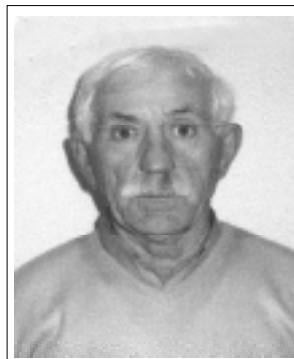


Формирование нагрузки от покатных вывалов и при сплошном сводообразовании

А.В. Тимченко, В.Н. Пустобриков, Т.С. Цидаев



Аспирант
СКГМИ(ГТУ)
А.В. Тимченко



Д. т. н.
СКГМИ(ГТУ)
В.Н. Пустобриков



К.т.н.,
ген. директор ССЦК
Т.С. Цидаев

Цель исследований заключалась в определении полей напряжений на контуре выработок на незначительной глубине, установление мест концентрации максимальных напряжений по отношению к обнаженной поверхности проходимой выработки.

На практике (по замерам на действующих выработках Садонского комбината) реализация деформирования (процессов) в массиве проявляются в виде вывалов пород – локальное (случайное) вывалообразование, сплошное сводообразование или их деформирование без разрывов сплошности (без вывалов).

Обрушение кровли с образованием свода различной конфигурации и размеров вызвано как об-

рушением пород от собственного веса, так и в результате их разрушения сжимающими или растягивающими напряжениями [1,2]. На участках, где в процессе разрушения кривизна увеличивается, сжимающее напряжение возрастает, а растягивающее уменьшается, и наоборот, на выполаживающих участках контура сжимающие напряжения уменьшаются, а растягивающие – увеличиваются.

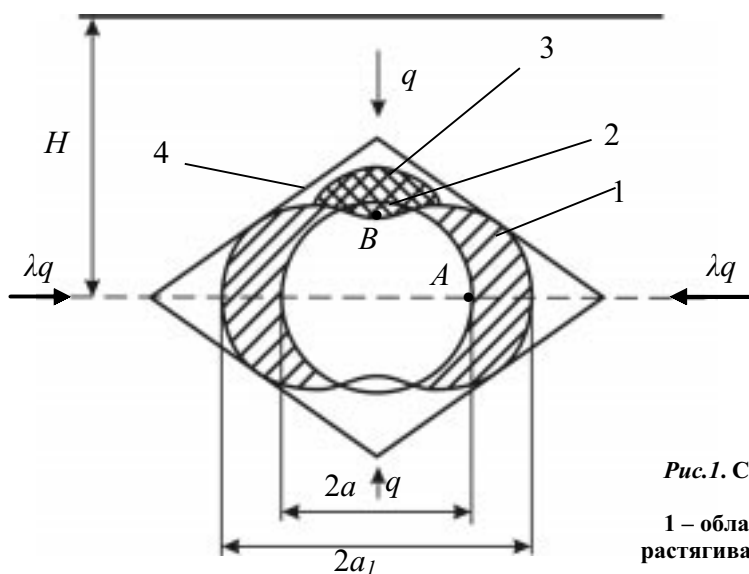
Таким образом, на контуре выработки участки с большой кривизной – неровности, образующиеся при буровзрывной проходке выработок, угловые точки и т.д. являются очагами высокой концентрации напряжений. В процессе разрушения контур выработки приобретает новую форму, следствием этого является и новое поле напряжений, которое вызывает дальнейшее напряжение, и так до тех пор, пока форма контура не приобретет устойчивые очертания.

Рассмотрим выработку кругового поперечного сечения, расположенную в массиве горных пород на глубине H (м) от поверхности, с начальным полем напряжений ($\sigma_z = q = \rho H$ и

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \rho H, \text{ где } \lambda = \frac{\mu}{1-\mu}$$

Рис.1. Схема разрушения пород в неравномерном начальном напряжении.

1 – область сжимающих напряжений; 2 – область растягивающих напряжений; 3 – начало сводообразования; 4 – контур



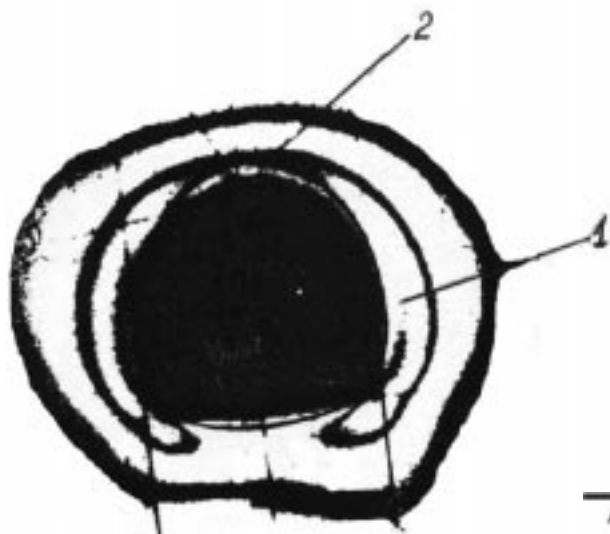


Рис.2. Распределение напряжений вокруг выработки опико-поляризационным методом: 1 – область сжимающих напряжений; 2 – область растягивающих напряжений.

коэффициент бокового распора, равный 0,33, μ - коэффициент Пуассона (рис.1). Произведем расчеты согласно формулам [1], и, построив эпюры напряжений, видим, что в точке А действуют максимальные сжимающие напряжения, в точке В они равны нулю. Если сжимающие напряжения в боках выработки превышают прочность пород, то они разрушаются (область 1, рис. 1). При этом происходит увеличение пролета и, следовательно, выполаживание контура сводовой части. Это (рис.1) в свою очередь вызывает появление в кровле растягивающих напряжений (2) с последующим образованием свода обрушения (3). По данным опико-поляризационного моделирования (рис. 2) получается, что процесс разрушения прекращается после того, как контур вы-

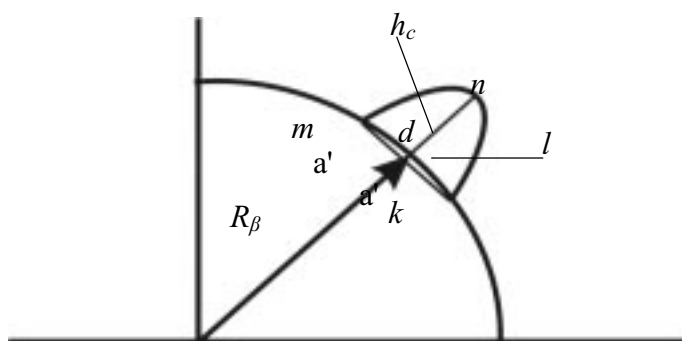


Рис.4. Схема к определению нагрузки на крепь от локального вывала в однородном массиве.

работки приобретет форму шатра (4), что подтверждено практикой [4].

В соответствии с изложенными положениями, локальное вывалообразование возможно на тех участках, где сосредоточены высокие концентрации напряжений или породы пониженной прочности (слоистостые, трещиноватые).

Рассмотрим местоположение и размеры разрушаемого участка породного контура выработки от локального вывалообразования (рис.3).

В кровле выработки, проходимой в алевролитовых породах на небольшой глубине (рис. 4) прочностью 64 МПа, находится разрушенный участок ($mk = l$) незначительной длины. Разрушения в других

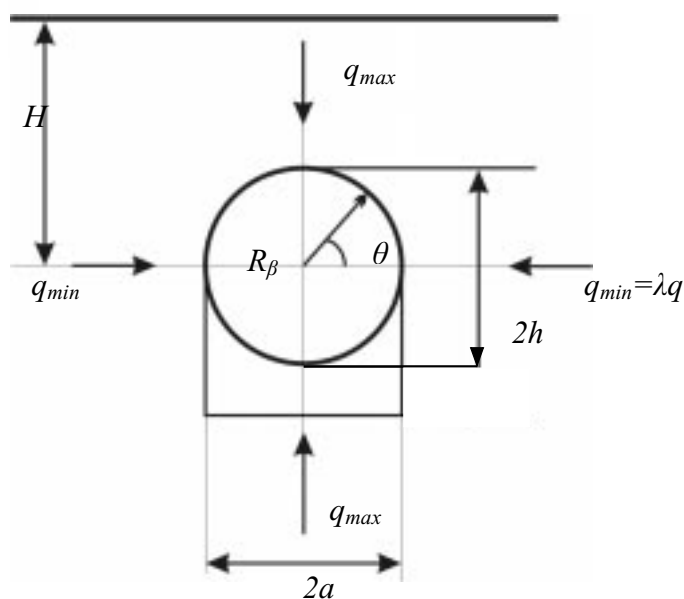


Рис. 3. Расчетная схема определения нагрузки на крепь от локального вывала в однородном массиве.

точках отсутствуют. Зная длину нарушенного участка, вычислим по известным решениям проф. М.М. Протождяконова высоту свода обрушения:

$dn = h_c = \frac{a}{2f}$, где f – коэффициент крепости пород на участке разрушения;
 a – полупролет выработки, м.

$$\text{Хорда сегмента } a' = 2R_B \sin\left(\frac{180l}{2\pi R_B}\right),$$

где R_B – радиус дуги l , м (рис.4).

Площадь вывала (S) определяется как разность площади параболы kpn и сегмента kmd , т.е.

$$S = \frac{R_B^2}{6} \left[8 \left(1 + \frac{l}{2R_B f} \right) \sin \alpha - \frac{3l}{R_B} - \sin 2\alpha \right]$$

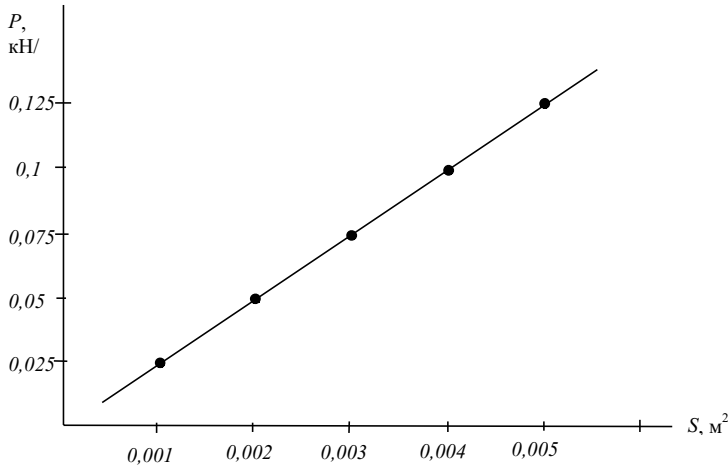


Рис. 5. Изменение нагрузки от площади сечения вывалов.

$$\text{где } \alpha = \frac{180l}{2\pi R_\beta}; \quad 2\alpha = \frac{180l}{\pi R_\beta}$$

Нагрузка от веса вывала породы в расчете на площадь поверхности огражденной крепи, будет равна

$$P = \rho \cdot S.$$

Следовательно, нагрузка \$P\$ при увеличении смещения вывала \$S\$ возрастает по линейному закону (рис. 5).

В слоистых породах причиной локального вывалообразования является пониженная прочность между слоями. Значения прочностных характеристик на контактах между слоями значительно меньше, поэтому разрушение в массиве будет происходить именно здесь. Напряженно-деформированное состояние вокруг выработок описывается следующими выражениями для упругой среды [6, 7]:

$$\left. \begin{matrix} \sigma_\theta \\ \sigma_r \end{matrix} \right\} = q \left(1 \pm \frac{1}{r^2} \right); \quad \tau_{r\theta} = 0. \quad (1)$$

Переходим от полярной системы к прямоугольной [8]

$$\left. \begin{matrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{matrix} \right\} = \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \pm \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \cos 2\theta, \\ \tau_{xy} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \sin 2\theta, \quad (2)$$

где \$\theta\$ – полярный угол, отсчитывающийся от оси \$x\$.

Подставляя (1) в (2), получим:

$$\left. \begin{matrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{matrix} \right\} = q \left(1 \pm \frac{1}{r^2} \right) \cos 2\theta,$$

$$\tau_{xy} = q \frac{1}{r^2} \sin 2\theta. \quad (3)$$

Разрушение носит хрупкий характер и проявляется в виде трещинообразования на контактах. Условия разрушения [9]

$$\tau_{xy} \geq \sigma_y \operatorname{tg} \varphi_k + C_k, \quad (4)$$

где \$\varphi_k\$ и \$C_k\$ – параметры огибающих предельных кругов для контактов.

По данным исследований для условий Джимидонского участка \$C_k = (0,6-0,7) \cdot C\$ (для условия микрослоистости), а для поверхности отдельных и контактных слоев \$C_k = (0,2-0,5) \cdot C\$, где \$C\$ – сцепление для основной породы, МПа; \$\varphi_k\$ – угол внутреннего трения, град.

Подставляя (3) в (4), получим функцию \$r_p = f(\theta)\$, позволяющую описать размеры области разрушений (рис. 6)

$$r_\theta = \sqrt{\frac{\sin(2\theta_3 - \varphi_k)}{\sin \varphi_k + \frac{C_k}{q} \cos \varphi_k}}, \quad (5)$$

$$\text{где } \theta_3 = 45^\circ - \frac{\arcsin\left(\sin \varphi_k + \frac{C_k}{q} \cos \varphi_k\right)}{2}, \quad (6)$$

а затем высоту вывала

$$h_c = R_\beta \left[\sqrt{\frac{\sin(2\theta_3 - \varphi_k)}{\sin \varphi_k + \frac{C_k}{q} \cos \varphi_k}} - 1 \right], \quad (7)$$

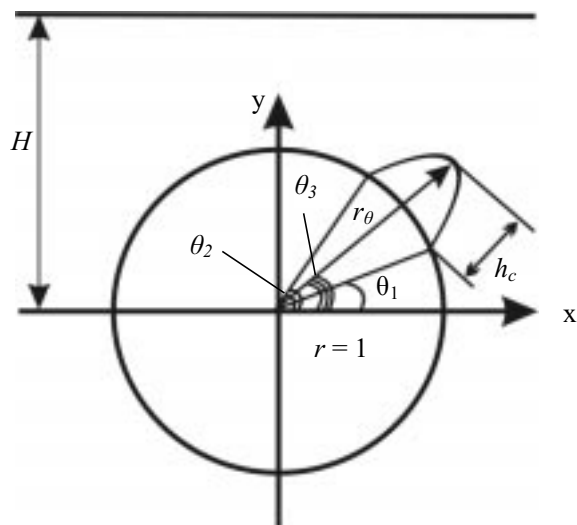


Рис. 6. Расчетная схема к определению нагрузки на крепь от локального вывала в слоистом массиве.

Границы вывала по периметру определяются углами θ_1 и θ_2 , где $2 \sin 2\theta \geq 0$, тогда

$$\theta_{1,2} = \frac{\arcsin\left(\sin \varphi_k + \frac{C_k \cos \varphi_k}{q}\right) \pm \varphi_k}{2}. \quad (8)$$

Площадь вывала

$$S = \frac{4}{3} h_c R_\beta \sin \frac{\theta_3}{2}. \quad (9)$$

Нагрузка от веса породы в расчете на площадь поверхности крепи

$$p = \rho \cdot S.$$

Пример. При $R_b = 2$ м; $q = 2,5$ МПа (на глубине 100 м); $C_k = 0,2$ МПа; $\varphi_k = 20^\circ$ и $c = 0,025$ М/м³.

Полярный угол, отсчитанный от оси X до максимальной точки свода вывала

$$\theta_3 = 45^\circ - \frac{\arcsin\left(\sin 20^\circ + \frac{0,2}{2,5} \cos 20^\circ\right)}{2} = 33,5^\circ.$$

Высота вывала $h_c = 0,22$ м

Площадь вывала

$$S = \frac{4}{3} \cdot 0,22 \cdot 2,0 \cdot \sin \frac{33,5}{2} = 0,51 \text{ м}^2.$$

$$P = 0,025 \cdot 0,51 \cdot 0,01275 \text{ Мн/м}$$

Границы вывала: $h_c = 0,22$ м, $\theta_1 = 21^\circ$, $\theta_2 = 88,8^\circ$.

По результатам испытаний установлено, что с повышением полярного угла размеры области разрушения уменьшаются.

Рассмотрим формирование нагрузки на крепь при сводообразовании, когда разрушение пород в кровле происходит от растягивающих напряжений (рис. 7). Высота образующего свода (h_c) соответствует новому контуру выработки, на котором действующее растягивающее напряжение (y_u) равно пределу прочности породы на одноосное растяжение ($\sigma_{p.n.}$). Размеры нового контура: $2a$ и b_1 .

Тангенциальное напряжение (y_u) в точке С на вертикальной оси

$$\sigma_\theta = q \left(\lambda + 2\lambda \frac{b_1}{a} - 1 \right). \quad (10)$$

Полагая, что $\bar{\sigma}_u = -\bar{\sigma}_{p.n.}$, из уравнения (10) находим высоту

$$b_1 = \frac{a}{2\lambda} \left(1 - \lambda - \frac{\sigma_{p.n.}}{q} \right). \quad (11)$$

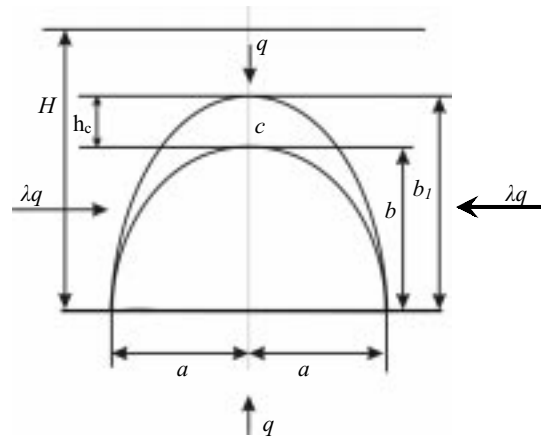


Рис. 7. Схема к определению нагрузки на крепь при сводообразовании от растягивающих напряжений.

Тогда высота свода

$$h_c = b_1 - b = \frac{a}{2\lambda} \left(1 - \lambda - \frac{\sigma_{p.n.}}{q} \right) - b. \quad (12)$$

Нагрузка от веса пород в своде обрушения

$$p = \rho \cdot S_1,$$

где площадь свода обрушения

$$S_1 = \frac{\pi a^2}{4\lambda} \left(1 - \lambda - \frac{\sigma_{p.n.}}{q} - 2\lambda \frac{b}{a} \right). \quad (13)$$

Окончательно имеем

$$p = \frac{\rho \pi a^2}{4\lambda} \left(1 - \lambda - \frac{\sigma_{p.n.}}{q} - 2\lambda \frac{b}{a} \right). \quad (14)$$

Если выработка имеет круговое поперечное сечение с радиусом a , то формула имеет вид

$$p = \frac{\rho \pi a^2}{4\lambda} \left(1 - 3\lambda - \frac{\sigma_{б.н.}}{q} \right). \quad (15)$$

В случае, когда в начале породе разрушается от сжатия в боках выработки и от растяжения в кровле, вертикальная нагрузка определяется по формулам (14) и (15), а боковая по формуле [9]

$$p = p_b t g^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2}. \quad (16)$$

При сплошном сводообразовании при образовании вокруг выработки зоны неупругих деформаций, опасны обрушения от нагрузки по вертикальной плоскости. Интенсивность вертикальной нагрузки:

$$p_b = \rho R_\beta (r_p - 1) \quad (17).$$

где $R_\beta (r_p - 1)$ – высота свода обрушения, м;

r_p – радиус зоны неупругих деформаций (зоны обрушения или потери сплошно-

сти), выраженный в долях радиуса выработки.

В реальных условиях породы, по которым предложены штольни Джимидонского месторождения (шт. № 3 и № 45), были представлены среднеустойчивыми, местами склонными к вывалам. Угол отслоения пород по отношению к оси штольни составлял $9-13^\circ$. По протяженности штольни были выделены 3 типа пород: 1 – сравнительно устойчивые с наличием трещин $8-13$ шт/м², имеющие следующие параметры: азимут падения $A_3 = 22-46^\circ$ и угол падения $\beta = 25-40^\circ$; 2 – малоустойчивые повышенной трещиноватости до 15 шт/м² с $A_3 = 30-70^\circ$ и $\beta = 40-50^\circ$; 3 – слабоустойчивые в зонах разлома с параметрами: количество трещин – более 15 шт/м², $A_3 > 104^\circ$ и $\beta = 44-79^\circ$.

Качественная оценка устойчивости кровли и боков: в первой группе – отдельные локальные вывалы; во второй – многочисленные крупные и высокие вывалы, занимающие не менее 20 % площади поверхности кровли; в третьей – в выработках со слабой кровлей после происходящего дальнейшего вывалообразование представить очень

трудно (размеры куполов достигают до 10 и более метров).

Результаты проведенных наблюдений показывают, насколько важно предупреждать появление мелких вывалов, особенно при неустойчивых породах. Интенсивность вывалов в зависимости от времени характеризуется следующими показателями: при неустойчивых породах крупные вывалы происходят через 1,5–2 суток, если длина незакрепленного участка до 3–4 м; а если длина > 4 м, то вывал (крупный) можно ожидать в течение суток. В породах средней устойчивости крупные вывалы из кровли возможны через 4–5 суток, при длине незакрепленного участка до 10 м.

Разрушение пород происходит в виде хрупкого излома по плоскости сдвига (скалывания).

Исходя из изложенного, можно констатировать, что породы верхних горизонтов с коэффициентом крепости $f = 3-8$ соответствуют гипотезе проф. М.М. Протодяконова, – зона обрушения напоминает свод в виде эллипса или шатра. Во всех случаях наблюдаются обрушения с кровли выработок.

Литература

1. **Баклашов И.В., Руппенейт К.В.** Прочность незакрепленных выработок. – М. 1965.
2. **Булычев Н.С.** Механика подземных сооружений. – М.: Недра. 1989. С. 270.
3. **Галаев З.Н.** Управление состоянием массива горных пород при подземной разработке рудных месторождений. – М.: 1990. С. 176.
4. **Каркашадзе Г.Г.** Механическое разрушение горных пород. – М.: МГТУ. 2004. С. 176.
5. **Кацуров И.Н.** Механика горных пород. – М.: Недра. 1981. С. 160.
6. **Кузнецов Г.Н., Филатов Н.А., Ардашов К.А.** Методы и средства решения задач горной геомеханики. – М.: Недра. 1987. С. 248.
7. **Литвинский Г.Г.** Расчет устойчивости породных поверхностей горных выработок. Вып. 2. – Л.: ЛГИ. С. 35–39.
8. **Протодяконов М.М.** Давление горных пород и рудничное крепление. – М.: Госгортехиздат. 1930.
9. **Турчанинов И.А.** Применение метода фотоупругости для исследования напряженного состояния горных пород и горного давления в натуральных условиях. В кн.: Вопросы горного давления. – Новосибирск: Изд-во СОАН СССР. 1962. № 13. С. 60–65.

