

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трафимов И.М., Мезенцев К.Т., Кривобородов И.П. Особенности очистных работ на руднике "Октябрьский" // ФТПРПИ. – № 5, 1976. – С. 1-4.

□ Авторы статьи:

Егоров

Петр Васильевич
– докт.техн.наук, проф., зав. каф. разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом

Редькин

Валерий Александрович
– канд.техн.наук, ст. преп. каф. разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом

УДК 622.831

Д.В. Панфилова, А.В. Ремезов

АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ВЕДЕНИИ ОЧИСТНЫХ РАБОТ

Введение

Ведение горных работ в массивах пород приводит к изменению начальных напряженных состояний и проявлению различных механических процессов.

Общие геомеханические закономерности изменения напряжений в горном массиве являются основой для прогноза его состояния при обосновании способов управления горным давлением и расчете параметров систем разработки месторождений полезных ископаемых. Оценка напряженного состояния массива преимущественно осуществляется по отношению напряжений, действующих во взаимно перпендикулярных направлениях – главным осям тензора напряжений. К середине 60-х гг. был получен значительный объем экспериментальных данных о горном давлении и напряженном состоянии массивов горных пород в верхнем слое ЗК.

До 1951 г. за основу расчетов всегда брали теорию гравитационных сил. Представления сводились к тому, что земная кора находится в равновесии. Если напряжения изменяются под воздействием каких-либо глобальных факторов, то со временем они релаксируют.

В 60-е гг. стало известно о повышенных горизонтальных (тектонических) напряжениях в

массивах горных пород, что явилось поворотным моментом в развитии геомеханики.

Поэтому в новых методиках расчета горного давления стали учитываться и гравитационные, и горизонтальные силы, тогда как ранее опирались лишь на гравитационные напряжения.

Методики расчета горного давления с учетом только гравитационных напряжений

1. Протодьяконов, 1907 г. Гипотеза свода [1]. Нагрузка на крепь

$$p_x = \frac{\gamma(a^2 - x^2)}{naf},$$

где a – полупролет свода;

f – коэффициент крепости пород кровли;

x – расстояние от рассматриваемой стойки до забоя;

n – число стоек на 1 кв. м площади кровли;

γ – объемный вес пород.

2. Цимбаревич. Гипотеза призм сползания [1]. Давление пород на крепь

$$R = b\gamma BH(1 - \operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{ctg}\delta),$$

где B – ширина призабойного пространства;

γ – объемный вес пород;

b – ширина секции крепи;

H – глубина ведения работ;

φ – угол внутреннего сопротивления породного массива;

δ – угол между гранью опускающегося параллелепипеда и плоскостью пласта.

3. Слесарев, 1935 г. Гипотеза плит и балок [1]:

а) при кровле, аналогичной свободно опертой балке, давление

$$P_{i cp} = \gamma_{npi} \cdot h_i - \frac{4}{3} K_{pi} \cdot \frac{h_i^2}{l_{gi}^2};$$

б) при кровле, аналогичной балке с защемленными концами, давление

$$P_{i cp} = \gamma_{npi} \cdot h_i - 2K_{pi} \cdot \frac{h_i^2}{l_{gi}^2},$$

где i – порядковый номер подстилающего слоя;

h_i – мощность подстилающего слоя;

K_{pi} – предел прочности породы на разрыв в подстилающем слое;

l_{gi} – эквивалентный пролет подстилающего слоя;

γ_{npi} – приведенный объемный вес пород подстилающего слоя.

4. Лабасс, 1950 г. Гипотеза предварительного расстреливания [1]. Давление на стойку

$$P = l' e \delta \cos \alpha +$$

$$+ 0,1 l' \left(\frac{ah}{2} \delta \cos \alpha + \frac{a}{2} p \right) S f,$$

где S – коэффициент, являющийся функцией жесткости

крепи;

f – коэффициент, являющийся функцией изгиба основной кровли;

l – расстояние между рядами стоек;

l' – расстояние между стойками в ряду;

e – мощность обрушающейся части непосредственной кровли;

δ – удельный вес пород кровли;

α – угол падения пласта;

p – давление, возникающее при равномерном расширении пород, перпендикулярном плоскостям напластования, при отсутствии угольных прослойков можно пренебречь этим давлением;

a – шаг осадки основной кровли;

h – мощность осадки основной кровли.

5. Руппенейт, 1957 г. [2].

Начальные смещения кровли над забоем, вызванные деформацией угольного пласта под действием веса покрывающей толщи пород

$$H_0^* = 11,5 \gamma h \frac{h_{pl}}{E_{pl}},$$

где γ – объемный вес пород покрывающей толщи;

h – глубина ведения работ;

h_{pl} – мощность пласта;

E_{pl} – модуль упругости пласта.

Методики расчета горного давления, учитывающие гравитационные и горизонтальные напряжения

6. Глушухин Ф.П. [3]. Суммарная нагрузка блоков пород кровли на крепь на 1 пог. м. лавы определяется из формулы

$$P_0 = \gamma h l \left[\frac{n_2}{2} + n_1 (1 - f \operatorname{ctg} \alpha_1) \right],$$

где f – коэффициент трения;

α_1 – угол наклона грани блока к горизонту;

γ – объемный вес пород;

h – высота блока;

l – длина блока;

n_1 – количество поддержива-

емых блоков;

n_2 – количество зависших блоков.

7. Авершин С.Г., Груздев В.Н., Степанов В.Я. [3]. Для учета нелинейности распределения напряжений σ_x по поперечным сечениям полосы (балки) предлагается вычислять эти напряжения по формуле

$$\sigma_x(x, y) = \frac{12}{h^3} [M(x) - khQ(x)] \times \times \left(y - \frac{h}{2} \right) + \frac{Q(x)}{h} sh \frac{1}{h} \left(y - \frac{h}{2} \right), \\ (0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq h).$$

Для расчета касательных напряжений τ_{xy} в полосе (балке) предлагается следующая формула

$$\tau_{xy}(x, y) = \frac{Q(x)}{kh} \left[ch \frac{1}{2} - ch \frac{1}{h} \left(y - \frac{h}{2} \right) \right]$$

где $M(x)$ – изгибающий момент в поперечном сечении полосы;

$Q(x)$ – поперечная сила;

h – толщина кровли;

L – контур выработки;

$k = 0,0854$.

8. Кузнецов С.Т. Расчет нагрузок на крепь [4].

8.1. Расчет расслоения пород кровли.

Предел прочности при разрыве в направлении, перпендикулярном контакту,

$$\sigma'_{p\perp} = 0,4C'',$$

где C'' – коэффициент сцепления (зависит от шероховатости поверхности).

а) Первичное расслоение пород кровли возможно при величине сдвигающей силы

$$\Delta K_\tau \approx 0,60 - 0,1\rho' - 0,3 \frac{Y}{X_*} \geq c_*^{I\Gamma}$$

де ρ' – угол трения контактов;

X_* – безразмерная полуширина выработки, выражается через ее высоту;

Y – безразмерная ордината расположения точки, до которой подсчитывается ΔK_τ

$c_*^{I\Gamma}$ – безразмерное сцепление.

б) Расчет первого предельного пролета (шаг первого обрушения пород кровли при от-

ходе очистного забоя от разрезной выработки) по формуле

$$L_{li} = \sqrt{\frac{\sigma_{ui} h^2 + 3P_i h t g \rho'_i - 6P_i d_i}{\gamma'_i h}}$$

где h – суммарная мощность тонких вышележащих слоев;

γ'_i – приведенный удельный вес пород рассчитываемого слоя;

σ_u – предел прочности пород при изгибе;

P_i – параметр характеризующий внешнюю нагрузку;

ρ'_i – угол трения на контакте рассчитываемого слоя с вышележащим;

d_i – расстояние от кромки опоры до точки приложения равнодействующей внешней нагрузки P_i ;

i – номер слоя пород кровли.

8.2. Расчет вторичных разрушений кровли (разрушений, происходящих в окрестности очистного забоя после первой осадки кровли). Условие возможности расслоения

$$L_p / L_2 < 1,$$

где L_p – длина консоли на момент расслоения;

L_2 – предельный вылет консоли при изгибе.

При невыполнении этого условия разрушение консоли начинается по наклонной трещине.

8.3. Оценка нагрузочных свойств кровли

$$P_1 + 0,553 P_2 + 0,306 P_3 + 0,169$$

$$P_4 + 0,094 P_5 + 0,029 P_6,$$

где P_1 – нагрузки от блоков, соответственно, 1 - 6 ярусов.

9. Егоров П.В. Напряжения в точке максимума опорного давления [5]

$$\sigma_{max} = \gamma H D \delta - \sigma_{cж} d,$$

где d – напряжения на стойке;

γ – удельный вес пород кровли;

D – безразмерный параметр;

$\sigma_{cж}$ – прочность угля на сжатие;

δ – безразмерный параметр;

H – глубина ведения очистных работ;

10. Курленя М.В., Опарин В.Н., Рева В.Н., Глушихин Ф.П. В методике учитывается явление зональной дезинтеграции. НДС оценивается по данным геофизического каротажа. Напряжения в массиве [6]

$$\sigma = \alpha R_0 \exp \left[\beta \cdot \frac{l+r}{r} \right],$$

где α и β – коэффициенты, определяемые из выражения

$$\alpha = \frac{I}{A}, \quad \beta = \frac{I}{B};$$

A и B – экспериментальные константы;

r – радиус выработки;

l – расстояние от контура выработки до наиболее удаленной зоны дезинтеграции;

R_0 – прочность массива на одноосное сжатие.

11. Васильев Л.М. Горизонтальные напряжения рассчитываются по формуле [7]

$$\sigma_r = 2 \left(\frac{\mu^2 \sigma_\theta + k\mu -}{-\frac{k - \mu \sigma_\theta}{\cos \rho} \sqrt{1 - b_c^2}} \right) + \sigma_\theta,$$

$$b_c = \frac{f \sigma_\theta}{k + \mu \sigma_\theta},$$

где $\sigma_\theta = \gamma H$ – вертикальные напряжения;

f – коэффициент контактного (внешнего) трения;

μ – коэффициент внутреннего трения;

k – сопротивляемость материала на сдвиг;

$\rho = \arctg \mu$ – угол внутреннего трения.

12. Грицко Г.И., Цыцаркин В.Н. В конкретных условиях определяются размеры области неупругих деформаций в угольном массиве и с учетом данных о смещениях установить необходимую податливость и несущую способность крепи [8].

$$\frac{dU_k}{dU_0} = \frac{r_0^2(1-2\nu)R}{R^2(1-2\nu)+r_0^2}$$

$$\left\{ 2 \frac{1-\nu}{1-2\nu} + \frac{R^2+r_0^2}{R^2(1-2\nu)+r_0^2} + 2(\ln r_0 + p) \right.$$

$$\cdot \left[1 + \frac{2\nu R^2(1-2\nu)}{[R^2(1-2\nu)+r_0^2]^2} \right] -$$

$$- \frac{R_r(1-\nu)}{R^2(1-2\nu)+r_0^2} (\ln r_0 + p + 1)$$

$$, \quad (R \geq r_0 \geq 1),$$

где ΔU_0 – измеряемые приращения смещений вмещающих пластов;

ΔU_k – приращение смещения контура выработки;

r_0 – радиус упругопластической границы;

R – радиус упругопластического угольного кольца;

ν – коэффициент Пуассона;

p – равномерное давление на контуре выработки, равное отпору крепи;

r – радиус кругового отверстия, вокруг которого определяют границы области пластических деформаций.

13. Кулаков В.Н. Оценивается напряженное состояние призабойной части угольного массива при разработке круtyх угольных пластов. Зависимость опорного давления от глубины и параметров зависящей кровли [9]

$$\sigma_g = \sigma_{g \max} \times$$

$$(3,37 - 0,8e^{-0,8F} - 4,8m^{0,15})$$

$$F = \frac{f}{L} \cdot 10^2,$$

где f/L – наклон кровли;

m – мощность пласта;

$\sigma_{g \ max}$ – дополнительное максимальное опорное давление.

14. Сырников Н.М. Рассчитывается напряженное состояние структурно неоднородного горного массива в окрестности подземных сооружений. Дополнительные напряжения концентрируются и со временем релаксируют на неоднородностях. Уравнение для избыточного напряжения на неоднородностях [10]

$$\frac{d\Delta\sigma_{ik}}{dt} = \rho c_i^2 \frac{de_{ik}}{dt} - \frac{\Delta\sigma_{ik}}{l} v,$$

где c_i – скорость упругих поперечных волн;

e_{ik} – девиатор тензора напряжений;

v – скорость релаксации;

ρ – плотность среды;

l – характерный размер неоднородности;

$\Delta\sigma_{ik}$ – неупругое напряжение.

15. Трубецкой К.Н., Бронников Д. М., Кузнецов С. В. Рассчитывается горное давление на межкамерные целики. Среднее напряжение на участке контакта кровли с целиком [11]

$$\sigma_{rp} = \frac{1}{\varepsilon} \int_a^b \sigma_y d_x$$

$$\sigma_y = -\gamma H + 2 \operatorname{Re} \Phi(x)$$

где γ – объемный вес пород;

H – глубина участка контакта кровли с целиком;

a – половина расстояния между целиками;

$$b = a + 1;$$

$\Phi(x)$ – ширина межкамерного целика.

16. Михайлов А.М. Оценивается напряженное состояние массива горных пород в окрестности пласта с выработкой. Опорное давление в любой точке массива вне выработки [12]

$$\sigma_{zz}(x,y,z) =$$

$$- \iint_V \beta(\xi, \eta) G \left(\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2} \right) d\xi d\eta$$

где β – некоторая вспомогательная функция;

V – область локализации функции;

G – радиально симметричная положительная функция.

17. Курленя М.В., Миленков В.Е., Шутов А.В. Рассчитывается напряженно-деформированное состояние массива горных пород в зоне взаимного влияния выработок, расположенных в зонах влияния очистных работ [13].

$$\sigma_n = \sigma_y (\sin \theta)^2 +$$

$$\sigma_x (\cos \theta)^2 + \tau_{xy} \sin 2\theta,$$

$$\tau_n = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta$$

где τ_{xy} – касательные напряжения;

σ_x, σ_y – нормальные напряжения;

θ – полярный угол.

18. Михайлов А.М. Рассчитываются напряжения вокруг трещины. Распределение нормальных напряжений по радиусу в плоскости трещины [14]

$$\sigma_{zz}(r, o) = -\frac{2p_0}{\pi} \times \left[\arcsin \frac{c}{r} - \frac{c}{\sqrt{r^2 - c^2}} \right],$$

где r – радиус в плоскости трещины;

$c = 0,5$ и $p_0 = 1$ (полагалось в расчетах).

Максимальное раскрытие трещины в ее центре (при $r = 0$).

19. Кузнецов С.В., Трофимов В.А. Напряжения и смещения вокруг отработанного по простирианию участка пласта [15]

$$\sigma_x^\pm = -(1-\alpha)\sigma_y^o \pm \tau_{xy}^o \frac{2x}{\sqrt{L^2 - x^2}} \pm \gamma_{xy} \frac{L^2}{\sqrt{L^2 - x^2}} \sin \theta,$$

где σ_y^o – исходные нормальные напряжения;

τ_{xy}^o – исходные касательные напряжения;

$L = 0,5$ пролета отработанного участка пласта;

θ – полярный угол;

γ_{xy} – удельный вес пород;

x и y – координаты исследуемой области;

α – угол падения пласта.

Двойной знак (\pm) указывает на то, что формула относится к кровле (+) и почве (-).

20. Айталиев Ш.М., Такишев А.А. Рассчитана связь деформаций с напряжениями в налегающей толще пород над целиками [16]

$$\varepsilon_{xi} = \frac{1-\nu^2}{E} \left[\sigma_{xi} - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{yi} \right],$$

$$\varepsilon_{yi} = \frac{1-\nu^2}{E} \left[\sigma_{yi} - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{xi} \right]$$

где E – модуль упругости в породе;

ν – коэффициент Пуассона в породе;

σ_{xi}, σ_{yi} – нормальные напряжения в i -ой пачке;

i – номер пачки пород кровли над целиками.

21. Бушманова О.П., Ревуженко А.Ф. Напряжения в массиве пород вокруг выработки в случае, если она окружена пластической зоной [17]

$$\sigma_r = -\frac{2k \cos \phi (r^2 - 1)}{(1 - \sin \phi)s},$$

$$\sigma_\theta = -\frac{2k \cos \phi (r^2 - 1)}{(1 - \sin \phi)} \left[\frac{r^s - 1}{s} + r^s \right]$$

$$\text{где } s = \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi}.$$

Напряжения в упругой области

$$\sigma_r = -\frac{2k \cos \phi}{(1 - \sin \phi)} \left[\frac{c^s - 1}{s} + \frac{c^s (r^2 - c^2)}{2r^2} \right]$$

$$\sigma_\theta = -\frac{2k \cos \phi}{(1 - \sin \phi)} \left[\frac{c^s - 1}{s} + \frac{c^s (r^2 + c^2)}{2r^2} \right]$$

где σ_θ – нормальное окружное напряжение;

k – сцепление;

ϕ – угол внутреннего трения;

c – радиус пластической зоны;

r, θ – полярные координаты точки области

$$(1 \leq r \leq R, 0 \leq \theta \leq 2\pi);$$

R – внешний радиус исследуемой области.

Заключение

В отличие от методик расчета горного давления, разработанных до 60-х годов, методики настоящего времени учитывают не только гравитационные, но и горизонтальные силы. Подавляющее число расчетов напряженно-деформированного состояния около полостей в массиве пород проводится в рамках упругой модели среды, ограничиваясь двухмерным случаем. Однако многие, возникающие на практике ситуации в горном деле, не позволяют обоснованно применять решения плоских задач для прогноза напряжений и смещений. В таких случаях используется пространственное моделирование. Наиболее рациональна упругая модель среды, позволяющая, в отличие от пластической, более полно учить необратимые эффекты, возникающие на некоторых характерных поверхностях скольжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисов А.А., Мельников Э.Ф. Управление состоянием массива горных пород. – Кемерово: КузГТУ, 1978. – с. 33-56.
- Борисов А.А. Расчеты горного давления в лавах пологих пластов. – М.: Недра, 1964. – 278 с.
- Проблемы механики горных пород / под ред. Бажина Н.П., Барановского В.И. – Новосибирск: Наука, 1971. – 711 с.
- Кузнецов С.Т. Разупрочнение труднообрушаемых кровель угольных пластов. – М.: Недра, 1987. – 200 с.
- Практикум по геомеханике / Егоров П.В. – Кемерово: КузГТУ, 1998. – 136 с.
- Курлена М.В., Опарин В.Н., Рева В.Н., Глушихин Ф.П., Розенбаум М.А., Тапсиев А.П. Об одном методе оценки напряженного состояния массивов горных пород // ФТПРПИ. – 1992. – № 5. – с. 3-7.

7. Васильев Л.М. Расчет горного напряжения в горном массиве // ФТПРПИ. – 1993. – № 4. – с. 9-13.
8. Грицко Г.И., Цыцаркин В.Н. Определение напряженно-деформированного состояния массива вокруг протяженных пластовых выработок экспериментально аналитическим методом // ФТПРПИ. – 1995. – №3 – с. 18-22.
9. Кулаков В.Н. Оценка напряженного состояния призабойной части угольного массива при разработке крутых угольных пластов // ФТПРПИ. – 1995. – № 3. – с. 3-18.
10. Сырников Н.М., Родионов В.Н. О напряженном состоянии структурного неоднородного горного массива в окрестности подземных сооружений // ФТПРПИ. – 1996. – № 6. – с. 31-44.
11. Трубецкой К.Н., Бронников Д.М., Кузнецов С.В., Трофимов В.А. Напряженное состояние горных пород и давление на межкамерные целики // ФТПРПИ. – 1997. – № 5. – с. 3-14.
12. Михайлов А.М. Напряженное состояние горных пород в окрестности пласта с выработкой. Трехмерная задача // ФТПРПИ. – 1999. – № 5. – с. 35-42.
13. Курленя М.В., Миренков В.Е., Шутов А.В. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород в зоне взаимного влияния выработок // ФТПРПИ. – 2000. – № 3. – с. 8-17.
14. Михайлов А.М. Расчет напряжения вокруг трещины // ФТПРПИ. – 2000. – № 5. – с. 36-43.
15. Кузнецов С.В., Трофимов В.А. Напряжения и смещения вокруг отработанного по простиранию участка пласта // ФТПРПИ. – 2000. – № 5. – с. 17-30.
16. Айталиев Ш.М., Такишов А.А. Управление сводообразованием при камерно-столбовой системе отработки. Ч. 1: Напряженное и деформированное состояние массива // ФТПРПИ. – 2000. – № 2. – с. 5-15.
17. Бушманова О.П., Ревуженко А.Ф. Напряженное состояние породного массива вокруг выработки при локализации деформаций сдвига // ФТПРПИ. – 2002. – № 2. – с. 18-27.

□ Авторы статьи:

Панфилова Диана Викторовна – магистрант каф. РМПИ	Ремезов Анатолий Владимирович – докт.техн.наук проф. каф. РМПИ
---	--

УДК 622.457:621.3.019.3

А.М. Ермолаев

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ РАЗЛИЧНЫХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ТРУБ НА НАДЕЖНОСТЬ

Известно, что при остановке ВМП гибкая вентиляционная труба при нагнетательном проветривании по своей длине обвисает и сплющивается. Только в непосредственной близости с соединительными кольцами трубы сохраняет свою рабочую форму. Полное сплющивание трубы происходит на расстоянии 2-3 м от соединения. При включении вентилятора в трубе происходит пневмоудар – хлопок, в результате чего отрезок трубы получает осевое усилие, которое стремится стянуть наружное распорное кольцо с внутреннего кольца смежных отрезков труб. За счет этого происходит рассоединение става вентиляционных труб, нарушается целостность става, прекращается доступ воздуха в призабойную часть выработки,

происходит аварийный отказ работы ВМП.

На практике применяются следующие меры предотвраще-

ния разрывов в стыковом соединении:

- в 2-3 местах по периметру трубы проволочной скруткой

Результаты стендовых испытаний существующих и предложенных соединений вентиляционных труб

Тип соединения	Число циклов остановки вентилятора до очередного рассоединения става
Соединение без фиксирующих элементов (а.с.393530 СССР)	8 - 12
Соединение с фиксирующим элементом типа «кудак» диаметром $d=0,95 D_{tp}$	22 - 27
То же, диаметром $d=0,9 D_{tp}$	43 - 57
То же, диаметром $d=0,85 D_{tp}$	102 - 123
То же, диаметром $d=0,8 D_{tp}$	Нет разрывов
Соединение нового типа СВТ – 1 (патент SU 1724889)	Нет разрывов
Соединение нового типа СВТ – 1 (патент SU 1724889)	Нет разрывов