

УДК 622.831

## АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ВЕДЕНИИ ОЧИСТНЫХ РАБОТ

А. В. Ремезов<sup>1</sup>, Д. В. Панфилова<sup>1</sup>, А. И. Жаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>КузГТУ, <sup>2</sup>филиал 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 (текtonических) 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;  $\gamma$  – объемный  $\varphi$

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;  $\gamma$  - объемный вес пород;  $b$  - ширина секции крепи;  $H$  - глубина ведения работ;  $\varphi$  - угол внутреннего сопротивления породного массива;  $\delta$  - 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

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

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

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

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;  $\gamma_{i\delta} i$  - 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;  $\delta$  - удельный вес пород кровли;  $a$  - 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

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

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

### **Методики расчета горного давления, учитывающие гравитационные и горизонтальные напряжения**

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

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

где  $f$  - коэффициент трения;  $\alpha_1$  - угол наклона грани блока к горизонту;  $\gamma$  - объемный вес пород;  $h$  - высота блока;  $l$  - длина блока;  $n_1$  - количество поддерживаемых блоков;  $n_2$  - количество зависящих блоков.

7. Авершин С.Г., Груздев В.Н., Степанов В.Я. [3]. Для учета нелинейности распределения напряжений  $\sigma_x$  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  $t_{xy}$  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  $\Delta K_\tau$ ,  $c_*^1$  - безразмерное сцепление.

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

$$L_{1i} = \sqrt{\frac{\sigma_{ui} h^2 + 3P_i h t g \rho'_i - 6P_i d_i}{\gamma'_i h}}$$

где  $h$  - суммарная мощность тонких вышележащих слоев;  $\gamma'_i$  - приведенный удельный вес пород рассчитываемого слоя;  $\sigma_{ui}$  - предел прочности пород при изгибе;  $P_i$  - параметр характеризующий внешнюю нагрузку;  $\rho'_i$  – 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]

$$\sigma_{max} = \gamma H \Delta - \sigma_{fse} d$$

где  $d$  - напряжения на стойке;  $\gamma$  - удельный вес пород кровли;  $\Delta$  - безразмерный параметр;  $\sigma_{fse}$  - прочность угля на сжатие;  $\delta$  - безразмерный параметр;  $H$  - глубина ведения очистных работ;

10 Курленя М.В., Опарин В.Н., Рева В.Н., Глушкин 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  $\alpha$  и  $\beta$  - коэффициенты, определяемые из выражения

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

$A$  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;  $\mu$  - 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].

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

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

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

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;  $\nu$  - 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 зависающей 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]

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

где  $c_i$  - скорость упругих поперечных волн;  $e_{ik}$  - девиатор тензора напряжений;  $\upsilon$  - скорость релаксации;  $\rho$  - 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]

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

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

где  $\gamma$  – 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  $\beta$  - 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  $\tau_{xy}$  - касательные напряжения;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  - нормальные напряжения;  $\theta$  - 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 простирианию 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  $\sigma_y^0$  - исходные нормальные напряжения;  $\tau_{xy}^0$  - исходные касательные напряжения;  $L = 0,5$  пролета отработанного участка пласта;  $\theta$  – полярный угол;  $\gamma_{xy}$  - удельный вес пород;  $x$  и  $y$  - координаты исследуемой области;  $\alpha$  - 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]

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xi} &= \frac{1-v^2}{E} \left[ \sigma_{xi} - \frac{v}{1-v} \sigma_{yi} \right] \\ \varepsilon_{yi} &= \frac{1-v^2}{E} \left[ \sigma_{yi} - \frac{v}{1-v} \sigma_{xi} \right]\end{aligned}$$

где  $E$  - модуль упругости в породе;  $v$  - коэффициент Пуассона в породе;  $\sigma_{xi}$ ,  $\sigma_{yi}$  - 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]

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

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

Напряжения в упругой области

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

где  $\sigma_\theta$  - нормальное окружное напряжение;  $k$  - сцепление;  $\phi$  - угол внутреннего трения;  $c$  - радиус пластической зоны;  $r, \theta$  - 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., Глушкин 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 Й.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., Миленков 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 простирианию 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 уклона 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 уклона 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. Костинец, 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.