

ДЕФОРМАЦИЯ ТАМПОНАЖНОЙ ОБОЛОЧКИ С ПОДКРЕПЛЯЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Розглянуто задачу визначення компонент вектора переміщень і тензора напружень в підкріпленій анкерним кріпленням породобетонній оболонці, утвореній при тампонажі приконтурної зони протяжної гірничої виробки. В явному вигляді отримані аналітичні залежності, які дозволяють давати оцінку напружено-деформованого стану та вибрати раціональні параметри тампонажу в залежності від прояв вертикального і горизонтального тисків гірських порід

THE DEFORMATION OF SEALING SHEETING WITH SUPPORTING ELEMENTS

Is considered the task of determination components of displacement vector and stresses tensor of rock-concrete sheeting, which is supported by root bolting support and is formed by the sealing of zone near the contour of mining working along the strike. In an obvious kind the analytical dependences of received, which allow to estimate stressed and deformed state and to choose rational parameters of the sealing depending on development of vertical and horizontal rock pressure.

Тампонаж нарушенного контура выработанного пространства является одним из наиболее простых и перспективных способов создания искусственных породонесущих конструкций. Породобетонная оболочка, образованная путем омоноличивания забутовочного материала в нарушенном приконтурном массиве, создает единую грузонесущую систему крепь-порода, повышает устойчивость выработки. Принимая во внимание тот факт, что в условиях развитой во-круг выработки трещиноватости в результате тампонажа должны полностью заполняться разломы, трещины, поры, предотвращаться их раскрытие и, таким образом, уменьшаться интенсивность процесса деформирования породного контура, при изготовлении тампонажного раствора наиболее эффективным является использование строительной смеси на основе портландцемента с расширяющими добавками. Проведенные в ИГТМ НАН Украины исследования показывают, что для создания благоприятных условий при наборе прочности тампонажным камнем и породобетонной крепью в целом необходимы дополнительные мероприятия, исключающие по возможности смещения породного контура в этот период и обеспечивающие жесткий режим работы крепи в последующем.

Прочность полученных в результате инъекции тампонажных растворов горных пород составляет не более 20 % прочности ненарушенных пород. Поэтому для повышения несущей способности породонесущей оболочки необходимо предусмотреть дополнительные подкрепляющие элементы в местах наивысшей концентрации растягивающих и касательных напряжений.

Такая возможность повышения несущей способности тампонажной оболочки может быть реализована при помощи соответствующей установки на контуре выработки анкерной крепи. В данной работе предлагается методика иссле-

дования напряженно-деформированного состояния породонесущей оболочки, подкрепленной соответственно установленной анкерной крепью.

1. Постановка задачи. Пусть по истечении расчетного периода времени после отхода забоя в приконтурной зоне выработанного пространства в результате инъекции связующих растворов создается искусственная породонесущая оболочка постоянной толщины опирающаяся на абсолютно жесткое породное основание. Подчеркнем, что замоноличивание упрочняющегося контура выработки осуществляется строительной смесью, обеспечивающей сплошность приконтурной зоны выработанного пространства.

Принимая во внимание большую протяженность выработки, решение рассматриваемой задачи может осуществляться в рамках плоской задачи механики деформируемого твердого тела. Расчетную схему выбираем в виде упругого полукольца, опирающегося на абсолютно жесткое основание и подверженного воздействию вертикального ($\lambda_1 \gamma H$) и бокового ($\lambda_2 \gamma H$) горного давления (Рис. 1). Подкрепляющие анкерные болты устанавливаются как вертикальном направлении ($\theta = \pi/2$), где, как известно, имеют место наибольшие растягивающие напряжения, так и наклонно под некоторым углом θ_0 , который определим в процессе решения рассматриваемой граничной задачи. Сила напряжения анкеров представляется в виде равномерно распределенного давления $\frac{P}{2\alpha c}$ на участке $2\alpha c$, где α - малый угол.

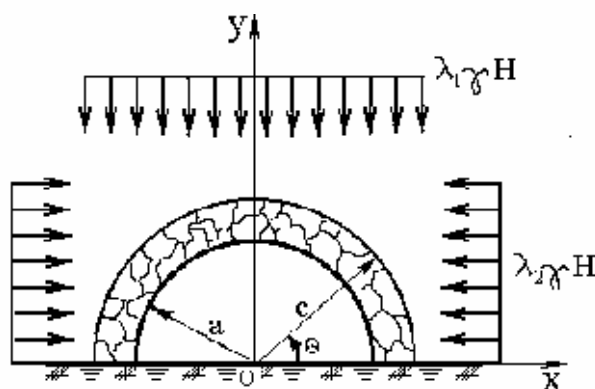


Рис. 1 - Схема нагружения граничной поверхности породобетонной оболочки

Здесь, λ_1 - поправочный коэффициент, учитывающий изменение вертикального давления в зависимости от конкретных горно-геологических условий, в которых находится крепь; λ_2 - коэффициент бокового распора; γ - объемный вес вмещающих пород; H - глубина от земной поверхности до контура выработанного пространства.

Учитывая, что затампонируемый породный контур выработки имеет хаотическую трещиноватость, физико-механические свойства материала породо-

бетонной оболочки будем характеризовать соотношениями линейно-упругого изотропного тела [5].

В процессе исследований потребуются аналитические соотношения закона Гука и уравнения равновесия в полярной системе координат (\bar{r}, θ) $x = \bar{r} \cos \theta$; $y = \bar{r} \sin \theta$ (Рис. 1).

Закон Гука [4, 5]

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \frac{E}{(1-\nu^2)c} \left[\frac{\partial U_r}{\partial r} + \nu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \frac{U_r}{r} \right) \right]; \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{E}{(1-\nu^2)c} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \frac{U_r}{r} + \nu \frac{\partial U_r}{\partial r} \right]; \\ \sigma_{r\theta} &= \frac{E}{2(1+\nu)c} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} + \frac{\partial U_\theta}{\partial r} - \frac{U_\theta}{r} \right];\end{aligned}\quad (1)$$

В формулах (1) обозначено: $r = \bar{r} c^{-1}$

c - внешний радиус шахтной породобетонной оболочки; E и ν - модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно; σ_{rr} и $\sigma_{\theta\theta}$ - нормальные радиальные и тангенциальные, а $\sigma_{r\theta}$ - касательные напряжения; U_r и U_θ - перемещения в направлении координат \bar{r} и θ соответственно.

Уравнение равновесия запишем в компонентах вектора перемещений U_r и U_θ .

$$\begin{aligned}\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r^2} + \frac{1-\nu}{2r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) U_r + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1-\nu}{2r} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{3-\nu}{2r^2} \right) U_\theta &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{3-\nu}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \right) U_r + \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r^2} + \frac{2}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) U_\theta &= 0;\end{aligned}\quad (2)$$

Граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned}\text{При } \bar{r} = c \quad \sigma_{rr} &= -\gamma H [\lambda_1 \sin^2 \theta + \lambda_2 \cos^2 \theta] \\ 0 \leq \theta \leq \pi \quad \sigma_{r\theta} &= -\gamma H [\lambda_1 - \lambda_2] \sin \theta \cos \theta\end{aligned}\quad (3)$$

При $\bar{r} = a$

$$\sigma_{rr} = -\frac{P}{2\alpha c} \begin{cases} \theta_0 - \alpha \leq \theta \leq \theta_0 + \alpha; \\ \pi/2 - \alpha \leq \theta \leq \pi/2 + \alpha; \\ \theta_0 + \frac{\pi}{2} - \alpha \leq \theta \leq \theta_0 + \frac{\pi}{2} + \alpha; \end{cases}$$

$$\sigma_{rr} = 0 \quad \begin{cases} 0 \leq \theta \leq \theta_0 - \alpha; \\ \theta_0 + \alpha \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} - \alpha; \\ \frac{\pi}{2} + \alpha \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} + \theta_0 - \alpha; \\ \frac{\pi}{2} + \theta_0 - \alpha \leq \theta \leq \pi \end{cases}$$

$$\sigma_{r\theta} = 0 \quad 0 \leq \theta \leq \pi; \quad (4)$$

Во избежание громоздких математических выкладок решение поставленной задачи представим в виде суммы решений двух более простых задач.

Задача 1 состоит в определении компонент вектора упругих смещений $U_r^{(1)}$ и $U_\theta^{(1)}$, удовлетворяющих уравнениям равновесия (2) при следующих условиях на граничной поверхности полукольца.

При $r = c$; $0 \leq \theta \leq \pi$

$$\sigma_{rr}^{(1)} = \sigma_{r\theta}^{(1)} = 0$$

При $r = a$

$$\sigma_{rr}^{(1)} = -\frac{P}{2\alpha c} \quad \begin{cases} \theta_0 - \alpha \leq \theta \leq \theta_0 + \alpha; \\ \frac{\pi}{2} - \alpha \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} + \alpha; \\ \frac{\pi}{2} + \theta_0 - \alpha \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} + \theta_0 + \alpha; \end{cases} \quad (5)$$

$$\sigma_{rr}^{(1)} = 0 \quad \begin{cases} 0 \leq \theta \leq \theta_0 - \alpha; \\ \theta_0 + \alpha \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} - \alpha; \\ \frac{\pi}{2} + \alpha \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} + \theta_0 - \alpha; \\ \frac{\pi}{2} + \theta_0 - \alpha \leq \theta \leq \pi \end{cases}$$

$$\sigma_{r\theta} = 0, \quad 0 \leq \theta \leq \pi$$

Задача 2 состоит в определении смещений $U_r^{(2)}$ и $U_\theta^{(2)}$, удовлетворяющих уравнениям равновесия (2) при условиях на граничной поверхности полукольца.

При $r = c$; $0 \leq \theta \leq \pi$

$$\sigma_{rr} = -\gamma H(\lambda_1 \sin^2 \theta + \lambda_2 \cos^2 \theta);$$

$$\sigma_{r\theta} = -\gamma H(\lambda_1 - \lambda_2) \sin \theta \cos \theta;$$

(6)

При $r = a$; $0 \leq \theta \leq \pi$

$$\sigma_{rr} = \sigma_{r\theta} = 0;$$

Очевидно, что сумма решений задач 1, 2 дает решение исходной задачи (2)-(4):

$$U_r = U_r^{(1)} + U_r^{(2)}; \quad U_\theta = U_\theta^{(1)} + U_\theta^{(2)} \quad (7)$$

Более подробно рассмотрим решение задачи 2. Чтобы удовлетворить граничным условиям (5), необходимо найти решение уравнений равновесия (2), обладающее соответствующим функциональным произволом.

Решение уравнений равновесия.

Уравнения равновесия (2) представляют собой систему дифференциальных уравнений второго порядка с переменными коэффициентами.

Производя замену переменных по формуле

$$r = e^t \quad (t = \ln r), \quad (8)$$

приводим уравнения (2) к уравнениям с постоянными коэффициентами

$$\begin{aligned} \left[-\frac{\partial^2}{\partial t^2} - 1 + \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right] U_r^{(1)} + \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{1+\nu}{2} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{3-\nu}{2} \right] U_\theta^{(1)} &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{3-\nu}{1-\nu} \right] U_r^{(1)} + \left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} - 1 + \frac{2}{1-\nu} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right] U_\theta^{(1)} &= 0; \end{aligned} \quad (9)$$

Решение системы уравнений (9) ищем в форме

$$\begin{aligned} U_r^{(1)} &= \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - 1 + \frac{2}{1-\nu} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \phi; \\ U_\theta^{(1)} &= -\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{3-\nu}{1-\nu} \right) \phi, \end{aligned} \quad (10)$$

где ϕ - пока произвольная функция аргументов t и θ , непрерывная вместе со своими производными до второго порядка включительно.

Внося выражения (10) в уравнения (9) убеждаемся, что второе уравнение системы удовлетворяется тождественно, а первое принимает вид

$$\left\{ \frac{\partial^4}{\partial t^4} - (2 - 2\frac{\partial^2}{\partial \theta^2}) \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\partial^4}{\partial \theta^4} + 2\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + 1 \right\} \phi = 0 \quad (11)$$

Решение дифференциального уравнения в частных производных (11) ищем методом Фурье.

Учитывая свойства тригонометрических функций в условиях (3) и (4)

$$\cos^2 \theta = 2^{-1}(1 + \cos 2\theta); \quad \sin^2 \theta = 2^{-1}(1 - \cos 2\theta),$$

полагаем

$$\phi(t, \theta) = \phi_1(t) + \phi_2(t) \cos 2\theta \quad (12)$$

Подстановка равенства (12) в уравнение (11) приводит к бигармоническим уравнениям

$$\left\{ \frac{\partial^4}{\partial t^4} - 2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + 1 \right\} \phi_1 = 0$$

и

$$\left\{ \frac{\partial^4}{\partial t^4} - 10 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + 9 \right\} \phi_2 = 0$$

решение которых, как известно, может быть представлено следующим образом

$$\begin{aligned} \phi_1 &= A_0 e^t + B_0 e^{-t} + C_0 t e^t + D_0 t e^{-t}; \\ \phi_2 &= C_1 e^{3t} + C_2 e^{-3t} + C_3 e^t + C_4 e^{-t}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $A_0, B_0, C_0, D_0, C_j (j=1,2,3,4)$ - произвольные постоянные.

Определившись таким образом с функциями $\phi_{1,2}$, а затем, возвращаясь к формулам (10) и (1), аналитические зависимости для компонент вектора перемещений и тензора напряжений получаем в таком виде

$$U_r = 2C_0 e^t - 2D_0 e^{-t} [-v_7 C_1 e^{3t} + v_7 C_2 e^{-3t} + v_8 C_3 e^t + v_8 C_4 e^{-t}] \cos 2\theta; \quad (14)$$

$$U_\theta = [v_9 C_1 e^{3t} - v_9 C_2 e^{-3t} + v_7 C_3 e^t + 4C_4 e^{-t}] \sin 2\theta;$$

$$v_7 = 8v(1-v)^{-1}; \quad v_8 = 8(1-v)^{-1}; \quad v_9 = 4(3+v)(1-v)^{-1};$$

$$\sigma_{rr} = \frac{E}{(1-v^2)c} \left\{ 2(1+v)C_0 + 2(1-v)D_0 e^{-2t} + [24vC_2 e^{-4t} - 8C_3 + v_1 C_4 e^{-2t}] \cos 2\theta \right\};$$

$$v_1 = 8(1+v)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{E_s}{(1-v^2)c} \left\{ 2(1+v)C_0 - 2(1-v)D_0 e^{-2t} + [v_2 C_1 e^{2t} - 24vC_2 e^{-4t} - 8C_3] \cos 2\theta \right\};$$

$$v_2 = 24(1+v) \quad (15)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{E_s}{2(1+v)c} [v_3 C_1 e^{2t} + v_5 C_2 e^{-4t} + v_6 C_3 + v_4 C_4 e^{-2t}] \sin 2\theta;$$

$$v_3 = 24(1+v)(1-v)^{-1}; \quad v_4 = 8(1+v)(1-v)^{-1}; \quad v_5 = 48v(1-v)^{-1};$$

$$v_6 = 16(1-v)^{-1}.$$

Произвольные постоянные в формулах (14) и (15) находим, удовлетворяя граничным условиям.

Внося выражения σ_{rr} и $\sigma_{r\theta}$ в равенства (6), получаем следующие две системы линейных алгебраических уравнений для определения произвольных постоянных.

$$2(1+\nu)C_0 + 2(1-\nu)D_0 a_0^{-2} = 0 \quad (16)$$

$$2(1+\nu)C_0 + 2(1-\nu)D_0 = -\gamma_{01}$$

$$a_0 = ac^{-1}; \quad \gamma_{01} = -c\gamma H \frac{1-\nu^2}{2E} (\lambda_2 + \lambda_1);$$

$$24\nu C_2 a_0^{-4} - 8C_3 + \nu_1 C_4 a_0^{-2} = 0;$$

$$\nu C_1 a_0^2 + \nu_5 C_2 a_0^{-4} + \nu_6 C_3 + \nu_4 C_4 a_0^{-2} = 0; \quad (17)$$

$$24\nu C_2 - 8C_3 + \nu_1 C_4 = \gamma_{02}$$

$$\nu_3 C_1 + \nu_5 C_2 + \nu_6 C_3 + \nu_4 C_4 = \gamma_{03}$$

$$\gamma_{03} = c\gamma H \frac{1+\nu}{E_r} (\lambda_2 - \lambda_1) \quad \gamma_{02} = c\gamma H \frac{1-\nu^2}{2_t} (\lambda_1 - \lambda_2)$$

Решая системы линейных алгебраических уравнений (16) и (17), находим

$$\begin{aligned} C_0 &= -\gamma_{01}[2(1+\nu)(1-a_0^2)]^{-1}; \quad D_0 = a_0^2 \gamma_{01}[2(1-\nu)(1-a_0^2)]^{-1}; \\ C_1 &= \gamma_{03} \nu_{15} + \gamma_{02} \nu_{16}; \quad C_2 = \gamma_{03} \frac{a_0^2}{\nu_{10}} - \gamma_{02} \frac{\nu_{11}}{\nu_{10}}; \\ C_3 &= \gamma_{02} \nu_{12} - 3\nu \gamma_{03} / \nu_{10}; \quad C_4 = \gamma_{02} \nu_{13} + \gamma_{03} \nu_{14}; \end{aligned} \quad (18)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \nu_{10} &= \nu_5 (a_0^2 - a_0^4) - 3\nu a_0^{-2} (a_0^2 - 1) \nu_6 - 24\nu (1 + a_0^{-2}) (a_0^2 - a_0^{-2}) / \nu_1; \\ \nu_{11} &= [8\nu_4 (a_0^2 - a_0^{-2}) - \nu_6 a_0^{-2} (1 - a_0^{-2}) \nu_1] [8\nu_1 (1 - a_0^{-2})]^{-1}; \\ \nu_{12} &= a_0^{-2} [\nu_{10} + 24\nu (1 - a_0^{-2}) \nu_{11}] [8\nu_{10} (1 - a_0^{-2})]^{-1}; \\ \nu_{13} &= [24\nu (1 - a_0^{-4}) \nu_{11} + \nu_{10}] [\nu_1 (1 - a_0^{-2}) \nu_{10}]^{-1}; \\ \nu_{14} &= 24\nu (1 + a_0^{-2}) a_0^2 (\nu_1 \cdot \nu_{10})^{-1}; \\ \nu_{15} &= [\nu_{10} - a_0^2 \nu_5 + 3\nu \cdot \nu_6 + \nu_4 \cdot \nu_{14} \cdot \nu_{10}] (\nu_3 \cdot \nu_{10})^{-1}; \\ \nu_{16} &= [\nu_5 \cdot \nu_{11} - \nu_6 \cdot \nu_2 \cdot \nu_{10} - \nu_4 \cdot \nu_{13} \cdot \nu_{10}] (\nu_3 \cdot \nu_{10})^{-1}. \end{aligned} \quad (19)$$

Внося выражения произвольных постоянных (16) в формулы (12) и (13), получаем аналитические зависимости для исследования напряженно-

деформированного состояния неподкрепленной породной оболочки, подверженной воздействию вертикального и бокового давления горных пород.

Анализ, полученных таким образом, аналитических зависимостей для компонент тензора напряжений (15) уже на этой стадии исследования дает возможность утверждать, что наивысшая концентрация касательных напряжений $\sigma_{r\theta}$ имеет место при $\theta_0 = \pi/4$. Принимая во внимание тот факт, что горные породы сравнительно слабо сопротивляются деформации сдвига, для повышения несущей способности тампонажной оболочки необходимо в зоне $\theta_0 = \pi/4$ предусматривать подкрепляющие элементы, препятствующие деформации сдвига.

Решение задачи 1 осуществляется по аналогии с рассмотренным выше. Полагая $\theta_0 = \pi/4$ и раскладывая нагрузку (4) на внутренней поверхности полукольца в ряд Фурье, граничные условия (5) перепишем так

При $r = c; 0 \leq \theta \leq \pi$

$$\sigma_{rr} = \sigma_{r\theta} = 0$$

При $r = a; 0 \leq \theta \leq \pi$

$$\sigma_{rr} = -\frac{2P}{\pi c} \sum_{n=0,2,4}^{\infty} \frac{\sin n\alpha}{\alpha} \cos \frac{n\pi}{2} (1 + 2 \cos \frac{n\pi}{4}) \cos \theta$$

Разыскивая решение уравнений равновесия (9) в форме (10),

$$\phi = \sum_{n=0,2,4}^{\infty} \phi_n + \cos n\theta$$

где ,

и опуская промежуточные выкладки, получаем выражения компонент вектора перемещений

$$U_r^{(1)} = \sum_{n=0,2,4}^{\infty} \{A_{1n} v_{n2} \exp[(1+n)t] + A_{2n} v_{n3} \exp[-(1+n)t] + A_{3n} v_{n3} \exp[(1-n)t] + A_{4n} v_{n3} \exp[-(1-n)t]\} \cos n\theta; \quad (21)$$

$$v_{n2} = (1+n)^2 - v_{n1}; \quad v_{n3} = (1-n)^2 - v_{n1}; \quad v_{n1} = 1 + \frac{2n}{1-v};$$

$$U_\theta^{(1)} = \sum_{n=0,2,4}^{\infty} \{A_{1n} v_{n4} \exp[(1+n)t] - A_{2n} v_{n5} \exp[-(1+n)t] + A_{3n} v_{n6} \exp[(1-n)t] - A_{4n} v_{n7} \exp[-(1-n)t]\} \sin n\theta;$$

$$v_{n4} = [(1+v)(1+n) - (3-v)] \frac{n}{1-v}; \quad v_{n5} = [(1+v)(1+n) + 3-v] \frac{n}{1-v};$$

$$v_{n6} = [(1+v)(1-n) - (3-v)] \frac{n}{1-v}; \quad v_{n7} = [(1+v)(1-n) + 3-v] \frac{n}{1-v};$$

и тензора напряжений.

$$\sigma_{rr}^{(1)} = \frac{E}{(1-v^2)c} \sum_{n=0,2,4}^{\infty} \{A_{1n} v_{n8} \exp[nt] - A_{2n} v_{n9} \exp[-(2+n)t] + A_{3n} v_{n10} \exp[-nt] - A_{4n} v_{n11} \exp[-(2-n)t]\} \cos n\theta;$$

(22)

$$\sigma_{\theta\theta}^{(1)} = \frac{E}{(1-\nu^2)c} \sum_{n=0,2,4} \{A_{1n} v_{n12} \exp[nt] - A_{2n} v_{n13} \exp[-(2+n)t] + A_{3n} v_{n14} \exp[-nt] -$$

$$- A_{4n} v_{n15} \exp[-(2-n)t]\} \cos n\theta;$$

$$\sigma_{r\theta}^{(1)} = \frac{E}{2(1+\nu)c} \sum_{n=0,2,4} \{A_{1n} v_{n16} \exp[nt] - A_{2n} v_{n17} \exp[-(2+n)t] + A_{3n} v_{n18} \exp[-nt] -$$

$$- A_{4n} v_{n19} \exp[-(2-n)t]\} \sin n\theta;$$

$$\begin{aligned} v_{n8} &= v_{n2}(1+n+\nu) + n \cdot \nu \cdot v_{n4}; & v_{n9} &= v_{n2}(1+n-\nu) + \nu \cdot n \cdot v_{n5}; \\ v_{n10} &= v_{n3}(1-n+\nu) + \nu \cdot n \cdot v_{n6}; & v_{n11} &= v_{n3}(1-n-\nu) + \nu \cdot n \cdot v_{n7}; \\ v_{n12} &= v_{n2}[1+\nu(1+n)] + v_{n4} \cdot n; & v_{n13} &= v_{n2}[\nu(1+n)-1]; \\ v_{n14} &= v_{n3}[\nu(1-n)+1] + n v_{n6}; & v_{n15} &= v_{n3}[\nu(1-n)-1] + n v_{n7}; \\ v_{n16} &= (2+n)v_{n4} - n v_{n2}; & v_{n17} &= (2+n)v_{n5} + n v_{n2}; \\ v_{n18} &= (2-n)v_{n6} - n v_{n8}; & v_{n19} &= (2-n)v_{n7} - n v_{n3}. \end{aligned}$$

В формулах (21) и (22) произвольные постоянные $A_{\kappa n}$ ($\kappa = 1, 2, 3, 4$) определяются при помощи соотношений

$$\begin{aligned} A_{1n} &= -v_{n33} \gamma_{40}; & \gamma_{40} &= \frac{2}{\pi} \frac{c(1-\nu^2)}{E} P \frac{\sin n\alpha}{n\alpha} \cos \frac{n\pi}{2} (1 + 2 \cos \frac{n\pi}{4}); \\ A_{2n} &= -v_{n32} \gamma_{40}; & A_{3n} &= -v_{n34} \gamma_{40}; & A_{4n} &= -v_{n35} \gamma_{40}; \\ v_{n34} &= v_{n32} v_{n25} - v_{n26} v_{n33}; & v_{n35} &= v_{n23} v_{n33} - v_{n24} v_{n32}; & v_{n32} &= v_n^{(27)} / v_{n31}; \\ v_{n33} &= v_{n28} / v_{n31}; & v_{n31} &= v_{n30} v_{n27} - v_{n28} v_{n29}; \\ v_{n30} &= v_{n10} a_0^{-n} v_{n25} - v_{n9} a_0^n + v_{n11} a_0^{-(2-n)} v_{n24}; \\ v_{n29} &= v_{n10} a_0^{-n} v_{n26} - v_{n8} a_0^n + v_{n11} a_0^{-(2-n)} v_{n23}; \\ v_{n28} &= -v_{n18} a_0^{-n} v_{n25} + v_{n17} a_0^{-(2+n)} - v_{n19} a_0^{-(2-n)} v_{n24}; \\ v_{n27} &= v_{n16} a_0^n - v_{n18} a_0^{-n} v_{n26} - v_{n19} a_0^{-(2-n)} v_{n23}; \\ v_{n26} &= (v_{n9} v_{n19} - v_{n11} v_{n17}) / v_{n22}; & v_{n22} &= v_{n11} v_{n18} - v_{n19} v_{n10}; \\ v_{n23} &= v_{n20} / v_{n22}; & v_{n24} &= v_{n21} / v_{n22}; & v_{n25} &= (v_{n8} v_{n19} - v_{n11} v_{n16}) / v_{n22}; \\ v_{n20} &= v_{n8} v_{n18} - v_{n10} v_{n16}; & v_{n21} &= v_{n9} v_{n18} - v_{n10} v_{n17} \end{aligned} \quad (23)$$

В целом аналитические зависимости для компонент вектора перемещений и тензора напряжений, соответствующие задаче (2) – (4), записываются в виде суммы

$$U_r = U_r^{(1)} + U_r^{(2)}; \quad U_\theta = U_\theta^{(1)} + U_\theta^{(2)} \quad (24)$$

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rr}^{(1)} + \sigma_{rr}^{(2)}; \quad \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta}^{(1)} + \sigma_{\theta\theta}^{(2)}; \quad \sigma_{r\theta} = \sigma_{r\theta}^{(1)} + \sigma_{r\theta}^{(2)}, \quad (25)$$

где компонент вектора перемещений и тензора напряжений в правой части формул (24) и (25) определяется соотношениями (14)-(19) и (21)-(23).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.В.Виноградов. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.
2. Ю.З.Заславский, А.А.Лопухин, Е.Б.Дружко, Н.В.Качан. Инъекционное упрочнение горных пород. – М.: Недра, 1984. – 176 с.
3. В.Г.Колесников, В.Г.Перепелица, Г.В.Левченко. Аналитические исследования устойчивости выработок при тампонаже закрепного пространства // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ.- 2003. - № 41. – С. 21-25.
4. П.Ф.Папкович. Теория упругости. – Л.-М.: ОБОРОНГИЗ, 1939. – 642 с.
5. В.Г.Рекач. Руководство к решению задач по теории упругости. – М.: Высшая школа, 1977. – 216 с.

УДК 622.1:622.834

Е.Г. Петрук, Д.Ю. Кузнецов

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МАКСИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В КОСЫХ СЕЧЕНИЯХ ДИНАМИЧЕСКОЙ МУЛЬДЫ СДВИЖЕНИЯ

Приведені результати досліджень максимальних значень параметрів деформаційних процесів в косих розрізах динамічної мільди зсуву при розробці пологих вугільних пластів Західного Донбасу та Львовсько-Волинського басейну. Встановлена залежність максимальних вертикальних та горизонтальних деформацій в косих розрізах динамічної мільди зсуву від потужності вугільного пласту, глибини розробки, потужності наносів та коефіцієнтів для кожного косого напрямку від кута повороту відносно головного розрізу мільди зрушення.

RESULTS OF RESEARCHES OF THE MAXIMAL MEANINGS PARAMETERS OF DEFORMATION PROCESSES IN SLANTING SECTIONS OF DYNAMIC SUBSIDENCE THROUGH

The results of researches of the maximal meanings of parameters of deformation processes in slanting sections of dynamic subsidence through are given by development of flat coal layers of Western Donbass and Lvovsko-Volynsk pool. The dependence of the maximal vertical and horizontal deformations in slanting sections of dynamic subsidence through from capacity of a coal layer, depth of development, capacity overlying cover and factors for each slanting direction on a corner of turn of the rather main subsidence through section.

Кафедрой маркшейдерского дела НГУ в период с 1970 по 1986гг. проведено большое количество (более 400 серий) частотных натурных инструментальных наблюдений с интервалом от 1 до 10 дней. Исследования проводились на шахтах Западного Донбасса [1] и Львовско-Волинского бассейнов путем выполнения частотных маркшейдерских измерений, их обработки, анализа и обобщения. Наблюдения проводились в следующих горнотехнических условиях:

- в Западном Донбассе – при глубинах разработки 110-300м, скорости подвигания очистных забоев 30-90м/мес., угле падения пластов до 5° , вынимаемой мощности пластов 0,7-1,1м;
- во Львовско-Волинском бассейне – при глубине разработки 350-600м, скорости подвигания очистных забоев 30-50м/мес., угле падения пластов до 6° , вынимаемой мощности пластов 0,9-1,41м,.

Управление кровлей в этих бассейнах – полное обрушение.