

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.241.54

Н. В. Черданцев, В.Ю. Изаксон

СРАВНЕНИЕ РАЗМЕРОВ ОБЛАСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ВОКРУГ СОПРЯЖЕНИЙ ВЫРАБОТОК ПО ДВУМ КОНЦЕПЦИЯМ

Для оценки устойчивости сопряжений горных выработок необходимо исследование напряженно-деформированного состояния горных пород в объемной постановке, так как напряжения и деформации массива горных пород существенно зависят от трёх координат.

К настоящему времени для решения этой проблемы применяются следующие концепции.

В основе первой используется методика КузНИИ, которая сочетает моделирование на эквивалентных материалах и шахтные инструментальные наблюдения в различных горно-геологических условиях [1]. По этой методике величина разрушенной области (размеры вывалообразования), а также нагрузка на крепь определяются по модифицированной формуле М. М. Протодьяконова с применением понятия эквивалентного пролёта, т.е. устойчивость сопряжения считается эквивалентной устойчивости протяженной выработки некоего пролёта, который определяется полуэмпирической формулой

$$\bar{l} = d \left[p_1 + \frac{(\chi - 2)p_2}{\sqrt{p_3 + (1-p_3)\frac{l}{\lambda}} - 1} + 2 \frac{1 - \sqrt{\Lambda}}{2 - \sqrt{\Lambda}} \times \left(p_4 - \frac{p_5}{\sqrt{p_6 + (1-p_6)\frac{l}{\Lambda}} - 1} \right) \right] \quad (1)$$

где $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$ –

коэффициенты, определяемые по табл. 4.1 [1] в зависимости от величины угла примыкания θ , χ – количество выработок, подходящих к сопряжению.

$$d = b_1 + b_2 + c_1 + c_2, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Lambda &= \frac{(k_1 + k_2)\gamma H}{20k_\delta(100k_\kappa)^2 f_\delta} \times \\ &\times (\cos^2 \alpha + \lambda \cdot \sin^2 \alpha) \sqrt[4]{\frac{\chi}{\sin \frac{\theta}{2}}} \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь b_1, b_2 – пролёты выработок, γ – объёмный вес пород, H – глубина заложения выработок, λ – коэффициент бокового давления, α – угол наклона восстающей выработки к другой, k_1, k_2 – коэффициенты концентрации сжимающих напряжений в боках, примыкающих к целику выработок вне зоны влияния сопряжения, k_δ, k_κ – коэффициенты ослабления пород, соответственно, в боках и кровле сопряжения, f_δ – коэффициент крепости пород в боках сопряжения, f_κ – коэффициент крепости пород в кровле сопряжения c_1, c_2 – величины отжима пород в боках выработок, определяются по обобщённой формуле П. М. Цимбаревича. При одинаковых примыкающих выработках эти величины определяются следующим образом [1]

$$\begin{aligned} c_1 &= c_2 = \\ &= h_1 \left[\left(\frac{k_{c\kappa}\gamma H}{\sigma_{c\kappa}} \right)^\beta - 1 \right] \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

В формуле (4) h_1 – высота выработок, $\sigma_{c\kappa}$ – предел прочности пород в массиве на одноосное сжатие. $k_{c\kappa}$ – коэффициент концентрации сжимающих напряжений в боках выработок, ρ – угол внутреннего сопротивления ($\rho = \operatorname{arctg} f_\delta$), β – экспериментально определяемый коэффициент ($\beta = 1,05 - 0,85$).

Зная величину эквивалентного пролёта сопряжения, по модифицированной теории сводообразования находим вертикальный размер f области разрушения [1]

$$f = \frac{\bar{l}}{2k_\kappa f_\kappa} - \left(\frac{f_c}{2\bar{l}} \right) h_c, \quad (5)$$

и, полагая величину f постоянной в пределах эквивалентного пролёта, определяем интенсивность распределённой нагрузки q_κ на крепь сопряжения

$$q_\kappa = \frac{\bar{l}\gamma}{2k_\kappa f_\kappa} - \left(\frac{f_c}{2\bar{l}} \right) h_c \gamma \quad (6)$$

где f_c – стрела подъёма контура над опорами свода, h_c – высота сопряжения в самом широком месте.

По другой концепции определение напряжённого состояния в массиве горных пород вокруг сопряжения основано на применении методов теории упругости, в частности, использовании метода граничных интегральных уравнений.

Задача о напряжено-деформированном состоянии массива горных пород в окрестности сопряжений гори-

зонтальных выработок в трехмерной постановке методами теории упругости, по-видимому, была впервые решена в работе [2] без какого-либо анализа устойчивости. В работе [3] методом граничных интегральных уравнений и с помощью критерия прочности Мора–Кузнецова найдены зоны нарушения сплошности (ЗНС) в массиве горных пород с горизонтальными поверхностями ослабления вокруг сопряжения круговой сводчатой формы. ЗНС это совокупность точек на поверхностях ослабления, в которых произошло разрушение сдвиговыми или растягивающими напряжениями.

Критерий прочности Кулонна–Мора–Кузнецова по поверхностям ослабления формулируется следующим образом [2]

$$\tau_V \leq \sigma_V n + K, \quad (7)$$

где τ_V и σ_V – соответственно касательное и нормальное напряжение по поверхности ослабления, n и K – соответственно коэффициенты внутреннего трения и сцепления поверхностей ослабления.

Нормальные σ_V , касатель-

ные τ_V и полные напряжения p_V в произвольной точке на поверхности ослабления с нормалью v находятся по известным формулам определения напряжений по наклонным площадкам

$$\sigma_V = \sigma_{qm} l_q l_m,$$

$$p_V^2 = \sum_{q=1}^3 (\sigma_{qm} l_m)^2,$$

$$\tau_V = \sqrt{p_V^2 - \sigma_V^2},$$

где l_q , l_m – направляющие косинусы углов между нормалью V и координатными осями x_1 , x_2 , x_3 .

Напряжения σ_{qm} – определяются из решения граничного интегрального уравнения [4], сущность которого заключается в следующем. К поверхности полости прикладывается вектор a компенсирующей нагрузки неизвестной пока величины. Суммарные напряжения от действия внешней и компенсирующей нагрузок в каждой точке полости должны удовлетворять условиям на поверхности. Напряжения от компенсирующей нагрузки определяются путем интегрирования произве-

дения тензора Кельвина, являющегося решением задачи о единичной силе, приложенной в бесконечном массиве, на вектор внешней нормали в точке полости в пределах её площади. В результате чего условие на контуре приводится к интегральному уравнению относительно неизвестного вектора

$$\frac{1}{2} a_q(Q_0) - \int \int \Phi_{qm}(Q_0, M_0) a_m(M_0) dO_{M_0} = n_q(Q_0) \sigma_{qq}^\infty - F_q(Q_0). \quad (8)$$

В (8) $\Phi_{qm}(Q_0, M_0)$ – тензор влияния определяется как

$$\Phi_{qm}(Q_0, M_0) = \frac{1}{8\pi(1-\nu)R^3} \times \left\{ (1-2\nu)(x_q n_m - x_m n_q + \right. \\ \left. + \delta_{qm} x_t n_t) + 3 \frac{x_q x_m x_t n_t}{R^2} \right\}.$$

Здесь ν – коэффициент Пуассона, индексы q , m , t = 1, 2, 3 – номера координатных осей, Q_0 и M_0 – на поверхности исследуемой полости, R – расстояние между точками Q_0 и M_0 , δ_{qm} – символ Кронекера ($\delta_{qm}=1$ при $q=m$, $\delta_{qm}=0$ при $q \neq m$) σ_{qq}^∞ – тензор напряжений на бесконечности, O – площадь поверхности полости, n_q , n_m – направляющие косинусы внешних к поверхностям нормалей в точках Q_0 , M_0 .

Уравнение (8) решается численно. Сначала поверхность полости заменяется конечным числом N плоских элементов и интеграл заменяется суммой. Затем производится интегрирование по каждому элементу, при этом считается, что в пределах элемента интенсивности a и F постоянны. В результате этой процедуры интегральное уравнение (8) заменяется следующими N векторными уравнениями:

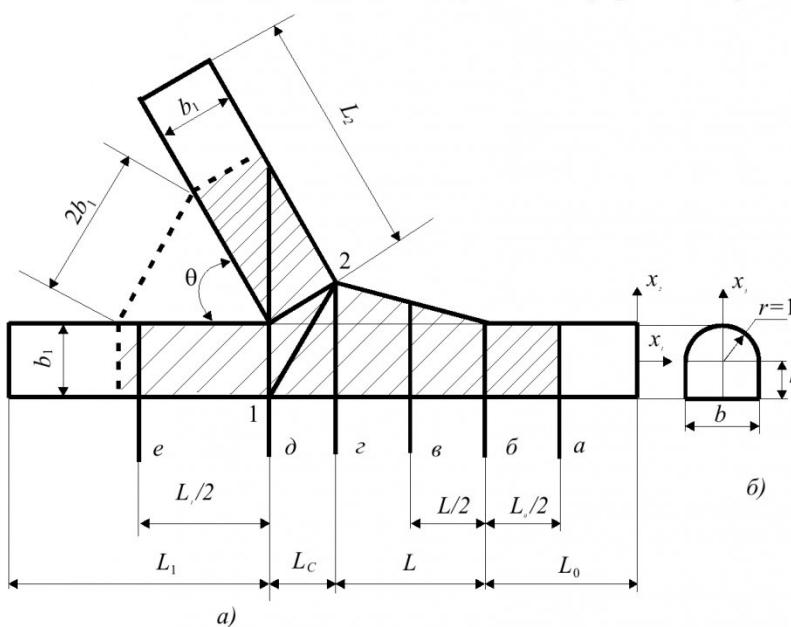


Рис. 1. Схема сопряжения двух выработок (а) – заштрихованная часть – область усиленного проявления горного давления, б) – сечение одиночной выработки

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} a_{q,i}^* - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \Phi_{qm,ij} a_{m,j}^* \Delta O_i \\ = n_{q,i} t_{qq,i}^\infty - F_{q,i}^* \end{aligned} \quad (9)$$

где i - номер точки на контуре, в которой формулируется граничное условие, j - номер текущей точки на контуре, а суммирование производится по всем точкам за исключением $j = i$. В этих уравнениях (также и в дальнейшем) индексы тензоров и векторов отделены точкой от индексов точек контура. В (9) приняты следующие обозначения

$$\begin{aligned} a_{q,i}^* &= a_{q,i} \Delta O_i, \\ a_{m,j}^* &= a_{m,ji} \Delta O_j, \\ t_{q,i}^\infty &= \sigma_{qq,i}^\infty \Delta O_i, \\ F_{q,i}^* &= F_{q,i} \Delta O_i. \end{aligned}$$

После решения уравнений (9) относительно $a_{q,i}^*$ определяются напряжения $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}$ в любой точке k массива, с помощью принципа суперпозиции:

$$\sigma_{qm,k} = \sigma_{qmt,k} a_{t,j}^* + \sigma_{qq,k}^\infty \quad (10)$$

В формуле (10) используется правило тензорного исчисления: по повторяющимся индексам производится суммирование в пределах изменения этих индексов. σ_{qmt} представляет собой тензор Кельвина, определяемый как

$$\begin{aligned} \sigma_{qmt} = \frac{1}{8\pi(1-\nu)R^3} \times \\ \left[(1-2\nu)(\delta_{mt}x_q + \right. \\ \left. + \delta_{qt}x_m - \delta_{qm}x_t) + \frac{3x_q x_m x_t}{R^2} \right]. \end{aligned}$$

Результаты вычисления напряжений и зон нарушения сплошности по второй концепции получены с помощью математического программного пакета MATHCAD.

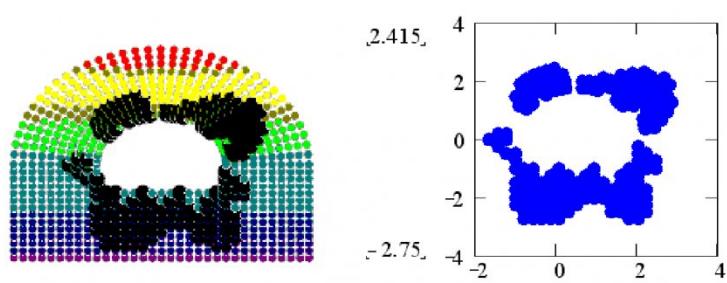


Рис. 2. Общий вид сечения сопряжения с расчёенной плоскостью и ЗНС (слева); границы ЗНС в сечении 1–2 (справа)

Рассмотрим расчёт устойчивости сопряжения круговой сводчатой формы (рис. 1) при следующих параметрах сооружения и массива горных пород: $L=L_0=4m$, $L_1=L_2=7m$, $r=1m$, $b=b_1=b_2=2m$, $\theta=60^\circ$, $h=1m$, $L_c=2rcos60^\circ=1,73m$, $H=400m$, $\gamma=25kH/m^3$, $\lambda=1$, $K=0$ (контакт слоёв), $\varphi=20^\circ$ (осадочные горные породы), $\nu=0,25$, расположение поверхностей ослабления – горизонтальное, $\chi=3$, $f_6=3$, $\beta=1$, $k_1=k_2=k_{c\infty}=2$, $\alpha=0^\circ$, $\rho=arctg 3=71,56^\circ$, $k_6=k_\infty=0,45$, $p_1=0,77$; $p_2=0,15$; $p_3=0,91$, $p_4=0,77$, $p_5=0,19$, $p_6=0,60$, $\sigma_{c\infty}=k_6 f_6 10^4$, $h_1=h+r=2m$, $h_c=h+1,5r=2,5m$, $f_c=1,5r=1,5m$.

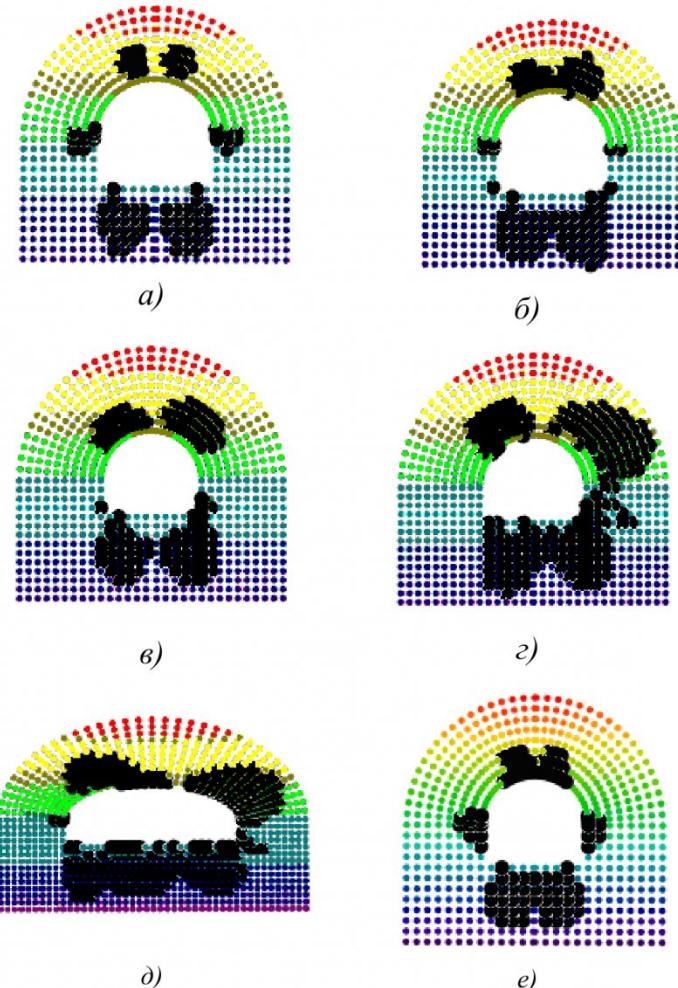


Рис. 3. Зоны нарушения сплошности (ЗНС) в разных сечениях сопряжения (см. рис. 1)

Определяем высоту вывала и нагрузку на крепь по первой из рассмотренных выше концепций. По формуле (3) вычисляем $\Lambda=0,115$, по формуле (4) $c_1=c_2=0,156\text{м}$, по формуле (2) $d=2,313\text{м}$, по формуле (1) $\bar{l}=4,688\text{м}$, по формуле (5) $f=1,303\text{м}$, по формуле (6) $q_k=32,58 \text{ кН/м}$. Полученные результаты соответствуют сечению в самой широкой части сопряжения-1–2.

Зоны нарушения сплошности в ряде сечений сопряжения по второй концепции приведены на рис. 2, 3. На рис. 2 показано поперечное сечение сопряжения в сечении 1 – 2, затемнённая область – зона нарушения сплошности. Здесь же даны значения вертикальных границ ЗНС. Нетрудно подсчи-

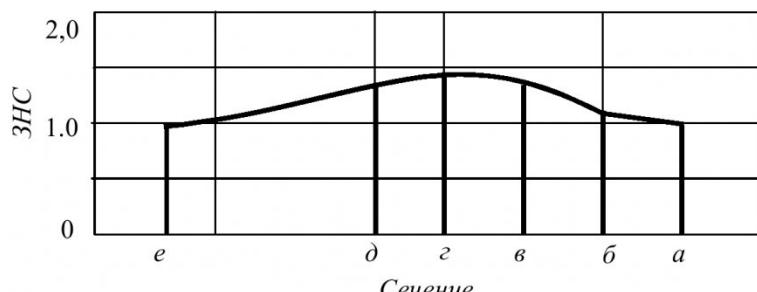


Рис. 4. Вертикальные размеры зоны нарушения сплошности в сечениях а–е

тать максимальный размер ЗНС в своде, который равен $2,415 - 1,5 = 0,915\text{м}$. Т.е максимальный вертикальный размер возможной области разрушения по второй концепции в полтора раза меньше, чем по первой.

На рис. 4 приведён график изменения отношения вертикального размера ЗНС (суммарный размер в своде и почве выработки к высоте выработки в

различных сечениях сопряжения). Из графика следует, что максимальный размер ЗНС приходится на сечение г.

В заключение следует отметить, что вторая концепция применима к расчёту сопряжений как подготовительных, так и капитальных выработок, имеет строгое решение, результаты её наглядны и для прогноза устойчивости предпочтительны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Широков А.П., Писляков Б.Г. Расчет и выбор крепи сопряжений горных выработок. - М.: Недра, 1988.-214 с.
2. Изаксон В.Ю. Методы расчета устойчивости выработок, пройденных комбайнами, в условиях Кузбасса: - Дисс. ... д-ра техн. наук /ИГД СО АН СССР. Новосибирск, 1975. - 361 с.
3. Черданцев Н.В. , Изаксон В.Ю. Устойчивость сопряжения двух горных выработок сводчатой формы . - ФТПРПИ. - 2004. - № 2. - С. 48-51.
4. Лурье А.И. Теория упругости. - М.: Наука, 1970. - 940 с.

□ Авторы статьи:

Черданцев Николай Васильевич - канд. техн. наук, доц. каф. сопротивления материалов	Изаксон Всеволод Юльевич - докт.техн.наук, профессор (Институт угля и углехимии Сибирского отделения РАН)
--	--

УДК 551.24

В.В. Иванов, Н.Ф. Сурунов, А.И. Столярчук

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Определяющими условиями разработки любого месторождения полезных ископаемых являются рентабельность горного предприятия и безопасность работающего персонала. В шахтах и рудниках многих горнопромышленных районов мира происходят динамические явления, сопровождающиеся

внезапными выбросами угля породы и газа, горными ударами и др. Подобные явления наблюдаются также на угольных месторождениях России, в том числе и в Кузбассе.

Для современного горнодобывающего предприятия характерна высокая механизация и концентрация горных работ при

постоянно усложняющихся горно-геологических условиях, способствующих активизации геодинамических процессов. В связи с этим растёт ответственность инженерно-технических работников за правильность и обоснованность, принимаемых технических решений, базирующихся на анализе результа-