элемента  $ckhd$  выразится разностью элементарных сил

$$dQ - 2 dR.$$

Обозначив эту разность через  $dX$ , имеем:

$$dX = dQ - 2 dR = \gamma ady - 2 \gamma f dy. \quad (5)$$

Разделим полученное равенство на  $dy$ :

$$\frac{dx}{dy} = \gamma a - 2 \gamma f.$$

После интегрирования

$$X = \gamma ay - \gamma fy^2 + c. \quad (6)$$

Полученное выражение есть уравнение параболы, и сила  $X$ , стало быть, изменяется по закону параболы.

Для определения осей этой параболы необходимо уяснить смысл выражения (5).

Вес элементов вертикального столба  $OMCD$  (рис. 6) —  $dQ$  — остаются постоянными, независимо от расстояния их от свода выработки в направлении к дневной поверхности, так как объемы их не меняются; элементарные же силы  $2 dR$ , зависящие от веса элементов боковых призм, увеличиваются по мере удаления вверх от выработки, так как увеличивается площадь их поперечного сечения по мере приближения к дневной поверхности.

Разность между элементарными силами  $dQ$  и  $2 dR$  ( $dx$ ) уменьшается; поэтому, по мере удаления от выработки вверх и на некотором расстоянии от выработки, эта разность  $dX = 0$ . В этом пункте на основании выражения (5)

$$\gamma ady - 2 \gamma f dy = 0.$$

Здесь стало быть

$$\gamma ady = 2 \gamma fdy,$$

откуда

$$y = \frac{\gamma ady}{2 \gamma fdy} = \frac{a}{2f}. \quad (6a)$$

Выше этого пункта разность между силами  $dQ$  и  $2 dR$  ( $dx$ ) не только не оказывает давления на крепь, но для обрушения породы необходимо приложить к элементам ее некоторое усилие.

Таким образом изменение давления на крепь происходит в пределах от 0 до  $X$ , а  $y$  от 0 до  $\frac{a}{2f}$ .

Полная сила давления на крепь  $X$  получается в результате суммирования разностей между силами, вызываемыми весом элементов в пределах вертикального столба  $OMCD$  и в пределах боковых призм  $MCS$  и  $НОD$  (рис. 6):

$$dQ - 2 dR.$$

Начинаясь от потолка выработки, эти разности  $dx$  хотя и уменьшаются по мере удаления вверх от выработки, однако, прибавляясь к разностям элементарных сил  $dX$ , вызываемых весом нижележащих элементов, они все же увеличивают давление на крепь  $X$ . Это увеличение, как мы видели выше, обнаруживается до того пункта, где разность между элементарными силами  $dX$  и  $2 dR$  станет равной 0.

Этот пункт, как мы видели, находится в расстоянии

$$y = \frac{a}{2f}$$

от свода выработки.

На основании выражения (6a) и учитывая изложенное, мы можем записать:

$$\int_0^x dX = \int_0^{\frac{a}{2f}} \gamma ady - \int_0^{\frac{a}{2f}} 2 \gamma fy \cdot dy,$$

откуда

$$X = \frac{\gamma a^2}{2f} - \frac{\gamma fa^2}{4f^2} = \frac{2 \gamma a^2 - \gamma a^2}{4f} = \frac{\gamma a^2}{4f} \quad (7)$$

Так как кривая обрушения есть линия параболического типа, естественно считать ее параболой второго порядка, проходящей через концы отрезка  $CD$ .

Вес любого параболического объема давящей породы с осями  $a$  и  $b$ , приходящегося на единицу длины выработки, при объемном весе  $\gamma$

$$x = \frac{2}{3} ab \gamma.$$

В нашем случае

$$x = \frac{\gamma a^2}{4f},$$

следовательно,

$$\frac{2}{3} ab\gamma = \frac{\gamma a^2}{4f},$$

откуда

$$b = \frac{3 \gamma a^2}{4 \cdot 2 a \gamma f} = \frac{3 a}{8 f} \quad (8)$$

Таким образом на свод штольнообразной выработки, пройденной по „несвязным“ породам, давит параболический объем породы, ширина которого соответствует ширине этой выработки, а высота зависит от той же ширины последней и величины угла естественного откоса, свойственного данной породе.

Как это вытекает из полученного нами выражения (8), мы разрешаем давнишний спор о том, в какой мере глубина заложения штольнообразной выработки влияет на величину давления породы на ее крепь.

Это выражение устанавливает, что глубина заложения штольнообразных выработок ни в какой мере не влияет на величину давления породы на переклад или на свод их.

Кроме того из того же выражения вытекает, что величина давления породы на свод штольнообразных выработок не зависит также от высоты их.

В зависимости от этой высоты находится, как мы увидим ниже, лишь величина бокового давления на стену ее или на стойки крепи. Ниже мы также увидим, что влияние глубины заложения штольнообразных выработок проявляется лишь в отдельных частных случаях.

Сравним полученный результат с выражением для высоты параболического объема давящих пород, определенным проф. Протодяконовым.

По его теории

$$b = \frac{a}{2f}.$$

При этом  $a$  — полупролет свода. У нас  $a$  — весь пролет.

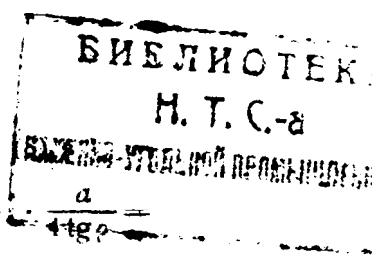
Если для сравнения придать одинаковое значение для  $a$ , то формула проф. Протодяконова должна принять вид:

$$b = \frac{a}{4f}.$$

Таким образом, полученное нами выражение

$$\frac{3a}{8 \sin \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) \sin^2 \rho} \cdot \frac{a}{4 \operatorname{tg} \rho} = 1,5 \frac{\operatorname{tg} \rho \sin \left( 45^\circ + 0,5 \rho \right) (1 + \sin \rho)}{\sin \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) \sin^2 \rho} \quad (8a)$$

раза больше.



При этом легко видеть, что для любых пород с различными углами естественного откоса от  $0$  до  $45^\circ$

$$\frac{\operatorname{tg} \rho \sin (45^\circ + 0,5\rho)(1 + \sin \rho)}{\sin \left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right) \sin^2 \rho} > 1.$$

По этой причине определяемая по формулам проф. Протодяконова толщина крепи штольнообразных выработок оказывается в несколько раз тоньше, чем это установлено практикой.

В этом убедился сам проф. Протодяконов при решении практических примеров, чем только и можно объяснить введение в аналитические формулы двух коэффициентов  $2$  и  $2$ .

Как видно из выражения (8а), постоянный коэффициент может дать удовлетворительный результат лишь в отдельном частном случае; для пород же с различными углами естественных откосов пришлось бы подбирать и различные коэффициенты.

Совершенно очевидно, что коэффициентами разрешить поставленную задачу нельзя.

Мы, таким образом, теоретически определили форму свода, не руководствуясь практической предпосылкой, что при обрушении пород имеет место образование свода, поверхность которого представляет собою кривую равновесия всех сил.

Сравним также полученную нами формулу (8) с выводом Бирбаумера на конкретных примерах.

Основное отличие нашей теории от теории Бирбаумера, заключается в том, что

- 1) мы отрицаем влияние глубины заложения штольнообразной выработки на величину давления горных пород на ее крепь и
- 2) отрицаем также это влияние в зависимости от высоты самой выработки.

Последнее влияние исключается всеми известными нам авторитетными исследователями.

Однако, в частных случаях, когда вертикальное расстояние от дневной поверхности до выработки меньше высоты параболического объема, опре-

деленной нашей формулой  $b = \frac{3}{8} \cdot \frac{a}{f}$ , давление окажется меньшим вычисленного, так как давить фактически будет меньший объем, чем теоретически определенный, и тем меньший, чем ближе выработка к дневной поверхности, т. е. только лишь до глубины  $b = \frac{3}{8} \cdot \frac{a}{f}$  величина давления зависит от вертикального расстояния между дневной поверхностью и выработкой.

Выше мы видели (стр. 10), что лишь в небольших пределах (например, для пород с углом естественного откоса  $\rho = 30^\circ$  в пределах до глубины 35—40 м) принципиальное наше расхождение с Бирбаумером о влиянии глубины заложения выработок на величину давления на крепь отпадает.

Решим несколько примеров на определение высоты объема давящей породы для штольнообразных выработок, заложенных на различных глубинах в пределах 40 м, по нашему методу и по методу Бирбаумера и сравним результаты решений.



## ПРИМЕР

Требуется определить высоту объема давящей породы над штольно-образной выработкой шириной 3 м, высотой 2 м, пройденной по породам с углом естественного откоса  $\rho = 30^\circ$ .

По нашему методу

$$b = \frac{3}{8} \frac{a}{\sin \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) \sin^2 \rho} = \frac{3}{8} \cdot \frac{3}{\frac{0,5 \cdot 0,25}{0,87 \cdot 1,5}} = 12,5 \text{ м.}$$

$$\sin \left( 45^\circ + \frac{\rho}{2} \right) (1 + \sin \rho)$$

По методу Бирбаумера:

а) для выработки, заложенной на глубине 40 м.

$$\xi = \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) = 0,58;$$

$$\Lambda = \xi^2 \operatorname{tg} \rho = 0,34 \cdot 0,58 = 0,2;$$

$$\theta = 1 - \frac{\Lambda h}{\frac{\Lambda h + a}{2} + \sqrt{\left( \frac{\Lambda h + a}{2} \right)^2 + h \xi^4}} =$$

$$= 1 - \frac{0,2 \cdot 40}{\frac{8 + 3}{2} + \sqrt{\left( \frac{8 + 3}{2} \right)^2 + 40 \cdot 2 \cdot 0,116}} = 0,32;$$

$$b = h_1 = 40 \cdot 0,325 = 13 \text{ м.}$$

б) для выработки, заложенной на глубине 35 м:

$$\theta = 1 - \frac{0,18 \cdot 35}{\frac{6,3 + 3}{2} + \sqrt{\left( \frac{9,3}{2} \right)^2 + 3,5 \cdot 2 \cdot 0,116}} = 0,37;$$

$$h = b = 35 \cdot 0,37 = 12,9 \text{ м.}$$

в) для выработки, заложенной на глубине 30 м:

$$\theta = 1 - \frac{0,18 \cdot 30}{\frac{5 \cdot 4 + 3}{2} + \sqrt{17,5 + 6,9}} = 0,42;$$

$$h = b = 30 \cdot 0,42 = 12,4 \text{ м.}$$

Для больших глубин заложения выводы Бирбаумера не совпадут с нашими, так как на основании математического анализа мы установили, что глубина не оказывает на крепь выработки никакого влияния.

Руководствуясь данными из статки сооружений, а также данными Комерелля, Люкаса и других о давлении пород на крепь подземных штольно-образных выработок, мы составили таблицу углов естественного откоса  $\rho$  и объемных весов  $\gamma$ , свойственных несвязным породам.

1. Таблица значений для  $\rho$  и  $\gamma$  в несвязных породах

№ по порядку	Род породы	$\rho^o$	$\gamma_m$
1	Насыпная уплотненная земля . . . . .	36	1,4
2	"    уплотненная . . . . .	42	1,6
3	"    насыщенная водой земля . . . . .	28	1,8
4	Песок естественной сырости . . . . .	33	1,8
5	"    сухой . . . . .	30	1,6
6	Пльвун . . . . .	26	1,7
7	Глинистый грунт и глинозем (сухие) . . . . .	40	1,8
8	"    "    "    "    "    (мокрые) . . . . .	28	1,9
9	Гравий, галька (сухие) . . . . .	40	1,85
10	"    "    "    "    "    (мокрые) . . . . .	30	1,86
11	Плохо окатанная галька . . . . .	43	2,0
12	Закладка, порода, нарушенная сбросами, сдвигами и др. . . . .	45	2,2

Перейдем к выводу формул, определяющих величину давления пород на крепь штольнообразных выработок, пройденных в устойчивых породах.

### 3. ШТОЛЬНООБРАЗНЫЕ ВЫРАБОТКИ В УСТОЙЧИВЫХ ПОРОДАХ

Выведенные нами формулы для рыхлых несвязных пород мы не можем распространить на выработки, заложенные в устойчивых породах, так как считаем, что явления давления, происходящие в первом и втором случаях, имеют очень мало общего.

Это обстоятельство избавляет нас от необходимости подыскивать для классификации пород по степени их устойчивости углы их условных отко-сов, т. е. в сущности подыскивать коэффициенты, которые, как известно, могут оказаться удачными в одних частных случаях и неудачными в других.

С этой точки зрения наша теория отличается от других, в которых установленные законы для давления в неустойчивых породах переносятся и на породы устойчивые.

Для определения величины давления пород в зависимости от зоны разрушения их над подземными выработками в устойчивых породах мы также не находим в соответствующей литературе достаточно удовлетворительных данных, которые можно было бы положить в основу расчета размеров крепления.

Мы видели, что проф. Протодяконов распространяет выведенные им формулы для неустойчивых пород на устойчивые. Комерель приво-дит расчеты по предложенным разными авторами методам и на основе этих расчетов определяет размер крепи выработок, находящихся в самых разнообразных условиях.

В конечном результате он приходит к заключению, что при расчете крепи в выработках, проводимых в устойчивых породах, единственно надежным с его точки зрения методом являются выводы Wagner'a (Вагнера) и Schweize (Швейце), сводящиеся в конечном счете к тому, что над штольнообразными выработками образуется давящий объем породы, ограниченный параболической кривой поверхностью, высота коего

$$h = \frac{100a}{p},$$

где  $a$  — сжатие крепи выработки под влиянием давления породы и  $p$  — степень разрыхления породы над выработкой под влиянием осадки последней, выраженная в процентах.

Мы не находим возможным воспользоваться этой формулой по двум причинам.

Во-первых, сжатие стоек, по которому определяется осадка свода, зависит от такого большого числа причин и их взаимных комбинаций (неправильная постановка крепи, неполная закладка пустот над нею и многие другие), что определить ту часть сжатия, которая обусловлена равномерной осадкой разрыхленных пород, совершенно невозможно, и, во-вторых, если для различных пород величина  $p$  и определена опытным путем<sup>1</sup>, то величина  $a$  может быть найдена лишь после производства опытов в различных частях галлерей тоннеля. Этим, следовательно, исключается возможность предварительного проектирования.

На принципе, предлагаемом Кульманом, связывающем величину давления на выработку с расстоянием ее от дневной поверхности, мы останавливаться не будем, так как выше мы установили, что влияние этого расстояния простирается лишь до высоты от выработки  $b$ , зависящей от ширины ее и угла естественного откоса окружающих пород. При высоком угле трения пород и глубине выработки от дневной поверхности, превышающей 40 м, мы отрицаем влияние давления всей массы пород, приходящейся над выработкой, простирающейся до дневной поверхности.

Остановимся на принципе, предложенном Ritter'ом (Риттером). В противоположность Кульману он исходит из следующего.

Если на свод выработки приходится параболический объем породы, вес коего  $p$ , то действительное давление на крепь будет меньше на усилие  $u$ , какое необходимо приложить к данной породе, чтобы ее разорвать.

Давление на крепь по Риттеру:

$$R = p - u = \gamma b \left( \frac{b^2}{48u} - a \right), \quad (86)$$

откуда:

$$u = -\frac{R}{2b\gamma} + \sqrt{\left(\frac{R}{2\gamma b}\right)^2 + \frac{b^2}{48}}$$

и для высоты параболического объема давящей породы, вес коего  $p$  (а не  $R$ ),

$$h = \frac{b^2}{16u},$$

где  $\gamma$  — вес единицы данной породы и  $b$  — полупролет выработки.

Как видно из приведенных формул, совершенно неясна величина  $u$ . Риттер называет произведение  $u\gamma$  сопротивлением горной породы разрыву

<sup>1</sup> На основании безусловно тщательных наблюдений Комерель дает следующие значения для  $p$ :

Породы	$p$ (в %)
Песок, гравий . . . . .	1 — 1 1/2
Глинистый грунт . . . . .	2 — 4
Песчаный " . . . . .	4 — 5
Глина . . . . .	6 — 7
Скальные породы . . . . .	8 — 15

и приравнивает ее к внутреннему сцеплению элементов, составляющих данную породу.

Лёве и фон-Отто для пользования на практике теорией Риттера дают таблицы, определяющие  $\gamma u$  в зависимости: 1) от угла условного откоса для данной породы и 2) от расстояния выработки от дневной поверхности.

Из приведенного выше видно, что  $u$  можно определить, если известна лишь величина давления  $R$  на крепь подземной выработки из формулы

$$u = -\frac{R}{2b\gamma} + \sqrt{\left(\frac{R}{2b\gamma}\right)^2 + \frac{b^2}{48}}$$

Если значения для  $R$  определить, пользуясь формулой Вагнера и Швейце,

$$h = \frac{100 a}{p}$$

и

$$R = 4/3 bh\gamma = \frac{2}{3} \cdot \frac{100 a}{p} b\gamma,$$

то, пользуясь приведенными выше таблицами, определяющими  $p$  (см. стр. 27), Комерель устанавливает, что значения для  $u$ , составленные по Лёве и Отто, значительно разнятся от значения  $u$ , определенного по способу Вагнера.

Опытом, произведенным над породой, состоящей из одной части глины и трех частей песка, установлено, что  $\gamma u$  (временное сопротивление разрыву) равно  $2000 \text{ кг/м}^2$ ; отсюда, приняв вес  $1 \text{ м}^3$  указанной породы равным  $1700 \text{ кг}$ , имеем:

$$ii = \frac{2000}{1700} = 1,1765.$$

Таким образом, для любой штольнообразной выработки, проведенной в указанной породе, согласно формулы 86

$$R = 1700 \cdot b \left( \frac{b^2}{48 \cdot 1,765} - 1,765 \right).$$

Исследуя означенное выражение, мы приходим к заключению, что крепь выработки, проведенной в указанной выше весьма рыхлой породе, не будет испытывать никакого давления, даже при ширине ее

$$2b = 2 \sqrt{149} = 24,4 \text{ м}.$$

Для подземных же выработок обычного сечения, проведенных в этой породе, давление и подавно есть отрицательная величина.

Нечего говорить, что для выработок, проведенных в более устойчивых породах, величина этого давления, определенная по Риттеру, также будет отрицательной.

Это значит, что сцепление между частицами поверхности параболической кривой давящей породы и остальной, так сказать, пассивной массой ее больше веса того же объема давящей породы.

Таким образом, мы видим, что и Риттер не мог разрешить поставленной задачи.

Действительно, логическое рассуждение приводит нас к заключению,

что если часть породы вследствие своего веса стремится оторваться от остальной массы, а сцепление ее частиц больше силы тяжести, то она падать не будет и, следовательно, никакого давления на крепь подземной выработки не произведет. А так как уже для глинистого сланца это сцепление оказывается большим, чем вес параболического объема давящей породы, то становится понятным, что при определении величины давления пород по Риттеру мы получим для значения  $R$  отрицательную величину.

На практике мы наблюдаем иное.

Не только в глинистых, но даже в песчаных сланцах и в песчаниках происходит более или менее значительное давление пород на крепь выработок; если выработка не закреплена, то происходит обрушение пород, или происходит поломка и обрушение крепи, если последняя недостаточно надежна.

Происходит это потому, что уже в массиве порода не обладает таким сцеплением, для преодоления которого необходимо приложить усилие, равное ее временному сопротивлению на разрыв  $\gamma u$ .

Помимо того, что сцепление частиц породы бывает нарушено под влиянием геологических, химических и других факторов, сами взрывные работы, применяемые при проведении выработок, вызывают нарушения, обусловленные сотрясением. Да и вообще доказать, что  $\gamma u$  не есть временное сопротивление породы на разрыв, можно весьма просто.

Во-первых, в слоистых породах разрывающее усилие, вызываемое весом самой породы, имеет место лишь в совершенно частном случае (вертикальное падение слоев породы), а во-вторых, как мы видели выше, это разрывающее усилие уже для весьма многих пород становится больше веса объема стремящихся оторваться (вследствие своего веса) пород.

Наконец, неверность этого утверждения можно доказать на следующем примере.

Представим себе, что выработка проходит под закладкой. Сцепление кусков породы этой закладки между собой равно 0.

По Риттеру это значит, что  $\gamma u$  должно быть приравнено к нулю; но если  $\gamma u = 0$ , то  $u = 0$  (так как  $\gamma$  — вес 1 м<sup>3</sup> породы — больше нуля), и тогда высота объема давящей породы

$$h = \frac{b^2}{16u} = \frac{b^2}{0} = \infty.$$

Верно ли это?

Мы знаем из практики, что когда выработка пройдена даже под закладкой, в нее не обрушивается вся вышележащая масса, а образуется свод, как бы поддерживающий остальную породу. Таким образом, рассчитывая крепь по формулам Риттера, мы в одних случаях получаем отрицательное значение для давления, а в других — бесконечно большое.

Совершенно очевидно, что указанная теория тоже не разрешила поставленной задачи.

Кроме того, так как  $\gamma u$  не есть временное сопротивление породы на разрыв, формула Риттера при отсутствии сведений о величине  $\gamma u$  вообще теряет для нас всякое значение.

Таким образом, мы видим, что, перенося вопрос о давлении пород на крепь к другой (по нашей классификации) группе пород, т. е. к породам скалистым, мы вступаем в еще менее исследованную область.

Нет нужды цитировать труды остальных упомянутых Комереллем исследователей, так как, проверив на конкретных примерах все их формулы,

Комерелль весьма просто доказывает их несостоятельность, останавливаясь на единственной формуле Вагнера и Швейце.

Что же касается описаний явлений и выводов, полученных в результате наблюдений, то они столь разнообразны и столь противоречивы, что останавливаться на каком-либо из них, как на преобладающем, не приходится.

Таким образом прибавив к 49 источникам, упоминаемым проф. М. М. Протодьяконовым, почти такое же число приведенных в труде Комерелля, мы имеем полное основание повторить справедливое замечание проф. М. М. Протодьяконова, что наши современные сведения о величине давления горных пород на рудничную крепь по справедливости должны быть названы убогими.

Переходя к изложению нашей теории, относящейся к случаям прохождения штольнообразных выработок в устойчивых породах, следует указать, что мы исходим из основной предпосылки, что к рыхлым несвязным породам относятся те из них, между частицами которых не существует никакой связи.

Эти породы мы относим к первой группе, ко второй мы относим те из них, между частицами которых существует некоторое сцепление, для преодоления которого необходимо приложить соответствующее усилие.

Исходя из этой предпосылки, необходимо считать, что:

1) высший предельный угол естественного откоса для пород первой группы и низший предельный для пород второй группы есть угол  $45^\circ$ ; следовательно, наименее устойчивой породой второй группы является разрушенная под влиянием дислокационных процессов скалистая порода или закладка, бут и т. д.;

2) последующие высшие по углу естественного откоса породы представляют собою приходящиеся над выработкой определенные объемы, между частицами которых существует некоторое сцепление. Эти объемы породы, стремящиеся оторваться вследствие своего веса, преодолевают сцепление частиц по поверхности параболической кривой, ограничивающей объем давящей породы.

Это значит, что при проведении выработок в так называемых твердых породах максимальное давление на крепь производит параболический объем породы, высота коего, определенная из нашей формулы,

$$b = \frac{3}{8} \cdot \frac{a}{f} = \frac{3}{8} \frac{a}{\frac{\sin \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) \sin^2 \rho}{\sin \left( 45^\circ + \frac{\rho}{2} \right) (1 + \sin \rho)}} = \frac{3}{8} \cdot \frac{a}{\frac{0,38 \cdot 0,52}{0,92 \cdot 1,71}} \cong 3a, \quad (9)$$

т. е. максимальное давление, которое может иметь место при проведении выработок в крепких породах, есть вес объема породы, высота коего в 3 раза больше ширины выработки.

Вес этого объема породы

$$T = \frac{2ab}{3} \gamma,$$

а при  $b = 3a$

$$T = \frac{2}{3} a\gamma \cdot 3a = 2a^2\gamma.$$

Далее, в породах, для которых сохранилось некоторое сцепление частиц, этот объем породы должен преодолеть существующее сцепление между отрывающейся и остающейся пассивной массами породы.

Рассмотрим полосу  $mn$  шириною  $dy$ , находящуюся в пределах параболического объема давящей породы  $BLAD$  на расстоянии  $y$  от пункта  $D$  (рис. 7).

Пусть рассматриваемая порода есть по устойчивости предельная высшая для категории „несвязных“ пород (скажем, закладка, бут и др.) и предельная низшая для „связных“ — устойчивых пород, т. е. предполагается, что между частицами породы сцепление равно нулю.

Для такой породы угол естественного откоса равен  $45^\circ$ .

Для простоты расчета примем полупараболический объем за призматический  $BAD$  (хотя от этого допущения ошибка будет очень невелика, однако, ниже мы введем поправку, которая сделает эту ошибку совершенно ничтожной).

Предварительно устанавливаем, на основании формулы (9) и в соответствии с рис. 7:

$$\frac{mn}{BD} = \frac{AD - y}{AD}.$$

Учитывая, что

$$BD = 3a \quad \text{и} \quad AD = \frac{a}{2},$$

мы можем написать:

$$\frac{mn}{3a} = \frac{\frac{a}{2} - y}{\frac{a}{2}}.$$

Обозначим

$$\frac{a}{2} = C. \quad (9a)$$

Тогда

$$\frac{mn}{6C} = \frac{C - y}{C},$$

откуда

$$mn = 6(C - y). \quad (9б)$$

Если связи между частицами породы не существует, то как объем  $mn$ , так и другие, находящиеся в пределах призматического объема  $BAD$ , оказывают давление на переклад  $DA$ , равное в сумме весу этого объема. В противном случае все эти частицы должны преодолевать сцепление по поверхности  $BA$ , и на переклад будет давить сумма разностей из весов частиц  $mn$  и сцепления по поверхности  $m$ .

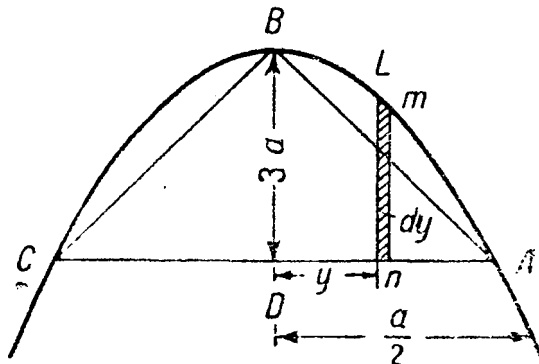


Рис. 7.

Вес частицы  $mn$ , обозначив объемный вес породы через  $\gamma$ ,

$$dQ = mn \gamma dy,$$

или согласно выражению (96)

$$dQ = 6 (C - y) \gamma dy.$$

Если сцепление на единицу поверхности обозначить через  $\sigma$ , то сцепление в  $m$

$$dT = \sigma dy,$$

и на площадку  $n$  шириною  $dy$  и длиною, равной единице, будет давить разность из  $dQ$  и  $dT$

$$dx = dQ - dT = 6 \gamma (C - y) dy - \sigma dy. \quad (10)$$

Разделив обе части равенства на  $dy$ , имеем

$$\frac{dx}{dy} = 6 \gamma C - 6 \gamma y - \sigma.$$

Интегрирование даст:

$$x = 6 \gamma Cy - 3 \gamma y^2 - \sigma y + C. \quad (11)$$

Далее, в то время как в  $m$  сцепление  $\sigma dy = dT$  в однородной породе остается постоянным по всей поверхности  $BA$ , вес  $dQ$  частицы  $mn$  меняется постоянно от 0 (в точке  $A$ ) до  $3a \gamma dy$  в точке  $C$ .

Стало быть, разность между  $dQ$  и  $dT$ , или элементарное давление на кремь  $dx$ , меняет свое значение от минус  $\sigma dy$  (в пункте  $A$ ) до плюс  $3a \gamma dy - \sigma dy$  (в пункте  $D$ ) и будет равна нулю там, где на основании выражения (10)

$$6 \gamma (C - y) dy = \sigma dy.$$

Это будет в том пункте от  $D$  к  $A$ , где

$$y = C - \frac{\sigma}{6 \gamma}.$$

Таким образом, в то время как  $y$  меняет свое значение от 0 до  $C - \frac{\sigma}{6 \gamma}$ ,  $x$  меняет свое значение от 0 до  $x$ .

Поэтому и на основании выражения (10) мы можем составить следующее выражение:

$$\int_0^x dx = \int_0^{C - \frac{\sigma}{6 \gamma}} 6 \gamma (C - y) dy - \int_0^{C - \frac{\sigma}{6 \gamma}} \sigma dy,$$

откуда

$$\begin{aligned} x &= 6 \gamma C \left( C - \frac{\sigma}{6 \gamma} \right) - 3 \gamma \left( C - \frac{\sigma}{6 \gamma} \right)^2 - \sigma \left( C - \frac{\sigma}{6 \gamma} \right) = \\ &= \frac{36 \gamma^2 C^2 - 12 C \sigma \gamma + \sigma^2}{12 \gamma}. \end{aligned} \quad (12)$$



Мы определили полупараболический объем давящей породы; на весь переклад  $CA$  давит:

$$x_1 = x \cdot 2 = \frac{36 \gamma^2 C^2 - 12 C \sigma \gamma + \sigma^2}{6 \gamma} = \frac{(6 \gamma C - \sigma)^2}{6 \gamma}.$$

Подставив в это выражение значение  $C = \frac{a}{2}$ , определяем

$$x_1 = \frac{(3a \gamma - \sigma)^2}{6 \gamma}.$$

Мы исходили при вычислении из объема  $BAD$ , отличающегося от объема  $BLAD$  как

$${}^{2/3} BD \cdot AD : {}^{1/2} BD \cdot AD = 4/3.$$

Внеся эту поправку, мы получим давление на переклад  $CA$

$$x_2 = x_1 \cdot 4/3 = \frac{(3a \gamma - \sigma)^2 \cdot 4}{18 \gamma} = \frac{2(3a \gamma - \sigma)^2}{9 \gamma}. \quad (13)$$

Так как кривая обрушения есть линия параболического типа, естественно считать ее параболой второго порядка, проходящей через концы отрезка  $AC$  (фиг. 7).

Учитывая одновременно, что давление параболического объема

$$x_2 = \frac{2}{3} ab \gamma,$$

мы можем определить и высоту  $b$  этого объема:

$${}^{2/3} ab \gamma = 2 \frac{(3a \gamma - \sigma)^2}{9 \gamma},$$

откуда

$$b = \frac{2(3a \gamma - \sigma)^2 \cdot 3}{9 \gamma a \gamma \cdot 2} = \frac{(3a \gamma - \sigma)^2}{3a \gamma^2}. \quad (14)$$

Следует учесть, что при определении размера крепи при проведении выработок в устойчивых породах объемный вес  $\gamma$  служить характеристикой крепости этих пород не может. Так, объемный вес песчаника и известняка — пород устойчивых ( $2,3 \text{ т/м}^3$ ) — меньше веса глины и глинистого сланца ( $2,46$  и  $2,84 \text{ т/м}^3$ ). Учитывая, что эти объемные веса для устойчивых пород мало отличаются друг от друга, мы принимаем средний объемный вес для них  $2,5 \text{ т/м}^3$ . Поэтому формулы (11 и 13) могут быть представлены в следующем виде:

$$x = \frac{2(7,5 a - \sigma)^2}{22,5} \quad (15)$$

и

$$b = \frac{(7,5 a - \sigma)^2}{18,75 a}. \quad (16)$$

Можно проверить все расчеты, изложенные в этой главе. Если они сделаны верно, то, при  $\sigma = 0$ ,  $b$  должно быть равно  $3a$ ; вставим в выражение (16)  $\sigma = 0$ :

$$b = \frac{(7,5 - 0)^2}{18,75a} = 3a.$$

Формулами (15 и 16) мы будем пользоваться при расчете размера крепи подземных штольнеобразных выработок в устойчивых породах.

Переходя к вопросу о значении  $\sigma$  следует указать, что при вычислении толщины крепления подземной выработки следует учитывать, что свод ее нагружен параболическим объемом породы, у которого одна ось—ширина выработки, а другая— в 3 раза больше ее [см. выражение (9)].

Этому давлению сопротивляются:

- а) возводимая в выработке крепь и
- б) сцепление породы по поверхности параболического объема давящей породы.

При определении сечения крепи выработки в расчет принимается не временное сопротивление материала, из которого она сооружена, а допустимое для него напряжение.

Совершенно очевидно, что для того, чтобы крепь была надежна, сцепление породы— эту как бы естественную крепь— необходимо учитывать, исходя из допустимого напряжения для данной породы.

Для выбора этих допустимых напряжений при расчете крепи мы пользуемся данными из сопротивления материалов по Хютте<sup>1</sup>.

При этом мы принимаем  $\sigma_1$ — допустимое напряжение на разрыв для данной породы, если выработка проводится в крутопадающих породах (от 90 до 20°), и  $\sigma_2$ — на срез, если породы пологопадающие или если они не имеют угла падения (от 20 до 0°).

Эти напряжения меньше допустимого напряжения на сжатие ( $\sigma$ ):  $\sigma_1$ — в 26 раз и  $\sigma_2$ — в 13 раз<sup>2</sup>.

Руководствуясь данными строительной механики, мы составили таблицу напряжений, исходя из следующих соображений.

Допустимое напряжение  $\sigma$  на сжатие для совершенно „твердой скалы“ (гранит) по Хютте равно 20—50 кг/см<sup>2</sup>.<sup>3</sup>

Мы принимаем допустимое напряжение на сжатие для совершенно твердых пород  $\sigma = 50$  кг/см<sup>2</sup>.

Что касается других пород, то для них мы определяем напряжения интерполяцией, исходя из соотношений их временных сопротивлений сжатию, по табл. 16 Хютте „сопротивление камней“<sup>4</sup>.

Так, приняв для совершенно твердой породы допустимое напряжение на сжатие  $\sigma = 50 = \text{кг/см}^2$ , напряжение  $\sigma_m$  для очень твердого песчаника, согласно указанной таблицы, получим:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma} = \frac{2500}{3000},$$

откуда

$$\sigma_m = \frac{2500 \cdot 50}{3000} = 40 \text{ кг/см}^2.$$

<sup>1</sup> Хютте, т. I, изд. 13-е, стр. 600—602.

<sup>2</sup> Там же, стр. 615.

<sup>3</sup> Хютте, т. III, изд. 13-е, стр. 262.

<sup>4</sup> Там же, стр. 600.

Что касается допустимых напряжений на разрыв  $\sigma_1$  и срез  $\sigma_2$ , то, как это указывалось выше, они определяются путем деления допустимого напряжения на сжатие  $\sigma$  на 26 и на 13.

Легко видеть, что если разделить полученное напряжение на сжатие ( $50 \text{ кг/см}^2$ ) для твердых песчаников на 26, чтобы получить допустимое напряжение на разрыв, то

$$\sigma_1 = 40 : 26 = 1,5 \text{ кг/см}^2.$$

Вставим это значение в формулу (16), выразив его в тоннах на кв. метр. Тогда для выработки шириной 2 м высота давящего объема будет:

$$b = \frac{(7,5 a - \sigma)^2}{18,75 a} = \frac{(7,5 \cdot 2 - 15)^2}{37,5} = 0,$$

т. е. выработку, проведенную в таких породах, можно оставить без всякого крепления, что совпадает с практическими данными.

Исходя из этого, нами составлена следующая таблица для определения  $\sigma$  в формулах (15 и 16):

II. Таблица допустимых напряжений для устойчивых пород

Наименование породы	Допустимое напряжение на сжатие $\sigma$ , кг/м <sup>2</sup>	Допустимое напряжение	
		на разрыв $\sigma_1 = \sigma : 26$ , кг/м <sup>2</sup>	на срез $\sigma_2 = \sigma : 13$ , кг/м <sup>2</sup>
1. Совершенно твердый песчаник и известняк . . . . .	400	15	30
2. Песчаник твердый, очень твердый песчанистый сланец			
3. Песчаник мелкослоистый, песчанистый сланец, очень твердый глинистый сланец .	312	12	24
4. Мягкий глинистый сланец, рыхлый песчаник, мергель и породы слабо нарушенные .	295	11,4	22
5. Перемежающиеся пропластки угля, глинистого сланца, мелкослоистого рыхлого песчаника и других слабых пород . . . . .	275	10,5	21
	220	8,4	16,8

## II. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ВЫРАБОТКИ

### 4. КРИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕОРИЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСА

Законы, установленные нами для штольнообразных выработок, не могут быть распространены на вертикальные. В этом мы легко убедились при конкретизации явлений давления пород, сопровождающих проведение штольнообразных выработок.

В самом деле, штольнообразные выработки представлялись нам окруженными сверху тремя отдельными объемами давящих пород, из которых

один — вертикальный объем, действующий вниз, и два других объема — сдвигающиеся по наклонным плоскостям и давящие на вертикальный объем, отчего последний является как бы зажатым между двумя первыми.

Над вертикальной выработкой мы не имеем давящего вниз вертикального объема пород. Здесь имеет место лишь боковое давление пород на крепь вертикальных стен выработки.

Легко также видеть, что это боковое давление не является следствием лишь смещения призматических объемов пород  $ABC$  и  $A'B'C'$  (рис. 8), так как в этом случае на большой глубине вертикальных выработок боковое давление было бы столь значительным, что едва ли ему можно было бы противопоставить достаточно надежную крепь.

Совершенно очевидно, что кроме явления смещения указанных выше сдвигающихся призм имеет место действие еще других сил, умеряющих действие первых и в результате дающих величины давления, наблюдающиеся на практике.

Все это говорит в пользу необходимости выделения самостоятельного вопроса о давлении пород на крепь вертикальных выработок, сделав его предметом особого изучения.

Если в отношении установления размеров давления пород на крепь подземных, так называемых штольнообразных выработок соответствующая литература изобилует весьма большим числом исследований, то этого ни в коем случае нельзя сказать о вертикальных выработках. А между тем в горном

деле вопрос этот имеет не только не меньшее, но в значительной степени большее значение.

Достаточно указать на вертикальные шахты, являющиеся связующими звеньями между дневной поверхностью и подземными выработками. В связи с развитием техники горного дела шахты эти достигают весьма больших глубин при значительных размерах их поперечного сечения. По сравнению со штольнообразными выработками шахты должны сохраняться на более длительное время, так как при исчерпании полезного ископаемого того горизонта, на который они проведены, и при необходимости дальнейшего их углубления большая часть штольнообразных выработок может быть по использованию обрушена, в то время как использованная часть шахты должна быть сохранена до полной выработки всех намеченных ею к эксплуатации горизонтов.

Однако в горной литературе, как и в литературе, относящейся к постройке тоннелей и метрополитенов, где также имеет место прохождение вертикальных, достигающих иногда значительных глубин выработок, в целях увеличения числа забоев для более успешной проходки направляющих галлерей, вопрос о величине давления пород на крепь вертикальных выработок, а в связи с этим вопрос о креплении таких выработок рассматривается лишь с точки зрения наиболее выгодных способов крепления, качества материала крепления, стоимости его и т. д.

Как и при проведении штольнообразных выработок, основным является вопрос о том, в какой мере влияет и влияет ли вообще на давление на крепь вертикальных выработок глубина их. Для штольнообразных выработок нами установлено, что влияние глубины заложения их имеет место

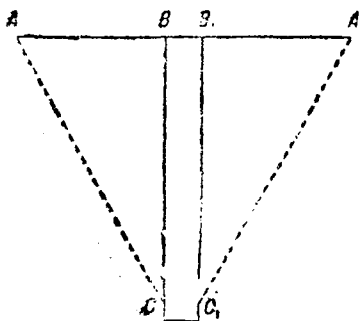


Рис. 8.

лишь в частном случае, когда это расстояние меньше высоты параболического объема давящих пород, вычисленной по нашим формулам.

При проходке вертикальных выработок в недостаточно устойчивых породах, т. е. в таких породах, в которых крепление выработки является необходимым, возведению временной или постоянной крепи предшествует некоторое прохождение шахты без всякого крепления. При этом расстояние обнажения между двумя соседними крепями (рамами или кольцами) варьирует лишь в зависимости от устойчивости и крепости пересекаемых пород. Для одной и той же породы, независимо от расстояния закрепляемого участка от дневной поверхности, промежутки между крепями (а, стало быть, и размер обнажений) остаются одинаковыми во всех частях вертикальных выработок.

На практике при установке временной или постоянной крепи совершенно не наблюдалось случаев увеличения давления в зависимости от глубины закрепленных участков, так как если бы такие явления имели место, то размер обнажения между крепями сокращался бы по мере углубления вертикальных выработок.

Несомненно, что это обстоятельство должно быть учтено при исследовании поставленной задачи, тем более что вопрос о давлении пород на крепь подземных выработок является крайне сложным и трудно разрешимым, в особенности в тех случаях, где он разрешается для выработок, проводимых в устойчивых породах, в связи с невозможностью произвести непосредственный опыт.

Рассматривая те крайне скудные изыскания в этой области, которые опубликованы в горной литературе, мы убеждаемся, что глубине вертикальной выработки придается большое значение, как фактору, способствующему увеличению давления пород на их крепь, в зависимости от удаления от дневной поверхности.

Если мы признаем эту теорию правильной, то приходим к тому же выводу, к какому мы пришли, трактуя теорию Кульмана, т. е. что на большой глубине прохождение выработок становится невозможным, так как толщина крепления может достигнуть размеров поперечного сечения самой выработки.

К счастью для техники горного дела, закон изменения сил, действующих на крепь вертикальных выработок, с указанной теорией ничего общего не имеет. Последняя оказывается совершенно несостоятельной и не подтверждающейся ни практикой, ни, как увидим ниже, нашим аналитическим выводом.

Чтобы не быть голословным, рассмотрим тот крайне скудный материал, который трактует вопрос о давлении пород на крепь вертикальных выработок.

Наиболее оригинальна в этом отношении теория, изложенная в статье проф. А. Н. Динника<sup>1</sup>.

Сущность этой теории заключается в том, что она рассматривает породы, окружающие выработку, как упругое тело, сжатое в любой части его под влиянием веса всех вышележащих элементов той же породы. Отдельная частица этой породы, примерно кубик с длиной ребра, равной одному сантиметру, подвергающийся давлению всей массы вышележащей породы, попутно с сокращением вертикальной оси расширяется в горизон-

<sup>1</sup> „Инженерный работник“ № 7, 1925, „О давлении горных пород и расчет крепи круглой шахты“.

тальном направлении. Это расширение будет меньше, чем укорочение вертикальной оси; отсюда, по проф. Диннику, горизонтальное давление на крепь оказывается меньшим, чем вертикальное; насколько меньшим—это зависит от постоянной Пуассона для данной горной породы. Таким образом, весь вопрос сводится лишь к установлению этой постоянной. Определив ее для данной породы, крайне просто вычислить уже и величину давления на крепь выработки.

Рассматривая эту теорию применительно к горным породам, необходимо сделать общее указание на крайнюю ее отвлеченность.

Можно ли рассматривать породу, окружающую вертикальную выработку, как упругое однородное тело, даже в том случае, если речь идет об одной и той же породе?

Выше мы уже отмечали, что на крепость, а главное на устойчивость, породы влияет целый ряд факторов, совершенно не зависящих от механических и физических (упругих) свойств их. Факторами этими являются и направление, и толщина отдельных пластов, из которых состоит одна и та же порода, и условия залегания их, а также сбросы, сдвиги и т. д. и т. п.

Таким образом, рассматривать породу, окружающую выработку, как упругое монолитное, ничем не нарушенное тело, даже в том случае, если речь идет об одной и той же породе, конечно, нельзя.

Предлагая изучить на опыте постоянную Пуассона для горных пород Донецкого и Криворожского бассейнов<sup>1</sup>, проф. Динник ставит неразрешимую задачу, которая к тому же вряд ли даст возможность решить поставленный вопрос.

По той же теории проф. Динника, наибольшее давление испытывают элементы породы, окружающей выработку, наиболее удаленные (вниз) от устья шахты. В этих условиях разрушение в вертикальных выработках должно начинаться на большой глубине.

На практике наблюдаются совершенно другие явления. Разрушение начинается у устья этих выработок, где образуется воронкообразное углубление. С течением времени эта воронка все увеличивается до тех пор, пока она не сольется с той частью выработки, которая заполнится разрушенной породой. Разрушение начинается не с устья лишь в том случае, если более мягкие породы находятся ниже устья. Но и в этом случае разрушение будет происходить таким образом, что воронка образуется внутри вертикальной выработки.

Далее, давление на крепь вертикальной выработки, по этой теории, является результатом расширения горизонтальных осей элементов пород, окружающих выработку. Но какова толщина этого слоя окружающих пород? Есть ли это тонкий слой породы, прилегающий к стенкам выработки, или расширение частиц породы постепенно замирает по мере удаления от выработки в стороны и на некотором от нее расстоянии совершенно прекращается?

Ответа на эти вопросы предложенная теория не дает и дать не может.

Наконец—и это самое главное—до того момента, пока не превзойдено временное сопротивление породы сжатию, хотя и будет происходить расширение горизонтальных осей элементов пород, окружающих выработку, однако это явление может вызвать лишь уменьшение размеров сечения выработки, а не обрушение ее. В этом случае нужно было бы лишь соот-

<sup>1</sup> Стр. 3 указанной выше статьи в „Инженерном работнике“.

ответственно увеличивать проектные размеры сечения выработки, рассчитывая на то, что под влиянием поперечного расширения элементов породы выработка будет уменьшена в ее сечении. Если же под влиянием вертикального давления вышележащих пород временное сопротивление или даже предел упругости их будут превзойдены в том или ином пункте, под влиянием чего они будут разрушены, то постоянная Пуассона, установленная для данных пород, теряет свое значение.

Приведенного достаточно, чтобы признать теорию о давлении пород на крепь подземных выработок, предложенную проф. Динником, едва ли приемлемой.

Проф. М. М. Протодяконов решает поставленный вопрос крайне просто. Он рассматривает стенки вертикальных выработок, как подпорные, противопоставляемые давлению грунта, и для расчета величины давления пород на крепь приводит известную формулу из теории давления грунта:

$$P = (\delta z + q) \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right),$$

где  $P$  — давление на подпорную стенку,

$\delta$  — вес единицы породы,

$q$  — давление на  $1 \text{ см}^2$ .

Ввиду того что вычисленные по этой формуле величины давления для неглубоких вертикальных выработок, а стало быть и толщина стенок, получаются крайне незначительными, проф. Протодяконов произвольно прибавляет к выражению для определения толщины стенки круглой шахты

$\left( d = \frac{PR}{K} \right)$  размер половины кирпича, т. е.  $14 \text{ см}$ .

Приняв также  $q$  равным весу столба до дневной поверхности ( $H - z_1 = z$ ), он получает новое выражение

$$P = \delta z + \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \cdot 14 \text{ см}.$$

Введение  $14 \text{ см}$  также мало помогает делу, в силу чего приходится отказаться от ранее установленных коэффициентов трения для пород, окружающих штольнообразные выработки, и вносить новые коэффициенты для пород, окружающих вертикальные выработки.

Коэффициенты эти для хороших пород  $f = 5$ , для средних 4 и для слабых 3.

Несмотря на ряд совершенно произвольных поправок, которые вносятся в теоретическую формулу, расчет размеров крепления по ней дает для неглубоких выработок весьма малую величину, а для глубоких вертикальных выработок весьма большую, так как величина давления пород на крепь подземных выработок, определенная по этой формуле, находится в прямой зависимости от глубины их.

Изложенным мы исчерпываем рассмотрение известных нам источников по данному вопросу и переходим к изложению нашей теории.

## 5. ДАВЛЕНИЕ НА КРЕПЬ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК В РЫХЛЫХ ПОРОДАХ

Несомненно, что элементы части породы, соприкасающейся со стенками выработки, принимая на себя давление вышележащих элементов, испытывают тем большее напряжение, чем глубже они расположены от дневной поверхности.

Означенное положение остается действительным, если считать, что на крепь выработки действует вес объемов призм  $ABC$  и  $A'B'C'$  (рис. 8). В этом случае, по мере углубления выработки, объемы призм увеличиваются, а вместе с этим, казалось бы, должно увеличиваться и давление на крепь выработки. Однако, совершенно несомненно также и то, что не одни лишь эти силы, вызываемые указанными факторами, дают в результате то или иное давление на крепь выработки.

Как и при проведении штольнообразных выработок, здесь также должны быть выявлены и учтены и другие силы, нейтрализующие действие первых, так сказать, умеряющие их действие.

Эти силы несомненно существуют, и без учета их все теоретические решения вопроса могут привести лишь к абсурду.

К выявлению и учету всех сил, принимающих участие при проведении вертикальных выработок, мы приступаем ниже.

Предварительно установим следующие общие положения:

1) До того момента, пока не превзойдено временное сопротивление пород сжатию, вертикальной выработке не угрожает обрушение;

2) и здесь, как и при рассмотрении вопроса о давлении пород на крепь штольнообразных выработок, мы будем считать, что углы естественных откосов для несвязных пород, какими являются, например, песок, галечник и другие породы, для которых этот откос не превышает  $45^\circ$ , установлены вполне надежно;

3) все расчетные формулы, приведенные ниже, в части, касающейся проведения выработок в рыхлых породах, имеют в виду, что временное сопротивление этих пород сжатию при проведении их превзойдено.

## 6. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ВЫРАБОТКИ В РЫХЛЫХ ПОРОДАХ

Любая частица породы в земле находится под действием ряда сил, которые взаимно уравновешены, вследствие чего частица эта (как и все окружающие ее частицы) находится в покое. Если рассматриваемую частицу извлечь, то этим самым нарушается существовавшее равновесие сил, действовавших ранее на нее. В результате начнется передвижение окружающих частиц породы.

Проведение подземных выработок (штольнообразных или вертикальных), сопровождающееся извлечением породы, выводит таким образом в данном месте силы из существовавшего ранее состояния равновесия, вследствие чего начнется передвижение породы и обрушение проводимых выработок. Задачей горной техники является отыскание этих сил, определение их направления и размеров, чтобы, противопоставив им надежную крепь, восстановить существовавшее ранее равновесие.

Так как под влиянием действия неуравновешенных сил происходит работа, выражающаяся в передвижении частиц породы, отчего последние становятся активными, для определения действующих на крепь выработки сил важно установить, какие именно частицы породы, окружающие выработку, являются активными.

Поэтому перейдем к определению поставленной задачи при проведении вертикальной подземной выработки.

Представим себе пройденную по несвязной породе и закрепленную вертикальную выработку  $GEFJ$  (рис. 9).

В части этой выработки  $ABDC$  высотой  $t$ , соответствующей длинной стороне поперечного сечения выработки, и такой же ширины, для определения сил, действующих на ее стенки, выьем крепь.



Через обнаженную часть выработки начнет вываливаться порода, причем если угол естественного откоса для нее  $\rho$ , то и вываливание будет продолжаться до тех пор, пока не образуются естественные откосы  $DN$  и  $MB$ , наклоненные под углом  $\rho$  к горизонту.

Помимо двух призм  $MAB$  и  $CDN$  начнется движение породы, находящейся над этими призмами.

Определим объем этой обрушающейся породы.

Над вновь образовавшейся выработкой  $MNDB$  будут действовать следующие силы:

- 1) давление вниз вертикального столба  $OMNQ$  минус  $GACJ$  и
- 2) давление трехгранных призм  $QNK$  и  $OML$ , сжимающих с двух сторон вертикальный столб.

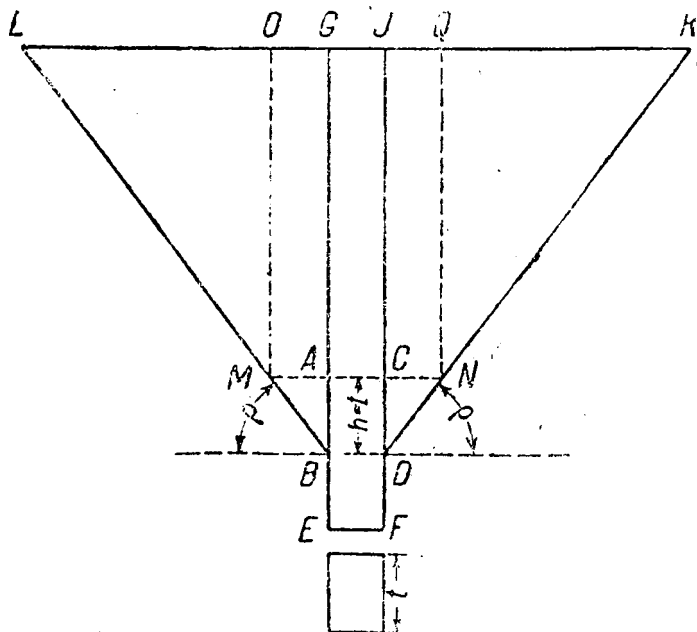


Рис. 9.

Обратимся к рассмотрению отдельных элементов, принимающих участие в комплексе сил, приводящих в результате к искомому давлению на крепь вертикальных выработок (рис. 10).

Рассмотрим элементы вертикальной призмы  $OMCP$  —  $abcd$  и  $eigf$  высотой  $dy$ , находящиеся в расстоянии  $y$  от верха вновь получившейся выработки.

Если вес единицы данной породы  $\gamma$ , вес двух этих элементов

$$dQ = 2t^2 \operatorname{ctg} \rho \gamma dy \quad (17)$$

$$(ab = MA = ei = DC = t \operatorname{ctg} \rho).$$

И здесь обрушение пород будет происходить по плоскостям скольжения  $SC$  и  $LM$ , наклоненным к вертикали под углом

$$\frac{90^\circ - \rho}{2} = \frac{\alpha}{2}$$

(обозначив  $90^\circ - \rho = \alpha$ ).

Вес элемента  $imng$

$$dG = \gamma y dy \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}. \quad (18)$$

Как и в случае проведения штольнообразных выработок в рыхлых породах (см. стр. 19 и 20), элемент  $imng$  весом  $dG$  (рис. 10) находится в равновесии под влиянием сил:

- 1) сопротивления от трения в плоскости  $mn$  ( $dM$ ), направление которого составляет с нормалью к плоскости  $SC$  угол  $\rho$ ;
- 2) собственного веса  $dG$ , действующего в вертикальном направлении, и
- 3) реакции стенки  $ig = dE$ .

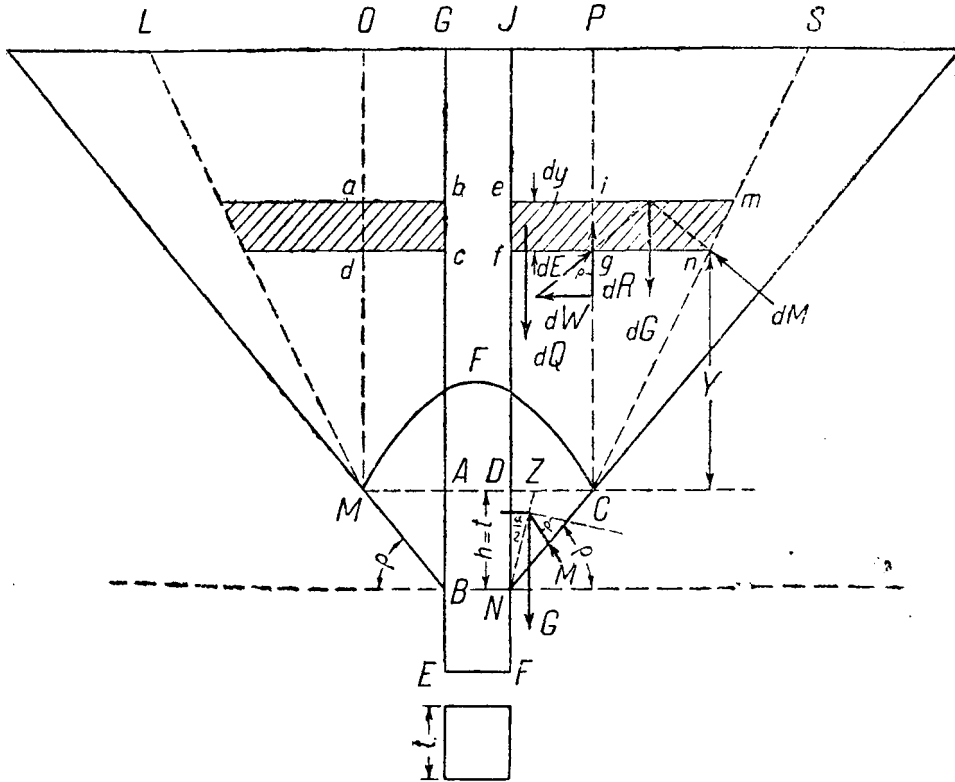


Рис. 10.

Легко видеть (из рис. 10), что направление  $dG$  составляет с направлением  $dM$  угол  $\frac{\alpha}{2}$  и с направлением  $dE$  угол  $135^\circ - \frac{\rho}{2}$ .

Из треугольника сил  $HDU$  (рис. 10а) определяем

$$dE = dG \frac{\sin \frac{90^\circ - \rho}{2}}{\sin \left( 135^\circ - \frac{\rho}{2} \right)} \quad (19)$$

Давление на стенку  $ig$  составит

$$dW = dE \sin \rho$$

и сопротивление сдвигению элемента  $eigf$

$$dR = dW \operatorname{tg} \rho = dE \sin \rho \operatorname{tg} \rho.$$

Подставив значение  $dE$  и  $dG$ , определяем после упрощения

$$dR = t\gamma dy \frac{\sin\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right) \sin^2 \rho}{\sin\left(45^\circ + \frac{\rho}{2}\right) (1 + \sin \rho)}. \quad (20)$$

Учитывая противодействие  $2dR$ ,

$$2dR = 2t\gamma dy \frac{\sin\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right) \sin^2 \rho}{\sin\left(45^\circ + \frac{\rho}{2}\right) (1 + \sin \rho)} \quad (21)$$

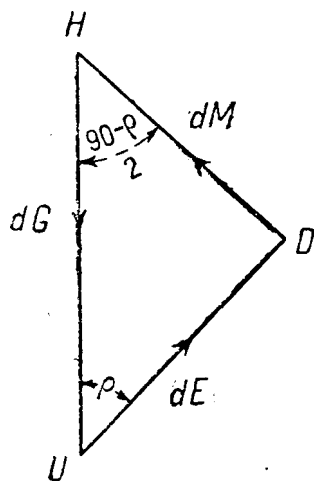


Рис. 10а.

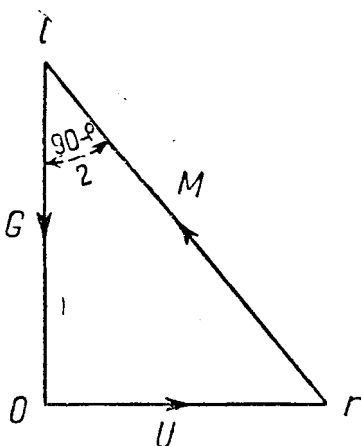


Рис. 10б.

Обозначив

$$\frac{\sin\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right) \sin^2 \rho}{\sin\left(45^\circ + \frac{\rho}{2}\right) (1 + \sin \rho)} = f, \quad (21a)$$

имеем:

$$2dR = 2t\gamma f dy.$$

Давление на площадку  $MC$  оказывает разность из  $dQ$  и  $2dR$ . Таким образом, обозначив эту разность через  $dx$ , имеем

$$dx = dQ - 2dR = 2t^2\gamma dy \operatorname{ctg} \rho - 2t\gamma f dy. \quad (22)$$

Эта разность равна нулю в том пункте вверх от площадки  $MC$ , где

$$2t^2\gamma dy \operatorname{ctg} \rho = 2t\gamma f dy.$$

Этот пункт отстоит от площадки  $MC$  вверх в расстоянии

$$y = \frac{2t^2\gamma dy \operatorname{ctg} \rho}{2t\gamma f dy} = \frac{t \operatorname{ctg} \rho}{f}.$$

Таким образом давление на крепь меняется в пределах от 0 до  $x$  в зависимости от изменения  $y$  от 0 до  $\frac{t \operatorname{ctg} \rho}{f}$ .

Поэтому на основании выражения (22):

$$\int_0^x dx = \int_0^{\frac{t \operatorname{ctg} \rho}{f}} 2t^2 \gamma dy \operatorname{ctg} \rho - \int_0^{\frac{t \operatorname{ctg} \rho}{f}} 2t \gamma f y dy,$$

откуда

$$x = \frac{2t^3 \gamma \operatorname{ctg}^2 \rho}{f} - \frac{t^3 \gamma \operatorname{ctg}^2 \rho}{f} = \frac{t^3 \gamma \operatorname{ctg}^2 \rho}{f}. \quad (23)$$

Итак на площадку  $DC$  давит параболический объем породы  $DCF$ . Это давление вместе с весом призмы  $DZN$ , обрушающейся по плоскости скольжения  $ZN$ , вызывают давление  $u$  на стенку  $DN$ .

Вес полупараболического объема, согласно выражению (23):

$$\frac{x}{2} = \frac{t^3 \gamma \operatorname{ctg}^2 \rho}{2f}.$$

Вес  $Z$  призмы  $DZN$  высотой  $DN = h = t$  с основанием

$$DZ = \frac{DC}{2} = t \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \rho}{2}.$$

при ширине сечения выработки  $t$  и объемном весе  $\gamma$

$$Z = \frac{DN \cdot DZ \cdot t \cdot \gamma}{2} = \frac{t^3 \gamma \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \rho}{2}}{2}. \quad (24)$$

Давление полупараболического объема вместе с весом призмы составят:

$$p = \frac{x}{2} + Z = \frac{t^3 \gamma \operatorname{ctg}^2 \rho}{2f} + \frac{t^3 \gamma \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \rho}{2}}{2} = \frac{t^3 \gamma \operatorname{ctg}^2 \rho + t \gamma f \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \rho}{2}}{2f}.$$

Если надежно закрепить стенку  $DN$ , то она выдержит давление  $u$ , определяемое из силового многоугольника  $Olr$  (рис. 106):

$$u = p \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \rho}{2} = t^3 \gamma \frac{\operatorname{ctg}^2 \rho + f \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \rho}{2}}{2} \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \rho}{2}.$$

Вставив значение

$$f = \frac{\sin\left(\frac{90^\circ - \rho}{2}\right) \sin^2 \rho}{\sin \frac{90^\circ + \rho}{2} (1 + \sin \rho)}$$

определяем

$$u = 0,5 t^3 \gamma \left( \frac{\operatorname{ctg}^2 \rho}{\sin \frac{90^\circ - \rho}{2} \sin^2 \rho} + \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \rho}{2} \right) \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \rho}{2}. \quad (25)$$

После упрощения

$$u = 0,5t^3\gamma \left( \frac{1 + \sin \rho}{\operatorname{tg}^2 \rho \sin^2 \rho} + 1 \right) \text{ т/м}^3. \quad (26)$$

Давление в килограммах на кв. сантиметр вертикальной выработки составит, обозначив

$$\left( \frac{1 + \sin \rho}{\operatorname{tg}^2 \rho \sin^2 \rho} + 1 \right) = f,$$
$$p = \frac{u \cdot 1000}{t^2 \cdot 10000} = \frac{0,5t^3\gamma f \cdot 1000}{t^2 \cdot 10000} = 0,05t\gamma f \text{ кг/см}^2. \quad (27)$$

Полученный нами вывод открывает новый закон давления пород на крепь вертикальных выработок, вступающий в противоречие со всеми существовавшими до настоящего времени теориями.

Наш вывод уславливает, что **величина давления на крепь подземных вертикальных выработок совершенно не зависит от глубины их**, т. е. в любой части вертикальной выработки давление окружающих пород на ее крепь остается постоянным и величина его, как это видно из выражения (27), зависит лишь от ширины или диаметра поперечного сечения этой выработки  $t$ , объемного веса окружающей ее породы  $\gamma$  и угла естественного откоса  $\rho$ , свойственного данной породе.

Действительно, формула (26) определяет давление на стенку  $DN$ , взятую нами в произвольном пункте в пределах вертикальной выработки  $EGJF$ .

Совершенно очевидно, что полученный результат мы получили бы, рассматривая всякий другой участок в пределах этой выработки независимо от его местонахождения и глубины.

Базируясь на приведенном выводе, можем отметить, что при проведении вертикальных выработок совершенно излишне увеличивать их сечение по мере углубления, как это практиковалось до настоящего времени при прохождении глубоких шахт в целях сохранения размеров сечения „в свету“ и утолщения возводимой бетонной или другой крепи, также по мере углубления их.

Можно сказать, что в жертву ошибочному представлению о зависимости величины давления от глубины при проведении вертикальных выработок принесены огромные количества излишне затраченных ценных крепежных материалов, затрачены большие средства на проведение выработок излишне большого сечения „в проходке“. Мы еще будем иметь возможность ниже, при решении практических примеров, дать наглядное представление о том, как значительно разнятся размеры крепи, определяемые по нашим формулам и формулам других авторов, выведенным исходя из того предположения, что между глубиной вертикальных выработок и величиной давления существует известная зависимость.

Говоря о постоянстве величины давления  $u$ , не зависящей от глубины выработки, необходимо заметить, что этот вывод как будто противоречит законам давления воды и близких к воде пород (например плавунцов) на стенки сосуда.

Как известно, давление воды на стенки сосуда зависит от глубины погружения последнего.

Однако, анализ полученных выражений для давления пород на стенку шахты это противоречие устраняет.

Действительно, при рассмотрении вопроса о влиянии давления породы на ее крепь в зависимости от глубины заложения штольнообразных выработок от дневной поверхности мы установили, что это влияние имеет место лишь в частных случаях, когда теоретически определенная высота параболического объема давящей породы больше фактического расстояния от выработки до дневной поверхности. В этом случае чем ближе штольнообразная выработка к дневной поверхности, тем меньше и величина давления породы на ее крепь, так как теоретически определенная высота параболического объема породы выходит за пределы дневной поверхности и тем больше, чем ближе от последней штольнообразная выработка.

Легко видеть, что это правил оприменимо и к вертикальным выработкам. Здесь также постоянство давления на стенки выработки начинается с того пункта, где высота параболического объема, определенная формулой (23), равна глубине выработки до этого пункта. Чем ближе от этого пункта к поверхности, тем давление становится меньше.

Отсюда мы легко можем определить ту глубину выработки, с которой давление становится постоянным, для чего необходимо определить лишь высоту параболического объема давящей породы.

Эта высота  $DF$  определится из формулы (23), если вес давящей породы  $x$  разделить на  ${}^2_{/3} \gamma t^2 2MC \operatorname{ctg} \rho$ , так как согласно рис. 10

$$x = {}^2_{/3} \gamma MC \cdot DFt; \quad MC = 2t \operatorname{ctg} \rho.$$

Поэтому и согласно формуле (23)

$$DF = x : {}^2_{/3} \gamma 2t^2 \operatorname{ctg} \rho = \frac{t^3 \gamma \operatorname{ctg}^2 \rho \cdot 3}{2t^2 \gamma f 2 \operatorname{ctg} \rho} = \frac{3t \operatorname{ctg} \rho}{4f}. \quad (28)$$

Для воды  $\rho = 0$ , и эта глубина

$$DF = \frac{3t \operatorname{ctg} 0}{4 \cdot 0} = \infty.$$

Постоянство давления, как видим, наступает в бесконечности.

Если вершина параболической кривой, ограничивающей внешний объем давящей воды, лежит в бесконечности, то грани этого объема пересекаются также в бесконечности, т. е. они параллельны. А это значит, что давящий на стенки призматического или цилиндрического сосуда, погруженного в воду, объем воды имеет цилиндрическую или призматическую форму.

Вес призматического объема одной и той же породы (воды) постоянного поперечного сечения прямо пропорционален высоте; стало быть, и внешнее давление на стенки сосуда прямо пропорционально глубине его погружения в воду.

Таким образом, на основе нашей теории о давлении пород на крепь вертикальных выработок мы доказали, что:

а) постоянство давления на стенки сосуда, погруженного в воду, начинается в бесконечности, т. е. что оно постоянно меняется в зависимости от глубины погружения, и что

б) это давление прямо пропорционально глубине сосуда.

Как видим, наша теория не только не вступает в противоречие с законом Архимеда, но и подтверждается им, что еще больше утверждает нас в правильности нашей теории.

Могут возникнуть сомнения по поводу того, что установленный нами закон о давлении породы на крепь подземных вертикальных выработок противоречит теории о пластичности горных пород.

Однако, это сомнение отпадает, если принять во внимание условия образования горных пород.

Действительно, образование осадочных пород происходило в водных бассейнах, т. е. в условиях, когда эти породы по их углу естественного откоса приближались к воде; в этих условиях давление вышележащих пород и воды было прямо пропорционально глубине их местоположения, что обусловило их пластичность.

Что же касается массивных и изверженных пород, то их образование происходило при огненно-жидком состоянии. При остывании они затвердевали и образовали породы, относимые нами к категории устойчивых.

Переходим к рассмотрению давления этих пород на крепь подземных вертикальных выработок.

## 7. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ВЫРАБОТКИ В УСТОЙЧИВЫХ ПОРОДАХ

Переходя к другой группе пород, устойчивость которых колеблется от состояния полного разрушения (закладка) с углом трения  $\rho = 45^\circ$  до абсолютно устойчивых, мы также не можем больше применить приведенные выше выражения.

Лишь для пород, составляющих переход от пород несвязных к связным с углом трения  $\rho$ , равным  $45^\circ$ , мы еще применяем формулу (23).

Согласно выражению (23) мы можем определить ось  $DF$  полупараболического объема давящей на площадку  $DC$  породы (рис. 10).

Так как вес этого объема

$$N = \frac{x}{2} = \frac{t^3 \gamma \operatorname{ctg}^2 \rho}{2f}$$

и одновременно объем этот с осями  $DC$  и  $DF$  на всю длину поперечного сечения выработки  $t$  весит

$$N = \frac{2DC \cdot DF t \gamma}{3},$$

то

$$\frac{2DC \cdot DF t \gamma}{3} = \frac{t^3 \gamma \operatorname{ctg}^2 \rho}{2f}.$$

При

$$DC = t \operatorname{ctg} \rho$$

$$DF = \frac{t^3 \gamma \operatorname{ctg}^2 \rho \cdot 3}{2f \cdot 2 \operatorname{ctg} \rho t^2 \gamma} = \frac{3t \operatorname{ctg} \rho}{4f} \quad (29)$$

Для переходной от „несвязных“ к устойчивым породам  $\rho = 45^\circ$ ; в этом случае, подставив значение  $f$  из выражения (21а),

$$DF = \frac{3t}{4 \cdot 0,122} \cong 6t. \quad (30)$$

Если между частицами породы существует сцепление, объем давящей породы, чтобы оторваться и оказать давление на площадку  $CB$  (рис. 11), должен оторваться по поверхности  $ANB$ .

Примем временно, с достаточным приближением, что объем давящей породы  $ANBC$  имеет форму трехгранной призмы  $ABC$  длиной  $t$ , равной

длине поперечного сечения вертикальной выработки, и выделим в пределах этого объема бесконечно узкую полоску  $NO$  шириною  $dy$ , находящуюся на расстоянии  $y$  от пункта  $C$ .

Заметим предварительно, что

$$\frac{NO}{AC} = \frac{CB - y}{CB}.$$

При

$$CB = t \operatorname{ctg} \rho$$

и согласно выражению (30)

$$AC = 6t.$$

Определяем:

$$NO = \frac{(t \operatorname{ctg} \rho - y) 6t}{\operatorname{ctg} \rho},$$

а при  $\rho = 45^\circ$

$$NO = 6t(t - y). \quad (31)$$

Вес полоски  $NO$  во всю ширину ее  $t$ , соответствующей длине поперечного сечения вертикальной выработки

$$dS = \gamma NO \cdot t dy = 6\gamma t(t - y) dy.$$

Для того чтобы оторваться, полоске  $NO$  нужно преодолеть сцепление, существующее в устойчивой породе, в пункте  $N$ .

Если обозначить сцепление на единице поверхности через  $\sigma$ , то в пункте  $N$  это сцепление по всей ширине полоски  $t$

$$dL = \sigma t dy.$$

Остающееся давление на площадку  $CB$  в пункте  $O$  составит

$$dx = dS - dL = 6\gamma t(t - y) dy - \sigma t dy. \quad (32)$$

По мере удаления от  $C$  к  $B$  веса  $dS$  уменьшаются, в то время как сцепления  $dL$  остаются постоянными. Поэтому давление  $dx$  уменьшается, и в некотором расстоянии от  $C$  к  $B$  разность между  $dS$  и  $dL$  равна нулю.

Это имеет место, на основании выражения (32), в том пункте между  $C$  и  $B$ , где

$$6\gamma t(t - y) dy = \sigma t dy$$

и где

$$y = t - \frac{\sigma}{6\gamma}.$$

Ближе к пункту  $B$  разность становится отрицательной, и элемент  $NO$  не только не оказывает давления на площадку  $CB$ , но, чтобы оторвать его, к нему нужно приложить некоторое усилие.

Таким образом, мы установили, что давление на площадку  $CB$  изме-



няется в пределах от 0 до  $x$ , в зависимости от изменения  $y$  от 0 до  $t - \frac{\tau}{6\gamma}$ .

Исходя из этого и на основании выражения (32), мы можем составить выражение:

$$\int_0^x dx = \int_0^{t - \frac{\tau}{6\gamma}} 6\gamma t dy - \int_0^{t - \frac{\tau}{6\gamma}} 6\gamma t y dy - \int_0^{t - \frac{\tau}{6\gamma}} \tau t dy,$$

откуда:

$$x = t \frac{(6\gamma t - \tau)^2}{12\gamma}. \quad (33)$$

Полупараболический объем  $ANBC$  рассматривался нами как призматический  $ABC$ , т. е. взят объем меньший действительного в

$$\frac{2}{3} AC \cdot CB : \frac{1}{2} AC \cdot CB = \frac{4}{3}$$

раза.

Внесем эту поправку в выражение (33)

$$x = \frac{4}{3} t \frac{(6\gamma t - \tau)^2}{12\gamma} = t \frac{(6\gamma t - \tau)^2}{9\gamma}. \quad (34)$$

К этому давлению следует прибавить вес обрушающейся по плоскости скольжения  $K'E$  наклоненной к вертикали под углом  $\frac{\alpha}{2} = \frac{90 - \rho}{2}$  трехгранной призмы  $CK'E$ , которая одновременно преодолевает сцепление по поверхности  $BE$ , ширина коей (при  $\rho = 45^\circ$ )

$$K'E = \frac{CB}{2} \sin \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) = \frac{t \operatorname{ctg} 45^\circ}{2 \sin \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right)} = 1,3 t$$

и длина равна длине сечения вертикальной выработки  $t$ .

При  $\rho = 45^\circ$  площадь этой поверхности

$$F = K'E \cdot t = 1,3 t^2.$$

Принимая сцепление на единицу поверхности  $\tau$ , сцепление по всей площадке составит

$$R = 1,3 t^2 \tau. \quad (35)$$

Вес призмы  $CK'E$  при  $\rho = 45^\circ$

$$Q = \frac{\gamma CK' \cdot CE \cdot t}{2} \cong \frac{t^3 \gamma}{4}. \quad (36)$$

Остающееся давление трехгранной призмы  $CBE$  составит

$$M = Q - R = \frac{t^3 \gamma}{4} - 1,3 t^2 \tau. \quad (36a)$$

Общее давление полупараболического объема и трехгранной призмы составит

$$P = x + M = \frac{t(6\gamma t - \sigma)^2}{9\gamma} + \left( \frac{t^3\gamma}{4} - 1,3 t^2 \sigma \right) = \frac{153 t^3 \gamma^2 - 95 t^2 \gamma \sigma + 4 t \sigma^2}{36 \gamma} \quad (37)$$

Учитывая, что  $\rho = 45^\circ$ , и основываясь на прежних выводах (стр. 42), мы можем определить, какому давлению ( $u$ ) должна быть противопоставлена надежная крепь в части выработки  $CE$ :

$$u = P \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{153 t^3 \gamma^2 - 95 t^2 \gamma \sigma + 4 t \sigma^2}{36 \gamma} 0,42.$$

Приняв здесь, как и при проведении штольнообразных выработок в устойчивых породах объемный вес этих пород  $\gamma = 2,5 \text{ т}$ , определяем давление на  $t \text{ м}^2$  поверхности вертикальной выработки

$$P = t(4,5 t^2 - 1,1 t \sigma + 0,018 \sigma^2) \text{ т/м}^2.$$

Пренебрегаем слагаемым  $0,018 \sigma^2$  как ничтожной величиной, в особенности при определении давления на  $1 \text{ см}^2$  когда это слагаемое при внесении значения  $\sigma = 15\,000 \text{ кг/м}^2 < \frac{3}{100} \text{ кг/см}^2$ ; имеем окончательно,

$$P = t^2(4,5 t - 1,1 \sigma) \text{ т/м}^2. \quad (38)$$

Для расчета толщины крепи обычно требуется определить давление в килограммах на  $1 \text{ см}^2$

В этом случае наше выражение примет следующий вид:

$$P_1 = \frac{t^2(4,5 t - 1,1 \sigma) \cdot 1000}{t^2 10\,000} = (0,45 t - 0,11 \sigma) \text{ кг/см}^2 \quad (39)$$

( $t$  — в метрах,  $\sigma$  — в  $\text{т/м}^2$ ).

Этим выражением мы будем пользоваться при расчетах толщины крепи вертикальных выработок в устойчивых породах.

До сих пор мы рассматривали давление на крепь вертикальных выработок прямоугольного сечения. Легко видеть, что наш метод определения давления остается таким же и при расчете давления на крепь вертикальных круглых выработок.

Определенное нами давление  $P$  по формуле (38) распределяется на плоской площадке, ширина и длина коей равна  $t$ .

Легко видеть, что в случае круглой шахты  $EF$  (рис. 10) представляет собою  $2R$ .

В этом случае одно и то же давление  $P$  распределяется уже не на плоской площадке, а на полукруглой с радиусом  $R$ . Давление поэтому на единицу поверхности  $P$  будет меньше в

$$\frac{\frac{2\pi R}{2} \cdot 2R}{2R \cdot 2R} = \frac{\pi}{2} \text{ раза.}$$

$\left( \frac{2\pi R}{2} \cdot 2R \right)$  — площадь половины участка высотой  $2R$  круглой выработки и  $2R \cdot 2R$  — площадь такого же участка в прямоугольной выработке, стороны которой для сравнения взяты шириною, равной диаметру круглой шахты —  $2R$ ).

Из сказанного вытекает, что давление на  $1 \text{ см}^2$  поверхности круглой выработки меньше такового в прямоугольной, ширина коей равна диаметру этой круглой шахты в

$$\frac{\pi}{2} = \frac{3 \cdot 14}{2} \approx 1,5$$

раза.

С этой точки зрения преимущество вертикальных выработок круглого сечения перед выработками прямоугольного сечения совершенно очевидно.

Таким образом, при определении давления на  $1 \text{ см}^2$  круглой вертикальной выработки следует в формулу (39) подставить  $2R$  вместо  $t$  и разделить результат на  $\frac{\pi}{2}$ .

Давление на  $1 \text{ см}^2$  составит

$$p = \frac{(0,45 \cdot 2R - 0,11\sigma) \cdot 2}{\pi} = (0,58R - 0,07\sigma) \text{ кг/см}^2. \quad (40)$$

Совершенно очевидно, что данный вывод мы можем отнести и к случаю проведения вертикальных выработок в рыхлых породах, подставив в формулу (27)  $2R$  вместо  $t$  и разделив его на  $\frac{\pi}{2}$ .

Следовательно, давление в этом случае составит

$$\begin{aligned} p_2 &= \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,05R\gamma}{\pi} \left( \frac{1 + \sin\rho}{\text{tg}^2\rho \sin^2\rho} + 1 \right) = \\ &= \frac{0,2R\gamma}{\pi} \left( \frac{1 + \sin\rho}{\text{tg}^2\rho \sin^2\rho} + 1 \right) \text{ кг/см}^2. \end{aligned} \quad (41)$$

### III. РАСЧЕТ КРЕПЛЕНИЯ

#### 8. КРЕПЛЕНИЕ ДВЕРНЫМИ ОКЛАДАМИ В РЫХЛЫХ ПОРОДАХ

Рассматривая перекид крепи, как балку на двух опорах (рис. 12) с нагрузкой, ограниченной параболической кривой, вершина которой лежит против середины балки, определяем полную нагрузку  $P$  этой балки.

Если расстояние между перекладинами соседних дверных окладов  $l'$ , а плотность пород  $\gamma$ , то нагрузка

$$P = \frac{4}{3} a' b' \gamma l'.$$

В нашем случае на основании выражения (8)

$$b = \frac{3}{8} \cdot \frac{a}{f} \text{ и } a' = \frac{a}{2}.$$

Площадь параболического объема давящих пород

$$S = \frac{4}{3} \cdot \frac{a}{2} \cdot \frac{3}{8} \cdot \frac{a}{f} = 0,25 \frac{a^2}{f} \quad (42)$$

и нагрузка на переклад

$$p = 0,25 \gamma l' \frac{a^2}{f}. \quad (42a)$$

Момент сопротивления балки

$$W = \frac{5}{32} \cdot \frac{Pl}{k},$$

где  $l$  — длина балки,  $k$  — допустимое напряжение на изгиб.

Таким образом, подставив  $a$  вместо  $l$  и значение для  $p$  из формулы (41), имеем

$$W = \frac{5}{32} 0,25 \gamma l' \frac{a^2}{f} \cdot \frac{a}{k} = 0,04 \frac{\gamma l'}{fk} a^3. \quad (42b)$$

Момент сопротивления для круглой балки

$$W = \frac{\pi d^3}{32} \cong 0,1 d^3,^2$$

или

$$0,1 d^3 = 0,04 \frac{\gamma l'}{fk} a^3,$$

откуда толщина круглого переклада

$$d = \sqrt[3]{0,4 \frac{\gamma l'}{fk} a^3}. \quad (43)$$

Рис. 12.

Это выражение может быть представлено в другом виде, исходя из того, что на основании выражения (42)

$$S = \frac{0,25}{f} a^2,$$

следовательно,

$$d = \sqrt[3]{\frac{S \gamma l'}{k} a}. \quad (44)$$

Эта формула дает возможность определить толщину переклада в штольнообразных выработках, проводимых в рыхлых несвязных породах при креплении дверными окладами, когда известны плотность пород, угол их естественного откоса, ширина выработки и допустимое напряжение на изгиб материала крепи.

## ПРИМЕРЫ

1. Пусть требуется определить размер сечения круглого деревянного переклада в штольнообразной выработке шириною 2 м, проводимой в глинистом грунте.

<sup>1</sup> Хютте, ч. I, изд. 9-е, стр. 604.

<sup>2</sup> Хютте, т. I, изд. 13-е, стр. 660.

Необходимо отметить, что при креплении выработок неполными дверными окладами целесообразно задавать толщину крепи и определять расстояние между рамами  $l'$ , или, что одно и то же, число необходимых рам на погонный метр, так как обычно предприятие располагает крепежным материалом определенных стандартов. Да и вообще, проверяя степень соответствия теоретических выводов практике, правильнее определять  $l'$ , так как в выборе числа рам на погонный метр возможен произвол в широких пределах.

Так, если бы при установке двух рам на погонный метр толщина крепи, определенная теоретически, оказалась бы недостаточной, легко принять три рамы, чтобы получить совпадение с практикой.

При креплении штольнеобразной выработки, проводимой в рыхлой породе, толщину крепи принимаем для дуба  $d = 150$  мм и для сосны  $d = 180$  мм.

Угол естественного откоса согласно нашей таблице  $\rho = 40^\circ$ , объемный вес породы  $\gamma = 1,8$  т/м<sup>3</sup>, или 0,0018 кг/см<sup>2</sup>, допустимое напряжение для дуба 120 кг/см<sup>2</sup>,<sup>1</sup> для сосны 100 кг/см<sup>2</sup>.

Ведя расчет в килограммах на 1 см<sup>2</sup> имеем на основании формулы(42) для дубовой крепи:

$$a = 2 \cdot 100 - (15 \cdot 2) = 170 \text{ см},$$

(15 · 2) — сумма двух диаметров стоек, укорачивающих длину пролета.

$$S = 0,25 \frac{a^2}{f} = \frac{0,25 \cdot 170^2}{\frac{\sin \left( 45^\circ - \frac{40^\circ}{2} \right) \sin^2 40^\circ}{\sin \left( 45^\circ + \frac{40^\circ}{2} \right) (1 + \sin 40^\circ)}} = 64\,732 \text{ см}^2.$$

Из выражения (44) определяем расстояние между крепями:

$$l' = \frac{d^3 k}{S \gamma a} = \frac{3375 \cdot 120}{64\,732 \cdot 0,0018 \cdot 170} = 205 \text{ мм},$$

или на погонном метре штольнеобразной выработки должно быть поставлено

$$1000 : 205 \approx 5$$

дверных окладов, т. е. при толщине дубовых бревен в 150 мм выработка должна крепиться почти сплошной крепью.

При креплении 180-мм дубовым лесом расстояние между крепями должно быть:

$$l' = \frac{18^3 \cdot 120}{64732 \cdot 0,0018 \cdot 170} \approx 350 \text{ мм}$$

и число крепей на 1 пог. м составит:

$$1000 : 350 \approx 3.$$

При креплении сосновым 180-мм лесом расстояние между крепями должно быть:

$$l' = \frac{18^3 \cdot 100}{64732 \cdot 0,0018 \cdot 170} = 293 \text{ мм}$$

<sup>1</sup> Хютте, т. 1, стр. 556.

и число крепей на 1 пог. м составит:

$$1000 : 293 = 3,5,$$

или на 2 пог. м 7 дверных окладов.

2. Требуется определить необходимое число крепей на погонный метр для направляющей галереи тоннеля или метрополитена, проводимого в земляной насыпи, насыщенной водой.

Длина пролета  $a = 3$  м.

Угол естественного откоса  $\rho = 28^\circ$ .

Объемный вес  $\gamma = 1,6$  т/м<sup>3</sup>, или 0,0016 кг/см<sup>3</sup>.

Крепление дубовым лесом  $d = 200$  мм.

Длина пролета  $a = 3 \cdot 100 - (20 \cdot 2) = 260$  см.

Площадь параболического объема давящей породы

$$S = \frac{0,25 \cdot 260^2}{\sin \left( 45^\circ - \frac{28^\circ}{2} \right) \sin^2 28^\circ} = 186300 \text{ см}^2.$$

$$\frac{186300}{\sin \left( 45^\circ + \frac{28^\circ}{2} \right) (1 + \sin \rho)}$$

Расстояние между крепями

$$l' = \frac{20^3 \cdot 120}{186300 \cdot 0,0016 \cdot 260} = 123 \text{ мм.}$$

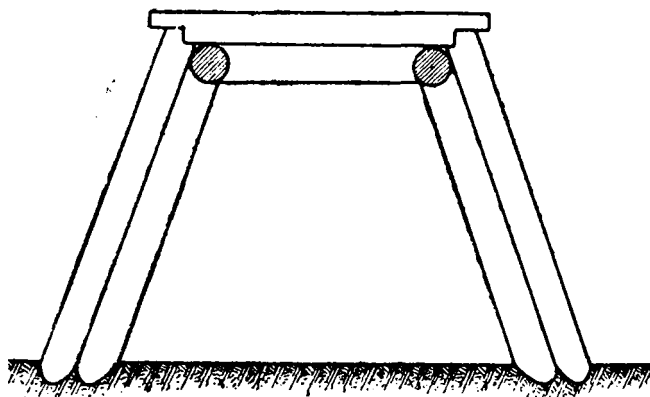


Рис. 13.

На погонный метр необходимо возводить  $1000 : 123 = 8,3$  дверных оклада.

Так как при заданном диаметре крепи 8,3 рамы не могут втиснуться на погонный метре, то, значит, при креплении выработки шириною 3 м, проводимой в породе, приближающейся к плывуну, толщина крепи в 200 мм недостаточна.

Поэтому необходимо либо крепить галерею дополнительными лонгаринами (рис. 13), либо выбрать лес большего диаметра, например 234 мм.

В последнем случае расстояние между крепями составит:

$$l' = \frac{23,5^3 \cdot 120}{186300 \cdot 0,0016 \cdot 260} \cong 235 \text{ мм,}$$

т. е. приходится вести выработку сплошным креплением.

3. Решим еще пример на плоское крепление штольнеобразной выработки большого сечения железными балками.

Пусть мы имеем выработку с пролетом  $a = 4,5$  м, проводимую по плохоекатанной гальке.

Угол естественного откоса по нашей таблице  $\rho = 43^\circ$ .

Объемный вес породы  $\gamma = 2 \text{ т}$ .

Крепление железными балками на дубовых стойках. Стойки толщиной 225 мм; балки № 20.

Длина пролета:

$$l = 450 - (22,5 \cdot 2) = 405 \text{ см.}$$

Момент сопротивления балки по Хютте равен 216.

Значит:

$$216 = \frac{pl}{k} = M.$$

При заданном условии и на основании формулы (7), обозначив расстояние между балками через  $l'$ , имеем:

$$p = \frac{\gamma l'^2 l'}{4f} \cdot 1000 = \frac{2 \cdot 4,05^2 \cdot 1000 l'}{4 \sin \left( 45^\circ - \frac{43^\circ}{2} \right) \sin^2 43^\circ} = 68000 \text{ кг.}$$
$$\frac{\sin \left( 45^\circ + \frac{43^\circ}{2} \right) (1 + \sin 43^\circ)}{\sin \left( 45^\circ + \frac{43^\circ}{2} \right) (1 + \sin 43^\circ)}$$

Принимая  $K$  для железа 900 кг/см<sup>2</sup>, имеем:

$$216 = \frac{68000 l'}{900},$$

откуда расстояние между балками составит

$$l' = \frac{216 \cdot 900}{68000} \cong 27 \text{ мм.}$$

Решение показывает, что взяты слабые балки. Если их оставить, то необходимо поставить средние стойки. Если по техническим условиям этого сделать нельзя, то нужно выбрать другой номер балки, например № 40, момент сопротивления коей 1304.

Тогда

$$l' = \frac{1304 \cdot 900}{68000} = 174 \text{ мм.}$$

## 9. КРЕПЛЕНИЕ В ПЕРЕХОДНОЙ ПОРОДЕ

При проведении штольнообразных выработок в, так называемых, устойчивых породах, в случае если последние весьма нарушены, например, вследствие близости их устьев от дневной поверхности (устья штолен в горных выработках, устья направляющих галлерей тоннелей и метрополитенов), или если породы перемяты сбросами, сдвигами и пр., для выражения размеров потребной крепи определяем давление на переклад:

$$p = \frac{4}{3} a' b' \gamma l'.$$

Согласно формуле (9)

$$b = 3a \text{ и } a' = \frac{a}{2}.$$

Площадь параболического объема давящей породы

$$S = \frac{4}{3} \cdot \frac{a}{2} \cdot 3a = 2a^2.$$

Нагрузка на переклад составит

$$p = 2a^2 l' \gamma.$$

Подставив в формулу, определяющую момент сопротивления балки,

$$W = \frac{5}{32} \cdot \frac{pl}{k}$$

значения для  $p$  и  $l = a$ , имеем

$$W = \frac{5}{32} \cdot \frac{2a^2 l' \gamma a}{k} = \frac{5}{16} \cdot \frac{a^3 l' \gamma}{k}.$$

Одновременно момент сопротивления для круглой балки

$$W = \frac{\pi d^3}{32} \approx 0,1 d^3,$$

значит в нашем случае

$$0,1 d^3 = \frac{5}{16} \cdot \frac{a^3 l' \gamma}{k},$$

откуда толщина переклада

$$d = \sqrt[3]{3,125 \frac{a^3 l' \gamma}{k}} \quad (45)$$

и расстояние между крепями

$$l' = \frac{d^3 k}{3,125 a^3 \gamma} \quad (46)$$

### ПРИМЕР

Требуется определить число дверных накладок на 1 пог. м штольно-образной выработки шириною 2 м, проводимой через нарушенные сбросом породы.

Согласно нашей таблице

$$\begin{aligned} \rho &= 45^\circ, \\ \gamma &= 2,2 \text{ кг м}^3, \text{ или } 0,0022 \text{ кг/см}^3. \end{aligned}$$

Задавшись толщиной дубового леса  $d = 180$  мм, имеем:

$$a = 2 \cdot 100 - (18 \cdot 2) = 164 \text{ см.}$$

Расстояние между крепями согласно формуле (46) составит:

$$l' = \frac{18^3 \cdot 120}{3,125 \cdot 164^3 \cdot 0,0022} = 240 \text{ мм.}$$

или на погонном метре необходимо установить

$$1000 : 240 = 4 \text{ дверных накладки.}$$



Если крепить сосновым лесом толщиной 200 мм:

$$a = 2 \cdot 100 - (20 \cdot 2) = 160 \text{ см},$$

$$l' = \frac{20^3 \cdot 100}{3,125 \cdot 160^3 \cdot 0,0022} = 285 \text{ м.м.},$$

и на погонном метре надо установить

$$1000 : 285 = 3,5 \text{ дверных оклада},$$

или 7 дверных окладов на 2 пог. м.

## 10. КРЕПЛЕНИЕ В УСТОЙЧИВЫХ ПОРОДАХ

При проходке в крепких и устойчивых породах размер сечения крепи рассчитывается в зависимости от объема давящих пород, определяемых по формулам (15 и 16).

Как и в вышеприведенных случаях, рассматриваем переклад крепи как балку на двух опорах, нагруженную параболическим объемом пород, оси которого

$$a' = \frac{a}{2} \text{ и } b = \frac{(7,5a - \sigma)^2}{18,75a}.$$

Вес такой параболы при расстоянии между дверными окладами, равном  $l'$ , на основании формулы (15):

$$p = 2 l' \frac{(7,5a - \sigma)^2}{22,5}.$$

Выразим  $p$  в килограммах:

$$p = 2 l' \frac{(7,5a - \sigma)^2}{22,5} 1000 \text{ кг.}$$

Момент сопротивления балки

$$W = \frac{5}{32} \cdot \frac{Pa}{k} = \frac{5}{32} \cdot \frac{2 l' (7,5a - \sigma)^2 a \cdot 1000 \cdot 100}{22,5 k} = 1390 \frac{a l' (7,5a - \sigma)^2}{k}$$

( $a$  — в м,  $\sigma$  в  $\text{т/м}^2$ ,  $l'$  — в м).

Для балки круглого сечения

$$W = 0,1 d^3 = 1390 \frac{a l' (7,5a - \sigma)^2}{k},$$

откуда толщина круглой крепи

$$d = \sqrt[3]{13900 \frac{a l' (7,5a - \sigma)^2}{k}}; \quad (46a)$$

или, определяя расстояние между крепями,

$$l' = \frac{d^3 \cdot k}{13900 a (7,5a - \sigma)^2}. \quad (47)$$

### ПРИМЕР

Требуется определить размер сечения круглого деревянного переклада в штальнообразной выработке шириною в 2 м, проводимой в породах, состоящих в общей массе из песчаников, перемежающихся с глинистыми сланцами и мергелями.

Согласно нашей таблице,  $\sigma = 10,5 \text{ т/м}^2$ .

Длина пролета, приняв предварительно толщину дубовой крепи  $d = 200 \text{ мм}$ ,

$$a = 2 - (0,20 \cdot 2) = 1,60 \text{ м}$$

и для сосновой крепи, при толщине ее  $d = 225 \text{ мм}$ , длина пролета

$$a = 2 - (0,225 \cdot 2) = 1,55 \text{ м}$$

Тогда при креплении выработки дубовой крепью расстояние между дверными окладами

$$l' = \frac{20^3 \cdot 120}{13900 \cdot 1,60 (7,5 \cdot 1,60 - 10,5)^2} = 200 \text{ мм.}$$

Следовательно на погонном метре должно быть установлено

$$1000 : 200 = 5 \text{ дверных окладов,}$$

т. е. в таких рыхлых породах необходимо сплошное крепление.

При креплении сосновой крепью

$$l = \frac{22,5^3 \cdot 100}{13900 \cdot 1,55 (7,5 \cdot 1,55 - 10,5)^2} = 390 \text{ мм.}$$

Число дверных окладов на погонном метре составит:

$$1000 : 390 \approx 3.$$

## 11. СВОДЧАТОЕ КРЕПЛЕНИЕ ШТОЛЬНООБРАЗНЫХ ВЫРАБОТОК

а) Рыхлые породы (рис. 14, 15).

С точки зрения лучшей устойчивости, параболическую форму сечения выработки следует считать наиболее рациональной.

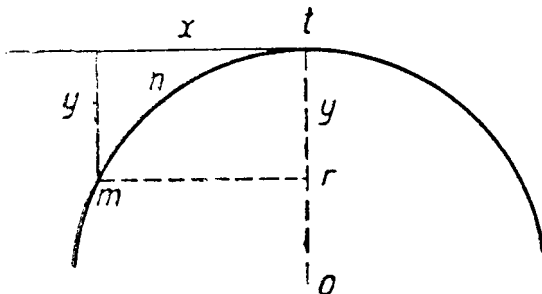


Рис. 14.

Теоретически рассуждая, можно оставить без всякого крепления штольнообразную выработку, если ее сечению придать параболическую форму с осями, по длине соответствующими вычисленным, руководствуясь шириной ее и углом естественного откоса для породы, которая окружает ее.

Практика ощупью установила, что деревянной крепи выработки лучше всего придавать трапециевидную форму, более приближающуюся к параболе, чем, например, прямоугольная.

Однако на практике в большинстве случаев своду камер, дворов, штреков и т. д. придается циркулярная форма.

Согласно формуле (9) для рыхлых пород

$$b = \frac{3a}{8f}$$

Обозначив

$$\frac{a}{2} = x \text{ и } b = y,$$

имеем в общем виде

$$y = \frac{3 \cdot 2x}{8f},$$

откуда

$$y = \frac{0,75x}{f}. \quad (48)$$

Далее, как видно из рис. 14, зависимость между  $x$  и  $y$  при условии, что  $mtt$  есть часть правильного круга, может быть выражена следующим уравнением:

$$y' = r - \sqrt{r^2 - x^2}. \quad (49)$$

Этих условий достаточно, чтобы рассчитать свод горизонтальной выработки, проводимой в несвязных породах.

Так как методы расчета сводчатой крепи выработок, проводимых в рыхлых и устойчивых породах, одинаковы, мы ограничиваемся выводом формул для каждой группы пород и решением общего примера.

б) Устойчивые породы.

Согласно формуле (16) для устойчивых пород имеем:

$$b = \frac{(7,5a - \tau)^2}{18,75a}.$$

Обозначив

$$\frac{a}{2} = x \text{ и } b = y,$$

определяем в общем виде:

$$\begin{aligned} y' &= \frac{(7,5 \cdot 2x - \tau)^2}{18,75 \cdot 2x} = \\ &= \frac{(15x - \tau)^2}{37,5x}. \quad (50) \end{aligned}$$

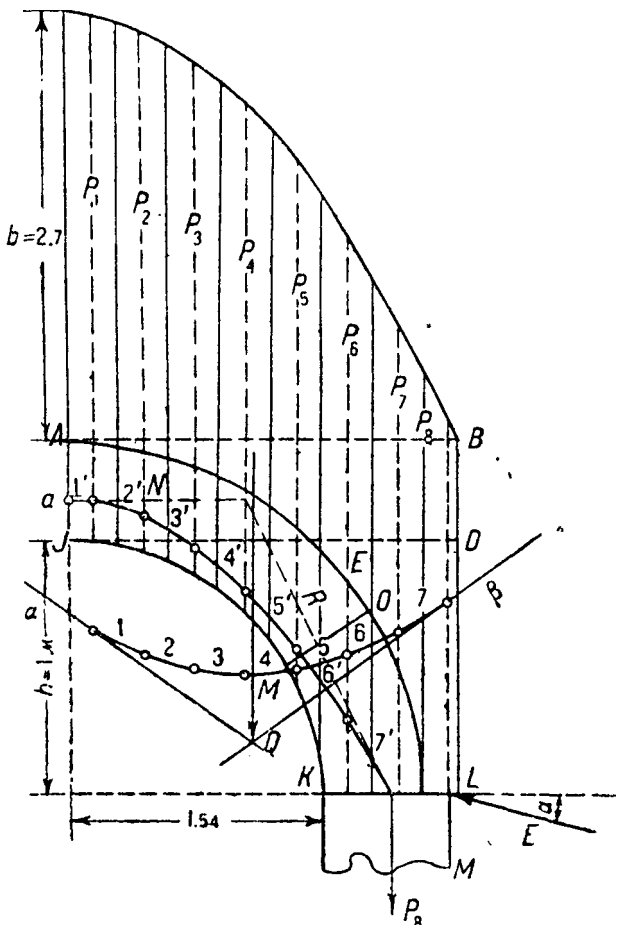


Рис. 15.

Здесь мы имеем зависимость между  $x$  и  $y$  согласно рис. 14:

$$y' = r - \sqrt{r^2 - x^2}. \quad (51)$$

Исходя из приведенных предпосылок, перейдем к решению конкретных примеров.

## ПРИМЕР

Пусть требуется определить толщину кирпичного свода штольнеобразной выработки, проводимой в породах, состоящих в общей массе из нарушенных глинистых сланцев, песчаников и мергеля (рис. 15 и 16).

Ширина выработки в проходке  $a = 3,08$  м.

Внутренняя высота свода от его пят  $h = 1$  м.

Свод полуциркулярный.

По нашей классификации здесь  $\varepsilon = 10,5$  т/м<sup>3</sup>.<sup>1</sup>

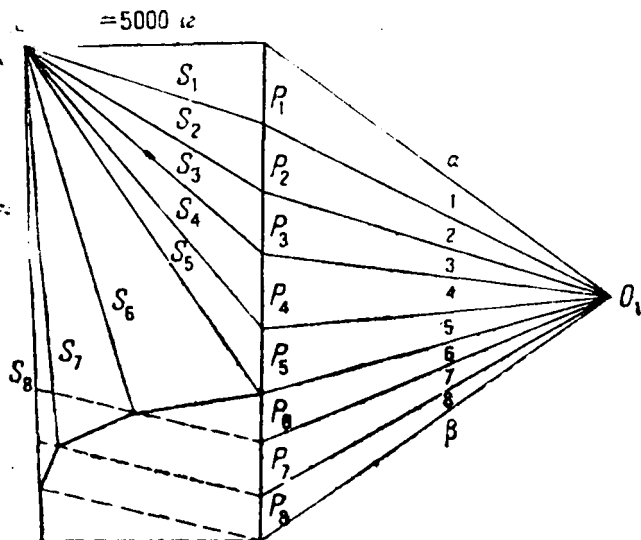


Рис. 16.

Определим предварительно ось  $b$  параболического объема давящей на свод породы.

Согласно формуле (16)

$$b = \frac{(7,5 a - \varepsilon)^2}{18,75 a} = \frac{(7,5 \cdot 3,08 - 10,5)^2}{18,75 \cdot 3,08} = 2,7 \text{ м.}$$

Определим также предварительно по Толкмицу<sup>2</sup> толщину свода в ключе и пятах по формуле

$$d_0 = \frac{0,5 p h}{(z_1 + d_0) + 0,5 p - 0,15 h},$$

где  $z_1$  — высота каменной кладки, забутки и др., соответствующая постоянной нагрузке, — для простоты высоту каменной кладки включаем в объем давящей породы, вследствие чего у нас  $z_1 = 0$ ;  $d_0$  — толщина свода в ключе в м;

<sup>1</sup> Мы умышленно для сравнения приводим пример из книги „Давления горных пород“ проф. Протодяконова, приурочивающего почему-то этот случай к насосной камере, сооруженной на б. Лидиевском руднике, где, как известно, породы соответствуют принятым нами. Проф. Протодяконов дает этим породам иную характеристику, относя их к несвязным породам (мощные толщи глины и песка). Даже в этом случае вычисленная по его формулам крепь оказывается много меньше фактической.

<sup>2</sup> Х ю т т е, т. III, изд. 13-е, стр. 245.

$p$  — равномерно распределенная нагрузка, выраженная высотой в  $m$  при делении нагрузки на объемный вес  $m^3$  породы;  $y$  нас — высота параболического объема давящей породы, умноженная на  $\frac{2}{3}$ , так как наша нагрузка, распределяясь равномерно, превращается из параболической в прямоугольную, высота которой  $p = \frac{2}{3}$ ;  $b = 1,8$  м;  $h$  — стрела прогиба внутренней направляющей свода; у нас  $h = 1$  м.

Таким образом, предварительно определенная толщина свода составит

$$d_0 = \frac{0,5 \cdot 1,8 \cdot 1}{(0 + d_0) \cdot 0,5 \cdot 1,8 + 0,15} \sim 0,4 \text{ м.}$$

Проведем касательную  $AB$  к вершине свода и построим на ней полупараболическую кривую из расчета:

$$y = b = 2,7 \text{ м.}$$

Разделим вес объема давящей породы на произвольное число отдельных полос ( $P_1, P_2, P_3$  и т. д.).

Если в нашем случае принять восемь полос, из которых — семь одинаковой ширины и одна шириною  $0,14$  м, то ширина каждой из семи полос

$$\frac{x - 0,14}{7} = \frac{1,54 - 0,14}{7} = 0,20 \text{ м.}$$

На свод  $AEL$  давит таким образом восемь полос, из которых каждая состоит из двух частей: над и под горизонталью.

Ширина каждой полосы известна по отложению, высоту же каждой определяем для полос над горизонталью, руководствуясь формулой (48), и для полос под горизонталью — формулой (49).

Высота полос над горизонталью  $AB$  (в м)

$$y_0 = \frac{(15 \frac{\sqrt{8}}{1} x - 7)^2}{37,5 \frac{\sqrt{8}}{1} x} = \frac{(15 \cdot 1,54 - 10,5)^2}{37,5 \cdot 1,54} = 2,7$$

$$y_1 = \frac{y_0 \frac{\sqrt{7}}{1} x}{\frac{\sqrt{8}}{1} x} = \frac{2,7 \cdot 1,34}{1,54} = 2,34$$

$$y_2 = \frac{y_0 \frac{\sqrt{6}}{1} x}{\frac{\sqrt{8}}{1} x} = \frac{2,7 \cdot 1,14}{1,54} = 2,00$$

$$y_3 = \frac{y_0 \frac{\sqrt{5}}{1} x}{\frac{\sqrt{8}}{1} x} = \frac{2,7 \cdot 0,94}{1,54} = 1,64$$

$$y_4 = \frac{y_0 \frac{\sqrt{4}}{1} x}{\frac{\sqrt{8}}{1} x} = \frac{2,7 \cdot 0,74}{1,54} = 1,26$$

$$y_5 = \frac{y_0 \frac{\sqrt{3}}{1} x}{\frac{\sqrt{8}}{1} x} = \frac{2,7 \cdot 0,54}{1,54} = 0,95$$

$$y_6 = \frac{y_0 \Sigma_1^2 x}{\Sigma_1^8 x} = \frac{2,7 \cdot 0,34}{1,54} = 0,68$$

$$y_7 = \frac{y_0 x_1}{\Sigma_1^8 x} = \frac{2,7 \cdot 0,14}{1,54} = 0,24$$

$$y_8 = 0$$

Приняв объемный вес породы  $\gamma = 2,5 \text{ т/м}^3$ , определяем веса этих полос над горизонталью  $AB$  на единицу проходки выработки. При этом ширина полосы известна по отложению ( $0,2 \text{ м}$ ), высота же каждой полосы определится, как средняя арифметическая двух соседних высот ( $y_0 - y_1$ ,  $y_1 - y_2$ ,  $y_2 - y_3$  и т. д.).

Вес полос над горизонталью  $AB$  (в  $\text{т}$ )

$$p_1 = 2,5 \cdot 0,2 \frac{(y_0 + y_1)}{2} = 2,5 \cdot 0,2 \frac{(2,7 + 2,34)}{2} = 1,26$$

$$p_2 = 2,5 \cdot 0,2 \frac{(y_1 + y_2)}{2} = 2,5 \cdot 0,2 \frac{(2,34 + 2,00)}{2} = 1,09$$

$$p_3 = 2,5 \cdot 0,2 \frac{(y_2 + y_3)}{2} = 2,5 \cdot 0,2 \frac{(2,00 + 1,64)}{2} = 0,91$$

$$p_4 = 2,5 \cdot 0,2 \frac{(y_3 + y_4)}{2} = 2,5 \cdot 0,2 \frac{(1,64 + 1,26)}{2} = 0,73$$

$$p_5 = 2,5 \cdot 0,2 \frac{(y_4 + y_5)}{2} = 2,5 \cdot 0,2 \frac{(1,26 + 0,95)}{2} = 0,56$$

$$p_6 = 2,5 \cdot 0,2 \frac{(y_5 + y_6)}{2} = 2,5 \cdot 0,2 \frac{(0,95 + 0,68)}{2} = 0,31$$

$$p_7 = 2,5 \cdot 0,2 \frac{(y_6 + y_7)}{2} = 2,5 \cdot 0,2 \frac{(0,68 + 0,24)}{2} = 0,23$$

$$p_8 = 2,5 \cdot 0,2 \frac{(y_7 + y_8)}{2} = 2,5 \cdot 0,2 \frac{(0,24 + 0)}{2} = 0,06$$

Высота полос под горизонталью  $JD$  (в  $\text{м}$ )

Высота полос под горизонталью на основании формулы (49)

$$y_0 = 0$$

$$y_1' = r - \sqrt{r^2 - x^2} = 1,00 - \sqrt{1,00^2 - (0,2 \cdot 1)^2} = 0,02$$

$$y_2' = r - \sqrt{r^2 - \Sigma_1^2 x^2} = 1,00 - \sqrt{1,00^2 - (0,2 \cdot 2)^2} = 0,08$$

$$y_3' = r - \sqrt{r^2 - \Sigma_1^3 x^2} = 1,00 - \sqrt{1,00^2 - (0,2 \cdot 3)^2} = 0,20$$

$$y_4' = r - \sqrt{r^2 - \Sigma_1^4 x^2} = 1,00 - \sqrt{1,00^2 - (0,2 \cdot 4)^2} = 0,40$$

$$y'_3 = r = 1,00$$

$$y'_6 = r = 1,00$$

$$y'_7 = r = 1,00$$

$$y'_8 = r = 1,00$$

Вес полос под горизонталью  $JD$  (в  $m$ ).

$$p'_1 = 2,5 \cdot 0,2 \cdot \frac{y'_0 + y'_1}{2} = 2,5 \cdot 0,2 \cdot \frac{0 + 0,02}{2} = 0,005$$

$$p'_2 = 2,5 \cdot 0,2 \cdot \frac{y'_1 + y'_2}{2} = 2,5 \cdot 0,2 \cdot \frac{0,02 + 0,08}{2} = 0,025$$

$$p'_3 = 2,5 \cdot 0,2 \cdot \frac{y'_2 + y'_3}{2} = 2,5 \cdot 0,2 \cdot \frac{0,008 + 0,2}{2} = 0,070$$

$$p'_4 = 2,5 \cdot 0,2 \cdot \frac{y'_3 + y'_4}{2} = 2,5 \cdot 0,2 \cdot \frac{0,20 + 0,40}{2} = 0,15$$

$$p'_5 = 2,5 \cdot 0,2 \cdot \frac{y'_4 + y'_6}{2} = 2,5 \cdot 0,2 \cdot \frac{0,40 + 1,0}{2} = 0,35$$

$$p'_6 = 2,5 \cdot 0,2 = 0,5$$

$$p'_7 = 2,5 \cdot 0,2 = 0,5$$

$$p'_8 = 2,5 \cdot 0,2 = 0,5$$

Вес полос над и под горизонталями (в  $m$ ).

$$P_1 = p_1 + p'_1 = 1,26 + 0,005 = 1,26$$

$$P_2 = p_2 + p'_2 = 1,09 + 0,025 = 1,11$$

$$P_3 = p_3 + p'_3 = 0,91 + 0,07 = 0,98$$

$$P_4 = p_4 + p'_4 = 0,73 + 0,15 = 0,88$$

$$P_5 = p_5 + p'_5 = 0,56 + 0,35 = 0,91$$

$$P_6 = p_6 + p'_6 = 0,31 + 0,5 = 0,81$$

$$P_7 = p_7 + p'_7 = 0,23 + 0,5 = 0,73$$

$$P_8 = p_8 + p'_8 = 0,06 + 0,5 = 0,56$$

К полученному результату следует прибавить полосы в промежутке между горизонталями  $AB$  и  $JD$ .

Вес каждой полосы от  $P_1$  до  $P_7$ :

$$2,5 \cdot 0,2 \cdot 0,4 = 0,2 \text{ т},$$

и вес  $P_8$ :

$$2,5 \cdot 0,14 \cdot 0,4 = 0,14 \text{ т}.$$

Окончательно вес полос от 1-й до 8-й (в т):

$$P_1 = 1,26 + 0,2 = 1,46$$

$$P_2 = 1,11 + 0,2 = 1,31$$

$$P_3 = 0,98 + 0,2 = 1,18$$

$$P_4 = 0,88 + 0,2 = 1,08$$

$$P_5 = 0,91 + 0,2 = 1,11$$

$$P_6 = 0,81 + 0,2 = 1,01$$

$$P_7 = 0,73 + 0,2 = 0,93$$

$$P_8 = 0,56 + 0,14 = 0,70$$

По полученным давлениям ( $P_1, P_2, P_3 \dots$ ) наносим многоугольник сил с полюсом  $O_1$ .

Точку приложения равнодействующей сил  $P_1 - P_8$  мы определяем построением веревочного многоугольника сил, руководствуясь силовым многоугольником (рис. 16) с произвольно выбранным полюсом  $O_1$ .

Пункт замыкания веревочного многоугольника линиями  $\alpha$  и  $\beta$  лежит на линии, проходящей через центр тяжести равнодействующей  $Q$ . Эта равнодействующая по условиям равновесия должна пересекаться с ее составляющими  $N$  и  $R$  в одной точке и уравниваться.

Предполагая возможность неравномерно распределенного давления объема давящей породы на свод, силу  $Q$  разлагаем таким образом, чтобы горизонтальная составляющая  $N$  силы  $Q$  проходила через нижнюю треть сечения  $AJ$  в точке  $a$  ключа свода.

Что касается составляющей  $R$ , то, как это видно из рис. 15, на свод давят веса полос  $P_1 - P_5$  включительно. Веса же полос  $P_6 - P_8$ , включая также и вес кладки, передаются соответствующей частью свода на верхний, сопряженный со сводом шов стены  $KL$ , и давление, таким образом, воспринимается этой стеной. Поэтому составляющая  $R$  проходит через треть шва  $MO$ .

Этих данных достаточно для построения веревочного многоугольника равнодействующих сил; при этом направление луча  $S_5$  совпадает с направлением  $R$  и проходит через деление  $P_5$  в диаграмме сил.

Замыканием этого луча с горизонтально направленной силой  $N$  мы определяем положение полюса  $O_2$  и величину сил  $N$  и  $R$ ; последняя соответствует длине луча  $S_3$ .

Как видно из рис. 15 и 16,  $N = 5000 \text{ кг}$ ,  $S_5 = R = 6750 \text{ кг}$ .

Что касается напряжений, вызываемых в стене, то последняя рассматривается как подпорная при давлении грунта, на которую действуют как давление полос, приходящихся непосредственно на верхний шов стены  $KL$ , так и передаваемые на стену сводом ( $P_1 - P_8$ ).

Эти веса вместе с весом стены, а также с пассивной силой  $E$ , слагаются в одну равнодействующую в опорной точке. При этом направление  $E$  образует с нормалью к стене угол естественного откоса  $\rho$ , который мы принимаем равным  $45^\circ$ , и угол трения кирпича по кирпичу  $\alpha$  равный  $35^\circ$ .



Этих данных достаточно для того, чтобы графически определить направление и величину лучей  $S_6 - S_8$ , определив также силы  $E$  по Хютте<sup>1</sup>.

Из построения видно, что

$$S_6 = 7,000 \text{ т},$$

$$S_7 = 8,000 \text{ "}$$

$$S_8 = 10,050 \text{ "}$$

Переходим к определению требующейся толщины свода, приняв допустимое напряжение для кирпичной кладки  $\sigma = 5 \text{ кг/см}^2$ .<sup>2</sup>

В ключе свода мы имеем

$$\sigma = \frac{5000 \cdot 2}{100 d},$$

откуда

$$d = \frac{5000 \cdot 2}{100 \cdot 5} \cong 20 \text{ см.}$$

В пяте свода

$$d = \frac{10050 \cdot 2}{100 \cdot 5} \cong 40 \text{ см.}$$

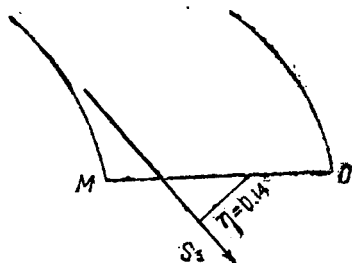


Рис. 17.

Построением веревочного многоугольника равнодействующих сил можно определить напряжение в отдельных швах кладки.

Так, в сечении  $MO$  (рис. 17) проходит полюсный луч  $S_5 = 6,75 \text{ т}$ ; здесь

$$\sigma_5 = 6S_5 \gamma,^3$$

где  $\sigma_5$  выражено в  $\text{т/м}^2$ ,

$S_5$  " " "  $\text{т}$

$\gamma$  — перпендикуляр, опущенный из конца ядра на направление  $S_5$ .

Принимая  $\sigma_5$  для кирпичной кладки  $50 \text{ т/м}^2$  и удваивая это выражение в предположении, что нагрузка неравномерна, имеем:

$$d = \sqrt{\frac{6 \cdot 6,75 \cdot 0,14 \cdot 2}{50}} = 0,52 \text{ см},$$

т. е. в точке  $M$  мы будем иметь избыток напряжения, в точке  $O$ , наоборот, избыток прочности.

Из приведенного расчета видно, как нерационально делать свод полуциркульным.

В точке  $O$  мы имеем избыток прочности, в точке  $M$  — избыток напряжения, вынуждающий усиливать крепление до толщины стен в полтора кирпича, в то время как для всех остальных сечений достаточна толщина в один кирпич. И если на Лидиевском руднике камера закреплена сводом в полтора кирпича, то этот размер при полуциркульном своде нужно считать нормальным. Если бы свод имел параболическую или близкую к ней форму, то опорная линия проходила бы через середину сечения и толщина свода могла бы быть в один кирпич.

<sup>1</sup> Хютте, т. III, изд. 13-е, стр. 243.

<sup>2</sup> Хютте, т. I, стр. 557. Предельное напряжение  $7 \text{ кг/см}^2$  мы принимаем в  $5 \text{ кг/см}^2$ .

<sup>3</sup> Хютте, т. III, изд. 13-е, стр. 216.

Определение формы внутреннего очертания свода производится прежде всего в зависимости от практических требований, предъявляемых к этому сооружению. Однако, как мы видели из примера крепления камеры, форма свода оказывает большое влияние на его прочность, и лучшей с этой точки зрения оказывается такая форма, которая приближается к очертанию границ давящего объема породы. В этом случае опорная линия пройдет близко к середине сечения свода и напряжение распределится равномерно на всю площадь этого сечения. Обычно принимают криволинейную форму сечения свода.

Наносят поперечный разрез метрополитена (рис. 18). Разбивают часть эллипса <sup>1</sup> давящей породы, приходящуюся над половиной свода, на вертикальные полосы.

Часть этих полос находится над горизонталью, касательной к вершине свода, часть — под горизонталью.

По свойству эллипса

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} = 1,$$

откуда

$$Y = \sqrt{\left(1 - \frac{X^2}{a^2}\right)b^2}.$$

Из этого выражения высоты полос  $Y$  определяются подстановкой принятой ширины полос  $X$  (высоты параболического объема давящей породы и ширины сечения тоннеля).

Что касается высот полос под горизонталью, то, так как кривая свода образована радиусами различной длины, то они определяются (согласно рис. 14) из следующих выражений:

$$Y_{mn} = \sqrt{r_m^2 - x^2},$$

$$Y_{np} = \sqrt{r_n^2 - x^2}.$$

По высоте и ширине полос (сумма каждой под и над горизонталью) и по весу  $1 \text{ м}^3$  породы определяют веса каждой полосы на единицу длины метрополитена и суммарный вес их.

Дальнейший ход расчета приведен нами при расчете сводчатого крепления подземных выработок.

Здесь мы ограничиваемся лишь изложением общего расчета тоннельных выработок, так как детальный расчет относится к области строительной механики и выходит за пределы трактуемой нами темы.

<sup>1</sup> Для простоты расчета примем, что объем давящей породы ограничен эллиптической кривой.

## 12. РАСЧЕТ КРЕПЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

Если обозначить наружный радиус (радиус в проходке) круглой вертикальной выработки через  $R$ , толщину стенок требующейся крепи через  $d$  и допустимое напряжение на сжатие материала кладки через  $K$ , то по известной формуле для труб при равномерном распределении наружного давления толщина стенок

$$d = \frac{P \cdot R}{K} \cdot 1$$

Выразив это выражение в кг на  $см^2$ , получим:

$$d = \frac{100 PR}{K} \text{ см.} \quad (52)$$

Этой формулой следует пользоваться при проведении вертикальных выработок в рыхлых породах, так как можно предполагать, что в этих рыхлых породах давление на стенки равномерно распределено по всей их поверхности.

Если же вертикальная выработка проведена в устойчивых породах, то можно опасаться неравномерного распределения давления.

Поэтому мы будем считать в этом случае, что точка приложения напряжения  $PR$ , как и при расчете давления на свод штольнообразных выработок, лежит на расстоянии  $\frac{1}{3}$  толщины кладки, и тогда наибольшее напряжение равно удвоенному среднему давлению  $P$ .

Ф-ла (52) для устойчивых пород принимает в этом случае вид:

$$d = \frac{200PR}{K} \cdot 1 \quad (53)$$

### а) Вертикальные выработки круглого сечения, проводимые в рыхлых породах

Чтобы определить толщину стенки вертикальных выработок, проводимых в рыхлых породах, следует в формулу (52) внести значение для  $P$  из выражения (41).

Тогда выражение (52) примет вид:

$$d = \frac{0,2R \gamma \cdot fR \cdot 100}{\pi K} = \frac{6,37R^2 \gamma f}{K} \text{ см.} \quad (54)$$

### ПРИМЕР

Определить толщину бетонной крепи круглой вертикальной выработки, заложенной в насыпном грунте, перемешанном с сырым песком, которому согласно нашей таблице свойственен угол естественного откоса  $\rho = 34^\circ$  и  $\gamma = 1,9$ . Радиус в проходке, считая в том числе принятую предварительно толщину стены крепления 30 см,

$$R = 3,0 \text{ м.}$$

<sup>1</sup> Хютте, т. I, изд. 13-е, стр. 666.

<sup>2</sup> Так как в породах с углом естественного откоса от  $40$  до  $45^\circ$  можно также ожидать неравномерного распределения давления, то и для них можно пользоваться из осторожности формулой (53), вводя в этом случае значение для  $P$  из выражения (40) и приняв для них также значение для  $\tau = 8,1$ .

Согласно формуле (54) и принимая допустимое напряжение для бетона  $K = 15 \text{ кг/см}^2$ ,<sup>1</sup>

$$d = \frac{6,37 R^2 \gamma f}{K b} = \frac{6,37 \cdot 3^2 \cdot 1,9 \left( \frac{1 + \sin 34^\circ}{\text{tg}^2 34^\circ \sin^2 34^\circ} + 1 \right)}{15} \approx 573 \text{ мм.}$$

б) Вертикальные выработки круглого сечения, проводимые в устойчивых породах

Для определения толщины крепления вертикальных выработок круглого сечения в устойчивых породах подставляем в выражение (53) значение для  $P$  из формулы (40), тогда

$$d = \frac{200 R (0,58 R - 0,07 \sigma)}{K} = \frac{116 R^2 - 14 \sigma R}{K} \text{ см.} \quad (55)$$

### ПРИМЕР

Определить толщину бетонной крепи круглой вертикальной выработки, проводимой в твердых песчаниках и песчаных сланцах, радиус которой, учитывая предварительно принятую толщину крепи 30 см,  $R = 3,0 \text{ м}$ .

По нашей таблице (стр. 35)  $\sigma = 12$ .

Согласно выражению (55)

$$d = \frac{116 \cdot 3^2 - 14 \cdot 12 \cdot 3}{15} = 360 \text{ мм.}$$

Для такой же выработки, но проводимой по перемежающимся пропласткам сланца и рыхлого песчаника, для которых  $\sigma = 10,5$ ,

$$d = \frac{116 \cdot 3^2 - 14 \cdot 10,5 \cdot 3}{15} = 400 \text{ мм.}$$

Интересно сравнить этот результат с общепринятым до настоящего времени расчетом по методу проф. Протодяконова, по которому толщина крепи зависит от глубины выработки.

Породам, принятым нами в последнем примере, по классификации проф. Протодяконова, свойственен угол естественного откоса  $\rho = 64^\circ$ .

Вставив задания из этого примера в его формулу и приняв глубину выработки  $H = 750 \text{ м}$ , определяем толщину крепи:

$$d = 2 \delta \frac{RH}{R} \text{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) = \frac{2 \cdot 0,0025 \cdot 300 \cdot 75000 \text{tg}^2 13^\circ}{15} = 4 \text{ м. (!)}$$

### 13. РАСЧЕТ КРЕПЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

а) Крепление на „подшашках“ в рыхлых породах

Когда требуется определить размер крепления вертикальной выработки прямоугольного сечения, поступают следующим образом.

<sup>1</sup> Хютте, т. I, изд. 9-е, стр. 557.

Если крепление производится на „подшашках“ высотой  $h$  и при длине длинной стороны бруса  $t$ , на брус действует сила

$$pht,$$

или, выразив  $t$  в см,

$$100 pht.$$

Наибольший изгибающий момент

$$M = \frac{1}{8} 100 pht \cdot 100 t = 1250 pht^2.$$

Момент сопротивления прямоугольного сечения бруса при его высоте  $a$  и ширине  $b$

$$W = \frac{ba^2}{6}.$$

Если брус квадратный, то  $b = a$  и

$$W = \frac{a^3}{6}.$$

Таким образом,

$$k \frac{a^3}{6} = 1250 pht^2,$$

откуда

$$a = \sqrt[3]{\frac{7500 pht^2}{k}}. \quad (56)$$

Для рыхлых пород, подставив значение для  $p$  из выражении (27) и выразив  $t$  в см, имеем

$$a = \sqrt[3]{\frac{7500 \cdot 0,05 t \gamma f h t^2}{k}} = \sqrt[3]{\frac{375 t^3 h \gamma f}{k}}. \quad (57)$$

где

$$f = \frac{1 + \sin \rho}{\operatorname{tg}^2 \sin^2 \rho} + 1.$$

### ПРИМЕР

Пусть требуется определить толщину деревянного крепления вертикальной прямоугольной выработки, длина длинной стороны сечения коей  $t = 4$  м. Породы — насыпной грунт. „Подшашки“ — через 0,75 м ( $h = 75$  см).

По нашей таблице (стр. 35)

$$\rho = 36^\circ, \quad \gamma = 1,4.$$

Согласно формуле (57) при креплении дубовыми брусками прямоугольного сечения

$$a = \sqrt[3]{\frac{375 t^3 h \gamma f}{k}} = \sqrt[3]{\frac{375 \cdot 4^3 \cdot 75 \cdot 1,4 \left( \frac{1 + \sin 36^\circ}{\operatorname{tg}^2 36^\circ \sin^2 36^\circ} + 1 \right)}{120}} = 120 \text{ см.}$$

Отсюда заключаем, что в рассматриваемых породах крепление нужно производить без „подшашек“, — сплошным срубом.

При расчете крепления вертикальных выработок деревом на „подшашках“ лучше задаваться толщиной брусев и определять расстояние между рамами или, что все равно, длину „подшашек“; в этом случае формула (57) примет вид

$$h = \frac{a^3 k}{375 t^3 f}. \quad (58)$$

Если задаться в нашем случае толщиной бруса в 24 см, то расстояние между рамами составит

$$h = \frac{14000 \cdot 120}{375 \cdot 64 \cdot 7,7} = 8 \text{ см},$$

или на 1 пог. м рам:

$$1000 : 80 \cong 13.$$

Совершенно очевидно, что при указанной толщине брусев разместить 13 рам на 1 пог. м невозможно. Поэтому необходимо устанавливать расстрелы, чем соответственно сократится длина поперечного сечения  $t$  вертикальной выработки, что и делается на практике даже в более устойчивых породах при заданной длине поперечного сечения выработки.

б) Крепление на „подшашках“ в устойчивых породах

И здесь мы имеем силу, действующую на брус длиной стороны вертикальной выработки,

$$100 \text{ pht},$$

и наибольший изгибающий момент

$$M = \frac{1}{8} 100 \text{ pht} \cdot 100 t = 1250 \text{ pht}^2.$$

Момент сопротивления бруса квадратного сечения со стороны квадрата  $a$

$$W = \frac{a^3}{6}$$

и

$$k \frac{a^3}{6} = 1250 \text{ pht}^2.$$

Подставив в полученное выражение значение для  $P$  из формулы (39), имеем:

$$k \frac{a^3}{6} = 1250 \text{ ht}^2 (0,45 t - 0,11 \sigma) = 562,5 t^3 h - 137,5 \sigma \text{ ht}^2,$$

откуда

$$h = \frac{ka^3}{6(562,5 t^3 - 137,5 \sigma t^2)} = \frac{ka^3}{3375 t^3 - 825 \sigma t^2}. \quad (59)$$

## ПРИМЕР

Пусть требуется определить число необходимых рам для закрепления вертикальной выработки, проводимой в мелкослонстом песчанике и крепких глинистых сланцах, при толщине квадратного дубового бруса 240 мм и при длинной стороне выработки  $t = 4$  м.

По нашей классификации для такой породы  $\sigma = 11,4$ , и согласно формуле (59)

$$h = \frac{k a^3}{3375 t^3 - 825 \sigma t^2} = \frac{120 \cdot 24^3}{3375 \cdot 4^3 - 825 \cdot 11,4 \cdot 4^2} = 253 \text{ мм},$$

или число рам на 1 пог. м составит

$$1000 : 253 \cong 4.$$

И здесь при заданной длинной стороне выработки необходимо сплошное крепление или установка расстрелов.

### в) Крепление сплошным срубом

#### 1. Вертикальные выработки в рыхлых породах.

При креплении сплошным дубом на крепь действует сила

$$100 \text{ } pta$$

(сохраняя предыдущие обозначения).

Наибольший изгибающий момент

$$M_{\max} = \frac{1}{8} p t^2 a \cdot 10000 = 1250 p t^2 a.$$

Момент сопротивления квадратного бруса

$$W = \frac{a^3}{6}$$

и

$$k \frac{a^3}{6} = 1250 p t^2 a.$$

Сократив на  $a$ , имеем:

$$k \frac{a^2}{6} = 1250 p t^2. \quad (59a)$$

Подставим значение для  $p$  из выражения (27):

$$k \frac{a^2}{6} = 1250 t^2 \cdot 0,05 t \gamma f = 62,5 t^3 \gamma f.$$

При заданной толщине бруса напряжение составит,

$$k = \frac{62,5 t^3 \gamma f \cdot 6}{a^2} = \frac{375 t^3 \gamma f}{a^2} \quad (60)$$

или, приняв допустимое напряжение для леса, определяют толщину брусьев

$$a = \sqrt{\frac{62,5 t^3 \gamma f \cdot 6}{k}} = \sqrt{\frac{375 t^3 \gamma f}{k}}. \quad (61)$$

## ПРИМЕР

Требуется определить размер крепи вертикальной выработки, проводимой в тех же условиях, что при креплении на „подшашках“ в рыхлой породе.

$$a = \sqrt{\frac{375 \cdot 4^3 \cdot 1,4 \left( \frac{1 + \sin 36^\circ}{\operatorname{tg}^2 36^\circ \sin^2 36^\circ} + 1 \right)}{120}} = 560 \text{ мм.}$$

т. е. при заданной длине  $t$  нельзя крепить без расстрелов.

Если ставить расстрелы и расчет вести по короткой стороне выработки, например,  $t = 2,5 \text{ м}$ , то

$$a = \sqrt{\frac{375 \cdot 2,5^3 \cdot 1,4 \left( \frac{1 + \sin 36^\circ}{\operatorname{tg}^2 36^\circ \sin^2 36^\circ} + 1 \right)}{120}} = 240 \text{ мм.}$$

В случае если брус прямоугольного сечения (а не квадратного), необходимо задаться высотой его  $b$  и определять его толщину, исходя из выражения

$$W = \frac{ba^2}{6}.$$

Для крепления сплошным срубом  $b$  сокращается. При креплении же на „подшашках“ высота бруса должна быть учтена.

2. Крепление прямоугольных выработок в устойчивых породах  
В формуле (59а) заменяем  $p$  его значением из формулы (39):

$$k \frac{a^2}{6} = 1250 t^2 (0,45 t - 0,11 \sigma) = 562,5 t^3 - 137,5 \sigma t^2,$$

откуда

$$a = \sqrt{\frac{(562,5 t^3 - 137,5 \sigma t^2) 6}{k}} = \sqrt{\frac{3375 t^3 - 825 t^2 \sigma}{k}}, \quad (62)$$

или допустимое напряжение

$$k = \frac{3375 t^3 - 825 t^2 \sigma}{a^2}. \quad (63)$$

## ПРИМЕР

Для прямоугольной вертикальной выработки с длинной стороной сечением в 4 м, закрепляемой сплошным срубом, определить необходимую толщину дубовых брусев при проходке в породах, для которых  $\sigma = 12$ .

Согласно выражению (62) имеем:

$$a = \sqrt{\frac{3375 \cdot 64 - 825 \cdot 16 \cdot 12}{120}} = 217 \text{ мм.}$$

Как видим, выработку данного сечения можно крепить без расстрелов.



0<sup>2</sup>  
4153

## АННОТАЦИЯ

Настоящая работа является результатом 20-летнего изучения автором явлений, происходящих в горных породах при проведении подземных горных выработок и туннелей.

В результате критического обзора существующих теорий автор, на основании точного математического анализа, устанавливает новые законы, меняющие существовавшее ранее представление о них, что имеет большое значение для техники горного дела.

По отзывам проф. А. М. Терпигорева и покойного проф. И. И. Бобарыкова, опубликование этой работы обогатит нашу русскую горную литературу и даст возможность инженерам, студентам и техникам пользоваться ею, как научным пособием.



A  
4153