

УДК 622.83 (075.8)

В.А. Матвеев, А.В. Матвеев

МЕТОД РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ В КРОВЛЕ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

Изложен упрощенный метод расчетов напряжений в непосредственной кровле очистного забоя пластового месторождения от сил реакций крепи и опорного давления в трехмерной форме. Результаты расчетов могут быть использованы при решении задач повышения устойчивости непосредственной кровли.

Ключевые слова: очистной забой, кровля, опорное давление, реакция крепи, напряжения.

При сравнении различных схем расстановки и передвижки механизированных и индивидуальных крепей в призабойном пространстве очистного забоя пластового месторождения важнейшим фактором предпочтительности является степень обеспечения устойчивости непосредственной кровли пласта.

Для оценки вероятного нарушения прочности пород кровли необходимо знание картины напряжённого состояния массива в зависимости от характера распределения сил реакции крепи как в плоскости xOy , нормальной к линии забоя, так и вдоль оси z , параллельной линии забоя.

Современные средства исследования напряжённо-деформированного состояния различных структур позволяют решить эту задачу. Но существующие программы, реализованные на ЭВМ, например, метод конечных элементов, при учёте условий нагружения в трёхмерном пространстве требуют большого объёма работ по подготовке исходных данных для каждого варианта и значительных компьютерных ресурсов.

В данной работе при допустимом упрощении исходной силовой схемы и характеристик массива предлагается метод расчёта компонент напряжённого состояния непосредственной кровли в трёхмерном пространстве на основе известных аналитических выражений.

Для этого используется принцип суперпозиции компонент напряжений в любой точке от действия системы элементарных сосредоточенных сил, действующих на массив в окрестности этой точки.

В общей силовой схеме массив кровли представляется как упругое полупространство, нагружаемое нормальными распределёнными силами на свободной поверхности в области опорного давления и силами реакции крепи в призабойном пространстве. Для этого распределённые и сосредоточенные нагрузки представляются в виде системы элементарных сил, распределённых по определённому закону на свободной поверхности полупространства кровли (рис. 1).

В такой ориентации силовая схема оказывается «перевернутой» по отношению к традиционно изображаемой в работах по теории упругости.

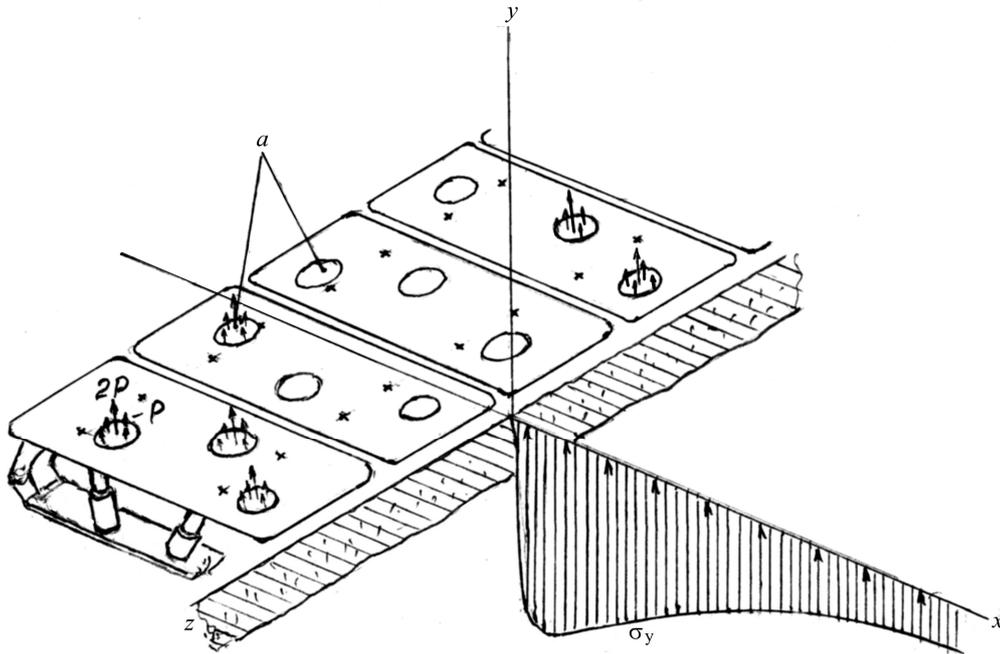


Рис. 1. Схема нагрузок непосредственной кровли: *a* — пятна контактов перекрытий крепи с кровлей

Распределение внешних сил в зоне опорного давления и от реакции крепи в призабойном пространстве представлено в следующем виде.

Реакция массива угольного пласта в плоскости контакта с кровлей в средней части лавы может быть представлена в виде функции одной координаты x , поскольку в большей части лавы в зоне опорного давления существует плоскодеформированное состояние. Эпюра вертикальных напряжений в зоне опорного давления принята в виде функции координаты x в форме [1]

$$\sigma_y = \sigma(x) + \gamma H = \frac{x - x_\phi}{a(x - x_\phi)^2 + b(x - x_\phi) + c} + \gamma H.$$

Если это распределение напряжений представить в виде поля сосредоточенных сил на элементарных площадках, то компоненты плоскодеформированного напряжённого состояния на площадках, параллельных оси z , в любой точке массива T от одной сосредоточенной силы определяются по известным формулам [2]:

$$\sigma_{x(T)} = \frac{2q_n}{\pi} \cdot \frac{x_T^2 y_T}{(x_T^2 + y_T^2)^2}; \quad \sigma_{y(T)} = \frac{2q_n}{\pi} \cdot \frac{y_T^3}{(x_T^2 + y_T^2)^2}; \quad \tau_{x(T)} = \frac{2q_n}{\pi} \cdot \frac{x_T y_T^2}{(x_T^2 + y_T^2)^2},$$

где x_T, y_T — координаты точки, в которой определяются напряжения, относительно точки приложения единичной сосредоточенной силы.

Заменяя интегрирование результатов воздействия нагрузки от учитываемого участка эпюры опорного давления на напряжённое состояние массива в точке T суммированием результатов воздействия сосредоточенных сил на этом участке получим конечные выражения для компонент напряжения в точке (x_T, y_T) от действия опорного давления:

$$\sigma_{x(T)} = \sum_{n=1}^S \frac{2}{\pi} \left[\frac{x_n - x_\phi}{a(x - x_\phi)^2 + b(x - x_\phi) + c} + \gamma H \right] \Delta x \frac{(x_T - x_n)^2 y_T}{((x_T - x_n)^2 + y_T^2)^2};$$

$$\sigma_{y(T)} = \sum_{n=1}^S \frac{2}{\pi} \left[\frac{x_n - x_\phi}{a(x - x_\phi)^2 + b(x - x_\phi) + c} + \gamma H \right] \Delta x \frac{y_T^3}{((x_T - x_n)^2 + y_T^2)^2};$$

$$\tau_{xy(T)} = \sum_{n=1}^S \frac{2}{\pi} \left[\frac{x_n - x_\phi}{a(x - x_\phi)^2 + b(x - x_\phi) + c} + \gamma H \right] \Delta x \frac{(x_T - x_n) y_T^2}{((x_T - x_n)^2 + y_T^2)^2}.$$

Здесь x_n — координаты элементарных сосредоточенных сил эпюры опорного давления относительно линии очистного забоя; x_ϕ — расстояние от линии забоя до точки нулевого значения функции $\delta(x)$, взятое с соответствующим знаком; x_T, y_T — координаты точек массива кровли, в которых определяются компоненты напряжённого состояния; Δx — интервал расположения элементарных сосредоточенных сил, заменяющих нагрузку от опорного давления; a, b, c — параметры функции $\delta(x)$, зависящие от расположения и уровней экстремальных значений коэффициентов концентрации напряжений $k_{\sigma_{\min}}$ и $k_{\sigma_{\max}}$;

$$a = \frac{(k_{\sigma_{\min}} - k_{\sigma_{\max}})}{2R\gamma H (k_{\sigma_{\max}} - 1)(k_{\sigma_{\min}} - 1)}; \quad b = \frac{(k_{\sigma_{\min}} + k_{\sigma_{\max}} - 2)}{2\gamma H (k_{\sigma_{\max}} - 1)(k_{\sigma_{\min}} - 1)};$$

$$c = \frac{R(k_{\sigma_{\min}} - k_{\sigma_{\max}})}{8\gamma H (k_{\sigma_{\max}} - 1)(k_{\sigma_{\min}} - 1)},$$

где $k_{\sigma_{\min}}$ и $k_{\sigma_{\max}}$ — минимальное и максимальное значения коэффициентов концентрации напряжений в точках экстремумов функции $\delta(x)$; R — расстояние между точками экстремумов функции $\delta(x)$; γH — уровень геостатического напряжения на рассматриваемой глубине

Результаты расчётов по приведённой схеме показали, что для обеспечения приемлемой точности с погрешностью $< 2\%$ величину Δx следует принимать порядка 0,1 от максимальной величины координаты y_T , определяющей высоту исследуемого уровня над пластом, а для S принимать такое количество учиты-

ваемых элементарных сосредоточенных сил, которое соответствует протяжённости учитываемого участка эпюры опорного давления в натуральных условиях 30 м.

В представлении схемы действия сил реакции крепи на полупространство кровли требуется обеспечить 2 условия: выполнить корректное размещение пятен контактирования перекрытий поддерживающей части секции крепи с кровлей и распределение элементарных сосредоточенных сил на площади пятна контактирования. В исследованиях, посвящённых вопросам контактирования перекрытий крепи с кровлей [3] установлено, что вероятность контактирования различных участков с кровлей по всей площади несущей поверхности жёстких верхняков одинакова, а передача усилий от реакции стоек на кровлю происходит в основном через 3 пятна, координаты которых определяются расположением и амплитудами неровностей кровли.

Это даёт основание определять координаты центров таких пятен контактирования по трём парам случайных чисел. Проверка приемлемости трёх случайно выбранных точек по условиям равновесия и определение сил в указанных пятнах производится путём решения системы уравнений статики: $\Sigma P_i = P_{\text{равн}}$, $\Sigma M_x = 0$, $\Sigma M_z = 0$. Полученные величины усилий должны отвечать условию $P_{1,2,3} > 0$. Не отвечающие этому условию координаты трёх точек отбрасываются и заменяются новыми. Полученные значения сил P_i , отвечающие условиям равновесия, принимаются как равнодействующие сил в пятнах контактирования.

Под действием контактных сил выступы кровли в пятнах контактирования будут частично сминаться. Процесс смятия будет продолжаться до тех пор, пока не образуется площадка, при которой сила P_i уже не сможет создать напряжения в центральной части пятна, приводящие к разрушению породы. Используя теорию контактного взаимодействия выпуклых поверхностей была определена величина максимального радиуса пятна контактирования, образующегося в процессе смятия пород средней крепости:

$$a_k \approx 0,435 \sqrt{\frac{P_i}{R_{\text{сж}}}}$$

Непрерывно распределённые нормальные напряжения в пределах пятна контактирования заменяются пятью сосредоточенными силами, из которых одна сила величиной $2p$ действует в центре контактного пятна, а остальные 4 силы величиной p расположены у границы пятна на расстоянии a_k от центра, здесь $p = \frac{P_i}{6}$.

Таким образом, всего в пределах одного перекрытия действует 15 элементарных сосредоточенных сил ($m = 15$).

Напряжения в каждой точке массива должны определяться путём суммирования напряжений от влияния достаточного числа секций крепи n вдоль лавы, последняя из которых создаёт дополнительное напряжение менее 0,01 максимального дополнительного напряжения, создаваемого секцией, ближайшей к исследуемому створу.

Выражения для определения второй составляющей компонент напряжений в точке T на площадках массива составлены на основе известного решения о действии сосредоточенной силы на свободной границе полупространства:

$$\Gamma_{x(T)}'' = \sum_{n=1}^{n(0,01)} \sum_{m=1}^{15} \frac{P_{mn}}{2A} \left\{ \frac{3x^2 y}{l^5} - (1-2\nu) \left[\frac{l^2 + yl - y^2}{l^3(l-y)} - \frac{x^2(2l-y)}{l^3(l-y)^2} \right] \right\};$$

$$\sigma_{y(T)}'' = \sum_{n=1}^{n(0,01)} \sum_{m=1}^{15} \frac{P_{mn}}{2\pi} \frac{3y^3}{l^5}; \quad \tau_{xy(T)}'' = \sum_{n=1}^{n(0,01)} \sum_{m=1}^{15} \frac{P_{mn}}{2\pi} \frac{3xy^2}{l^5}; \quad \tau_{yz(T)}'' = \sum_{n=1}^{n(0,01)} \sum_{m=1}^{15} \frac{P_{mn}}{2\pi} \frac{3y^2 z}{l^5}.$$

Здесь: P_{mn} — элементарные сосредоточенные силы контактирования перекрытий крепи с кровлей; x, y, z — координаты рассматриваемой точки T относительно точки приложения элементарной силы P_{mn} ;

$$l = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2};$$

ν — коэффициент поперечных деформаций. Полные величины интересующих нас компонент напряжений в точке T получаются путём суммирования напряжений от опорного давления и реакции крепи:

$$\sigma_{x(T)} = \sigma'_{x(T)} + \sigma''_{x(T)}; \quad \sigma_{y(T)} = \sigma'_{y(T)} + \sigma''_{y(T)}; \quad \tau_{xy(T)} = \tau'_{xy(T)} + \tau''_{xy(T)}; \quad \tau_{yz(T)} \approx \tau''_{yz(T)}.$$

Предложенная математическая модель является базой для разработки компьютерных программ с целью решения конкретных геомеханических задач. Следует иметь в виду, что предложенная структура расчётов напряжений учитывает лишь контактные нагрузки на свободной плоскости кровли, представленной в виде полупространства, и не учитывает напряжений, возникающих от моментных нагрузок в результате изгиба толщи зависающих консолей. Полученные результаты достаточно корректно отражают картину изменения напряжённого состояния нижних слоёв кровли при разных силовых схемах крепления призабойного пространства и их использование целесообразно для поиска путей повышения устойчивости непосредственной кровли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев В.А. Результаты исследования проявлений горного давления в очистных выработках на моделях из эквивалентных материалов. Сб. «Исследования горного давления». — М.: Госгортехиздат, 1960.
2. Филоненко-Бородич М.М. Теория упругости. — М.: Физматгиз, 1959.
3. Ягодкин Г.И., Казьмин В.М. Вероятностная оценка контактного взаимодействия механизированных крепей с кровлей. Информационный выпуск ИГД им. А.А. Скочинского. — М., 1970. **ИВАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Матвеев В.А. — доктор технических наук, профессор.

Матвеев А.В. — инженер, кафедра «Разработка пластовых месторождений».

Шахтинский институт ГОУ ВПО «Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)», siurgtu@siurgtu.ru