

УДК 622.831

АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ВЕДЕНИИ ОЧИСТНЫХ РАБОТ

А. В. Ремезов¹, Д.В. Панфилова¹, А. И. Жаров²

¹КузГТУ, ²филиал КузГТУ в г. Белово

Аннотация. В статье кратко изложены результаты анализа различных методик расчета горного давления, сделаны выводы о том, что в сложном выборе конкретной методики для расчета горного давления рекомендуется применять пространственное моделирование.

Ключевые слова. Угольная шахта, угольный пласт, горное давление.

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 годы 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. Протоdjяконов, 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 ф

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

$$P_{i\text{cp}} = \gamma_{i\bar{\partial} i} \cdot h_i - \frac{4}{3} K_{pi} \cdot \frac{h_i^2}{l_{yi}^2}$$

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

$$P_{i\text{cp}} = \gamma_{i\bar{\partial} i} \cdot h_i - 2K_{pi} \cdot \frac{h_i^2}{l_{yi}^2}$$

где i - порядковый номер подстилающего слоя; h_i - мощность подстилающего слоя; K_{pi} - предел прочности породы на разрыв в подстилающем слое; l_{yi} - эквивалентный пролет подстилающего слоя; $\gamma_{i\bar{\partial} i}$ - приведённый объемный вес пород подстилающего слоя.

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

$$P = ll'e\delta \cos \alpha + 0,1l' \left(\frac{ah}{2} \delta \cos \alpha + \frac{a}{2p} \right) Sf$$

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; a - угол падения пласта; p - давление, возникающее при равномерном расширении пород, перпендикулярном плоскостям напластования, при отсутствии угольных прослоек 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

$$H_0^* = 11,5\gamma h \frac{h_{i\bar{e}}}{E_{i\bar{e}}} \mathbf{Япл}$$

где γ – объемный вес пород покрывающей толщи; h - глубина ведения работ; $h_{пл}$ - мощность пласта; $E_{пл}$ - модуль упругости пласта.

Методики расчета горного давления, учитывающие гравитационные и горизонтальные напряжения

6. Глушихин 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 поддерживаемых 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

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

$$(0 \leq x \leq L, \quad 0 \leq y \leq h)$$

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

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

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

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

где p' - угол трения контактов; X_* - безразмерная полуширина выработки, выражается через ее высоту; Y - безразмерная ордината расположения точки, до которой подсчитывается ΔK_{τ} ; c_*^1 - безразмерное сцепление.

б) Расчет первого предельного пролета (шаг первого обрушения пород кровли при отходе очистного забоя от разрезной выработки) по формуле

$$L_{1i} = \sqrt{\frac{\sigma_{ui}h^2 + 3P_i h \tan \rho'_i - 6P_i d_i}{\gamma'_i h}}$$

где h - суммарная мощность тонких вышележащих слоев; γ'_i - приведенный удельный вес пород рассчитываемого слоя; σ_{ui} - 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

$$\frac{L_p}{L_2} < 1$$

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

$$P_1 + 0,553P_2 + 0,306P_3 + 0,169P_4 + 0,094P_5 + 0,029P_6$$

Где нагрузки от блоков, соответственно, P_{1-6} ярусов.

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

$$\sigma_{\max} = \gamma H \ddot{A} \delta - \sigma_{\text{нж}} d$$

где d - напряжения на стойке; γ - удельный вес пород кровли; D - безразмерный параметр; $\sigma_{\text{сж}}$ - 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]

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

где α и β - коэффициенты, определяемые из выражения

$$\alpha = \frac{l}{A}, \quad \delta = \frac{l}{B}$$

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]

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

$$b_c = \frac{f\sigma_{\hat{a}}}{k + \mu\sigma_{\hat{a}}}$$

где $\sigma_{\hat{a}} = \gamma H$ - 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 определяют размеры области неупругих деформаций в угольном массиве и с учетом данных о смещениях установить необходимую податливость и несущую способность крепи [8].

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

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

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

где dU_0 - измеряемые приращения смещений вмещающих пласт пород; dU_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 крутых 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]

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

$$\sigma_y = -\gamma H + 2\text{Re}\hat{O}(x)$$

где γ - объемный вес пород; H - глубина участка контакта кровли с целиком; a - половина расстояния между целиками; $b=a + l$; $\Phi(x)$ - 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., Миренков 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]

$$\sigma_{zz}(r,0) = \frac{2p_0}{\pi} \times \left[\arcsin \frac{c}{r} - \frac{c}{\sqrt{r^2 - c^2}} \right]$$

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 простиранию участка пласта [15]

$$\sigma_x^{\pm} = -(1-\alpha)\sigma_y^0 \pm \tau_{xy}^0 \frac{2x}{\sqrt{L^2 - x^2}} \pm \gamma_{xy} \frac{L^2}{\sqrt{L^2 - x^2}} \sin \theta$$

где σ_y^0 - исходные нормальные напряжения; τ_{xy}^0 - 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., Таки-шов 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]

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

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

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 учесть необратимые эффекты, возникающие на некоторых характерных поверхностях скольжения.

Список литературы

1. Борисов А.А., Мельников Э.Ф. Управление состоянием массива горных пород.- Кемерово: КузГТУ, 1978.-с. 33-56.
2. Борисов А.А. Расчеты горного давления в лавах пологих пластов. - М.: Недра, 1964. - 278 с.
3. Проблемы механики горных пород / под ред. Бажина Н.П., Барановского В.И. - Новосибирск: Наука, 1971.-711 с.
4. Кузнецов С.Т. Разупрочнение труднообрушаемых кровель угольных пластов. - М.: Недра, 1987. - 200 с.
5. Практикум по геомеханике / Егоров П.В. - Кемерово: КузГТУ, 1998. - 136 с.
6. Курленя М.В., Опарин В.Н., Рева В.Н., Глушихин Ф.П., Розенбаум М.А., Тапсиёв 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. Управление сводообразованием при камерно-столбовой системе отработки. Ч. 1: Напряженное и деформированное состояние массива / Айталиев Ш.М., Такишов А.А. // 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.

18. Ремезов, А.В. Закономерности проявления опорного горного давления при отработке запасов угля в восточном крыле уклонного поля 18-2 пласта Толмачевский в границах шахтного поля шахты «Полысаевская» ОАО «СУЭК-Кузбасс» в нисходящем порядке отработки выемочных столбов / А. В. Ремезов, В. В. Климов, Л. М. Коновалов // Вестник РАЕН ЗСО. – выпуск 15, 2013. – С. 20-30.

19. Ремезов, А.В. Исследование влияния опорного давления, формируемого очистным забоем на состояние прилегающих горных выработок в условиях отработки угольных пластов средней мощности на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс» как в нисходящем, так и в восходящем порядке на примере отработки запасов угля в границах шахтного поля шахты «Полысаевская» / А. В. Ремезов, В. В. Климов // Вестник РАЕН ЗСО. – выпуск 15, 2013. – С. 30-38.

20. Ремезов А.В. Анализ проявления опорного давления при отработке выемочных столбов в восточном крыле уклонного поля 18-2 пласта Толмачевский в границах шахтного поля шахты Полысаевская ОАО СУЭК-Кузбасс в нисходящем порядке отработки выемочных столбов // А. В. Ремезов, В. В. Климов, Л. М. Коновалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2013. – вып. 2. – С. 92-105.

21. Ремезов, А.В. Горное давление. Его проявления при ведении горных работ в массиве горных пород : монография // А. В. Ремезов, И. К. Костинцев, В. Г. Харитонов, Н. В. Рябков, А. И. Жаров, В. В. Климов, И. Л. Харитонов, С. В. Новоселов // Кемерово, 2013. – 681 с.

22. Ремезов, А.В. Исследование проявления горного давления при поддержании подготовительных выработок в подработанном массиве в

условиях ОАО Распадская / А. В. Ремезов, К. А. Бубнов // Исследование проявления горного давления при поддержании подготовительных выработок в подработанном массиве в условиях ОАО Распадская.