

## Учебные вопросы

|                                                                   |   |
|-------------------------------------------------------------------|---|
| Определение горного давления.....                                 | 1 |
| История.....                                                      | 1 |
| Горное давление в ненарушенном (нетронутом) массиве. ....         | 2 |
| Горное давление в капитальных и подготовительных выработках. .... | 2 |

## Определение горного давления

**ГОРНОЕ ДАВЛЕНИЕ** (а. rock pressure; н. Gebirgsdruck; ф. pression des terrains; и. presion del terreno) — напряжения, возникающие в массиве горных пород, вблизи стенок выработок, скважин, в целиках, на поверхностях контакта порода — крепь в результате действия главным образом гравитационных сил, а также тектонических сил и изменения температуры верхних слоев земной коры.

Наиболее общей формой проявления горного давления является деформирование горных пород, которое приводит:

- к потере ими устойчивости,
- формированию нагрузки на крепь,
- динамическим явлениям (горным ударам, внезапным выбросам).

Поэтому при проведении горных выработок предварительно рассчитывают горное давление для определения прочности несущих элементов подземных сооружений (стенок выработок, целиков и крепей) и выбора способов управления горным давлением.

## История

Первые методы расчёта горного давления основывались на гипотезе, согласно которой горное давление вызвано весом определённого объёма пород, приуроченного к данному несущему элементу. Одной из наиболее распространённых была гипотеза Турнера (Франция, 1884), на основе которой горное давление в целиках при камерно-столбовой системе разработки определяется весом столба пород (от уровня залежи до поверхности), ограниченного в плане осями симметрии прилегающих к целику камер или просеков. На этой гипотезе основан метод расчёта Л. Д. Шевякова.

Аналогичные гипотезы о горном давлении на крепь подготовительных выработок исходили из предположения о действии на крепь веса столба пород от выработки до поверхности с основанием, равным пролёту выработки. Однако оно приводило даже для небольших глубин к нагрузкам, которые не могла бы выдержать крепь. Поэтому были выдвинуты гипотезы о действии на крепь веса пород в пределах треугольного или сводчатого объёма с основанием, по-прежнему равным пролёту выработки. Наибольшую известность получила гипотеза русского учёного М. М. Протодяконова (1907), в которой указанный объём представляет собой параболический свод. Расчёты по этой теории, для глубин до 200-300 м (при отсутствии тектонических напряжений) дают практически приемлемые результаты.

Наряду с упомянутыми гипотезами развивалось направление, сводившее изучение горного давления к задаче изучения напряжённо-деформированного состояния массива, не потерявшего сплошности.

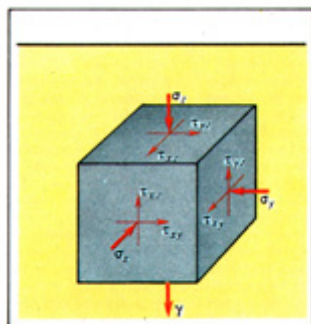
Упругое напряжённо-деформированное состояние в окрестности горизонтальной круглой подготовительной выработки теоретически изучено А. Леоном (Германия, 1908); им же совместно с Ф. Вильхаймом (Германия, 1910) поставлены опыты по разрушению стенок такой выработки на моделях из мрамора. Для вертикального ствола упругая задача решена советский учёным А. Н. Динником в 1926, попутно им дан вывод одной из наиболее распространённых формул для определения коэффициента бокового распора.

Более детальное решение для незакреплённого ствола получено советским учёным С. Г. Лехницким (1937). Упругопластичность, напряжённо-деформированное состояние в окрестности горизонтальной и вертикальной круглой выработки рассмотрел Р. Феннер (Чили, 1938). В его решении горное давление на крепь определяется минимальным значением, при котором окружающая выработку пластинная зона будет находиться в равновесии.

Принципиальной для развития теории горного давления явилась работа советского учёного Г. Н. Савина (1947), в которой использовано условие совместности перемещений контактирующих друг с другом точек поверхности выработки и крепи. Это позволило теоретически объяснить влияние податливости крепи на величину горного давления. А. Лабас (Бельгия, 1949) предложил рассматривать поведение пород в разрушенных областях вокруг выработок как поведение сыпучей среды, характеризующейся внутренним трением и сцеплением.

В 1954 советский учёный Г. Н. Кузнецов впервые сформулировал фундаментальные понятия о двух крайних режимах работы крепи: заданной нагрузки и заданной деформации; дальнейшее развитие эти понятия получили в работах советского учёного Г. А. Крупенникова и его школы. Г. Н. Кузнецовым сформулирована также концепция шарнирно-блочных систем, образующихся в кровле очистных выработок. Советский учёный К. В. Руппенейт на основе предложений Г. Н. Савина и А. Лабаса построил универсальную расчётную схему, позволяющую связать горное давление на крепь подготовительной выработки с упругими и прочностными свойствами пород. Ю. М. Либерман, модифицировав схему К. В. Руппенейта, разработал метод, позволяющий определить оптимальная жёсткость крепи. В конце 70-х гг. вновь возродился интерес к определению горного давления на крепь как веса некоторого объёма сыпучей породы; достижения в этой области связаны с работами советского учёного Е. И. Шемякина и др.

### Горное давление в ненарушенном (нетронутом) массиве.



Если рассматривать массив, в котором ещё нет горных выработок, как однородный и изотропный с горизонтальной поверхностью и учитывать лишь гравитационные силы, то в нём будут действовать начальные нормальные напряжения:

$$\sigma_z = gH; \quad \sigma_x = \sigma_y = \xi gH,$$

где

$z, x, y$  — главные оси.

$H$  — глубина от поверхности;

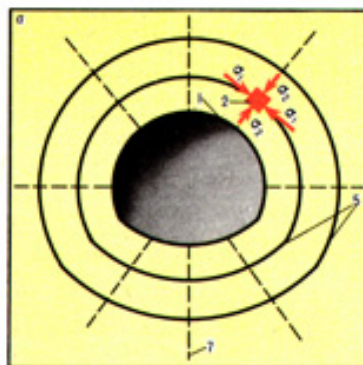
$g$  — объёмный вес;

$\xi$  — коэффициент бокового давления (распора).

Начальные касательные напряжения  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$  равны нулю; поэтому начальные напряжения представляют собой главные нормальные напряжения, в строгом соответствии с теориями механики грунтов;

## Горное давление в капитальных и подготовительных выработках.

При проведении горизонтальных капитальных и подготовительных выработок главные нормальные напряжения изменяются, а главные оси тензора напряжения поворачиваются по сравнению с начальными. В плоском сечении, перпендикулярном оси выработки (вдали от забоя), напряжённое состояние каждой точки можно охарактеризовать главными нормальными напряжениями  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  и линиями, указывающими направление главных осей в каждой точке, т.н. траекториями главных напряжений.



Напряжения  $\sigma_2$  вблизи выработки уменьшаются по сравнению с напряжениями в нетронутом массиве, а напряжения  $\sigma_1$  могут значительно возрасть или менять знак, вызывая опасное растяжение. Главные нормальные напряжения, направленные параллельно (или почти параллельно) оси выработки, вдали от забоя практически не изменяются. Концентрация напряжений  $\sigma_1$ , как правило, неодинакова в разных точках поверхности выработки, сильно возрастающая в углах и закруглениях малого радиуса кривизны. Если концентрация напряжений не слишком велика, то напряжения  $\sigma_1$  имеют общую тенденцию к убыванию при удалении от выработки (рис. 2, б), а  $\sigma_2$  к возрастанию. При больших концентрациях напряжения превосходят соответствующие пределы прочности пород, и вблизи поверхности выработки эти породы начинают пластически деформироваться или хрупко разрушаться (зона неупругих деформаций). В этой зоне напряжения  $\sigma_1$  падают по сравнению с теми значениями, которые наблюдались до её образования, и меняется характер их распределения. Максимум напряжений  $\sigma_1$  приурочен к внешней границе зоны неупругих деформаций, на которой они могут претерпевать разрыв. Смещения точек поверхности выработки увеличиваются с удалением от забоя, однако на расстоянии 4-5 пролётов выработки наступает их стабилизация.

Дальнейший рост смещений во времени обусловлен реологическими свойствами горных пород. При прочих равных условиях смещения увеличиваются с ростом глубины разработки и уменьшением показателей прочности и модуля деформации пород.

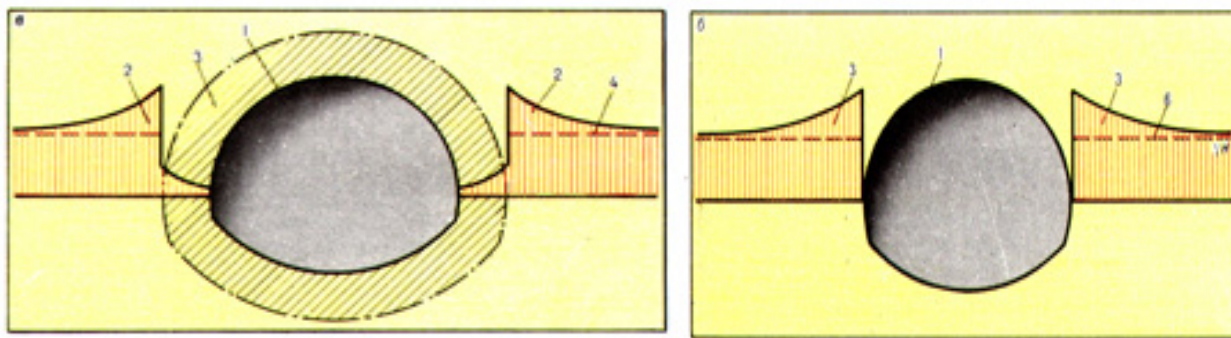
Таким образом, роль крепи в выработке сводится к предотвращению чрезмерного развития зоны неупругих деформаций и обрушения пород. При достаточно большой жёсткости крепи она работает в режиме заданной (или взаимовлияющей) деформации и горное давление возникает вследствие того, что крепь воспринимает прирост смещений с момента её установки, который зависит от давления ( $p$ ). Поэтому последнее можно определить из условия совместности смещений:

$$U_t(p) = U_0 + U_t^k(p),$$

где  $U_t(p)$  — смещение поверхности выработки в момент времени  $t$ ;

$U_0$  — смещение поверхности выработки до наступления контакта между крепью и этой поверхностью;

$U_t^k(p)$  — смещение контура крепи в момент времени  $t$ . Решение этого уравнения (относительно  $p$ ) находят по графику (рис. 4).



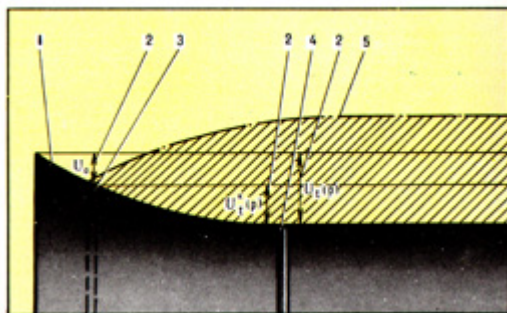
### 33. Формы сводов обрушения и характер разрушения горных пород над сводами обрушения.

Свод естественного равновесия своими пятнами опирается на массив по бокам выработки. При недостаточной прочности боковых пород происходит сползание призм породы шириной  $t$ , которые оказывают на крепь боковое давление. При этом полупролет свода естественного равновесия будет больше полупролета выработки на ширину сползающих призм.

Порода внутри этого свода оказывается неуравновешенной и давит на крепь. Величина давления на крепь определяется весом породы.

Свод естественного равновесия своими пятнами опирается на массив по бокам выработки. При недостаточной прочности боковых пород происходит сползание призм породы шириной  $t$ , которые оказывают на крепь боковое давление. При этом полупролет свода естественного равновесия будет больше полупролета выработки на ширину сползающих призм.

При наличии в почве выработки глин и некоторых глинистых сланцев происходит их выдавливание внутрь выработки. Это явление носит название пучения пород, которое усиливается при набухании пород в присутствии влаги. Для предотвращения деформации выработки, пройденной в таких породах, крепь необходимо устанавливать по всему периметру выработки.



## Методы расчета горного давления

Наибольшее распространение получила гипотеза свода, развитая в работах проф. М. М. Протодяконова. По этой гипотезе при проведении горизонтальной выработки существовавшие до того в породах напряжения перераспределяются, взаимно уравниваясь по некоторой сводчатой линии. М. М. Протодяконов указал, что кривая свода естественного равновесия близка к параболе, высота которой или высота свода (м)

$$b = a/f$$

где  $a$  -- полупролет выработки, м;

$f$  -- коэффициент крепости пород.

Вертикальное горное давление создается весом вывала породы, отделившегося от этого свода.

Теория проф. М.М. Протодяконова, предложена им для широкого диапазона пород — от слабых до крепких скальных. В качестве объединяющей их характеристики в этой теории принят коэффициент  $f$

крепости, являющийся кажущимся коэффициентом трения, т.е. тангенсом угла  $\bar{\varphi}$  внутреннего трения, определенного с учетом сцепления  $c$  между частицами породы. Кажущийся коэффициент трения равен отношению касательного  $\tau$  и нормального  $\sigma$  напряжений на контакте между частицами породы в момент предельного равновесия, т. е.

$$f = \operatorname{tg} \bar{\varphi} = \frac{\tau}{\sigma} = \frac{\sigma \operatorname{tg} \varphi + c}{\sigma} = \operatorname{tg} \varphi + \frac{c}{\sigma}$$

где  $\varphi$  — действительный угол внутреннего трения породы.

Из рассмотрения общего выражения для  $f$  (для связных пород) можно сделать вывод, что в сыпучих породах ( $c = 0$ ) он равен  $\operatorname{tg} \varphi$ .

В скальных породах истинное сцепление  $c$  определяется силами молекулярного сцепления. В этом случае проф. М.М. Протоdjаконов рекомендует определять коэффициент крепости породы в зависимости от ее кубиковой прочности  $R$  (кгс/см<sup>2</sup>) на раздробление:

$$f = \frac{R}{100}$$

На основании наблюдений за поведением крепей и обобщения обширного опыта проведения горных выработок проф. М.М. Протоdjаконовым предложена классификация пород по крепости. В соответствии с ней породы делятся на десять категорий (от I до X), для которых коэффициент крепости изменяется от 20 до 0,1.

Принятие в качестве универсальной характеристики коэффициента  $f$  крепости породы эквивалентно отождествлению всех пород с сыпучими телами, имеющими условный угол внутреннего трения

$$\bar{\varphi} = \operatorname{arctg} f.$$

(8)

В сыпучих телах в стенах выработки образуются плоскости сползания, наклоненные под

углом ( $45^\circ - \frac{\bar{\varphi}}{2}$ ) к вертикали (рис. 35). Вследствие этого расширяется зона нарушения окружающих выработку горных пород. На уровне верха обделки пролет этой зоны

$$B = b + 2h \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\bar{\varphi}}{2} \right),$$

(9)

где  $b$  — пролет выработки с учетом перебора, принимаемого в зависимости от метода разработки породы в пределах от 5 до 15 см с каждой стороны выработки (большие значения перебора соответствуют применению взрывного способа работ);

$h$  — высота выработки.

Над выработкой и призмами сползания образуется вывал, верхняя граница которого носит название свода давления.

Выше свода давления находится несущий свод, прочность которого должна быть достаточной для того, чтобы выдержать давление вышележащих более слабых пород.

Свод давления (см. рис. 35), рассматриваемый как тонкая арка, составленная из частиц сыпучего тела, может находиться в равновесии под действием вертикальной нагрузки  $p$ , принимаемой равномерно распределенной, при совпадении кривой давления с осью свода. Очевидно, что при принятой нагрузке свод давления должен быть очерчен по квадратной параболе.

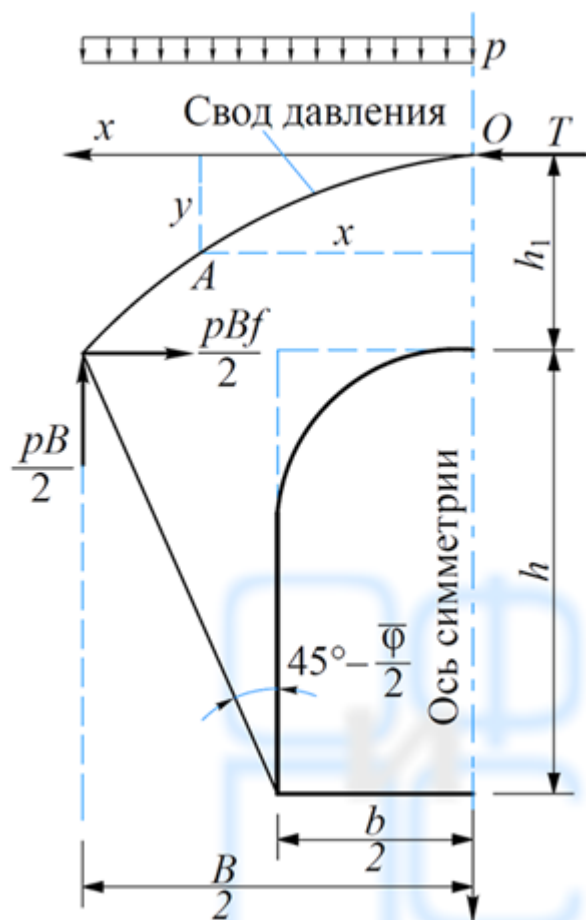


Рис. 35. Свод давления по М.М. Протодяконову

Условием работы свода на центральное сжатие являются уравнения:

$$\Sigma M_A = 0;$$

$$Ty - \frac{px^2}{2} = 0$$

Распор свода

$$T = \frac{px^2}{2y} = \frac{pB^2}{8h_1}$$

Условием устойчивости пят свода от сдвига служит неравенство

$$T < \frac{pB}{2} f$$

Если ввести величину запаса устойчивости пят свода  $\Delta = \tau h_1$  пропорциональную высоте свода давления, получим:

$$\frac{pBf}{2} - T = \tau h_1$$

$$\tau = \frac{pB}{2} \left( \frac{f}{h_1} - \frac{B}{4h_1^2} \right)$$

Высота свода давления, образующегося над выработкой, определяется из условия максимума запаса устойчивости пят свода, чему соответствует равенство

$$\frac{d\tau}{dh_1} = 0$$

Или

$$\frac{pB}{2} \left( -\frac{f}{h_1^2} + \frac{B}{2h_1^3} \right) = 0$$

Отсюда высота свода давления

$$h_1 = \frac{B}{2f}$$

(10)

Исследуя вторую произвольную  $\frac{d^2\tau}{dh_1^2}$  при  $h_1 = \frac{B}{2f}$ , нетрудно убедиться, что  $\frac{d^2\tau}{dh_1^2} < 0$ , т.е. полученная высота свода давления действительно соответствует максимуму  $\Delta$ .

Интенсивность  $q$  вертикального горного давления по теории М.М. Протодяконова определяется как произведение ординаты квадратной параболы на объемный вес пород, т.е.  $q = \gamma(h_1 - y)$ .

Как видно из приведенного вывода, формула (10) дает значение высоты свода давления, образующегося над незакрепленной выработкой и, следовательно, максимальную интенсивность горного давления, соответствующую гипотезе сводообразования. К недостаткам формулы проф. М.М. Протодяконова относятся: прямолинейная зависимость высоты свода от пролета выработки, тогда как в действительности в малых выработках давление падает быстрее уменьшения пролета; невозможность применения формулы в неоднородных напластованиях; трудность количественной оценки коэффициента крепости породы, который должен приниматься с учетом степени трещиноватости и обводненности

породы.