

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЗОНЫ НЕУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ
ВБЛИЗИ ВЫРАБОТОК ПРИ СВОБОДНОМ РАЗРУШЕНИИ ПОРОД**

Публікація представляє модель розподілу напружень поблизу кругового отвору при утворенні зони руйнування, в гідростатичних умовах зовнішнього навантаження. На відміну відомим рішенням, модель дозволяє більш детально врахувати особливості формування остатньої міцності в межах зони руйнування, в якій від контуру виробки в глибину масиву розглядаються три послідовних області порід з різними законами змінення остатньої міцності. У гірських порід в першій області поблизу контуру виробки остатня міцність відсутня. Остатня міцність востановлюється в другій області, та є сталою в третій.

**NONELASTIC ZONE DEMENSIONING AROUND OPENING
WITH FREE FRACTURED OF ROCKS**

The paper is devoted to stress distribution model around a circular opening in a hydrostatic stress field, due-to the fracture zone development. Unlike to well-known solution the model is able take into account the rock residual strength value change in a fracture zone. For this purpose within the limits of a zone of destruction three areas with the different laws of change of residual strength are considered. At soils of the first area near to a head loop (circuit) of a development the residual strength is absent. The residual strength of soils is restored in the second area, and in third is saved fixed.

Исследования особенностей развития зон неупругих деформаций вблизи выработок, в частности размеров зон возможного разрушения, являются одной из основных задач геомеханики. Наиболее универсальные и полные аналитические модели, основанные на результатах лабораторных испытаний горных пород до и после достижения предела прочности, и обзор работ по интересующему вопросу можно найти в следующих литературных источниках [1, 2, 3]. Сравнение и анализ результатов расчетных моделей и данных натурных замеров размеров зон неупругих деформаций приведен в [4].

Причины значительного развития зон неупругих деформаций вблизи выработок, закрепленных податливой крепью, рассмотрены в работе [5]. Обосновывается возможность снижения остаточной прочности пород меньше значений, получаемых при испытаниях на одноосное сжатие, вплоть до нулевых.

Для оценки эффекта исчезновения остаточной прочности пород вблизи контура выработок, в отличие от известных решений для хрупко разрушающихся пород, в зоне разрушения выделим три части. Непосредственно вблизи контура расположим зону, в которой значение остаточной прочности равно нулю. Породы в этой зоне соответствуют сыпучим и удерживаются от высыпания подпором крепи. Следующие зоны вглубь от контура выработки – восстановления и стабилизации остаточной прочности (остаточной несущей способности).

В осесимметричной постановке для хрупко разрушающихся пород расчетная схема задачи может быть представлена следующим образом. Условия на внутренней и внешней границах имеют стандартный вид.

$$\begin{aligned}\sigma_r &= P \quad \text{при } r = 1 \quad (\text{на контуре выработки}) \\ \sigma_r &= \sigma_\theta = q \quad \text{при } r \rightarrow \infty \quad (\text{вдали от контура выработки}),\end{aligned}$$

где P – отпор крепи, q – гидростатическая нагрузка.

Пусть радиус зоны восстановления остаточной прочности r^* определяется коэффициентом K_2 в долях от радиуса зоны неупругих деформаций r_L ; величина которого нормирована по отношению к радиусу выработки. Радиус зоны отсутствия остаточной прочности r^{**} , определяемый характерными размерами блоков пород на контуре выработки, учитывается коэффициентом K_1 в долях от r^* :

$$\begin{aligned}r^* &= 1 + K_2 (r_L - 1), \\ r^{**} &= 1 + K_1 (r^* - 1) = 1 + K_1 K_2 (r_L - 1),\end{aligned}\tag{1}$$

где $0 \leq K_1 \leq 1$ и $0 \leq K_2 \leq 1$.

Пусть также скорость восстановления остаточной прочности в пределах соответствующей зоны регулируется показателем степени n , а A – параметр, зависящий от угла внутреннего трения ρ горных пород:

$$A = \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho}.$$

В соответствии с принятыми обозначениями для плоской задачи в полярной системе координат, изменение прочности пород на различных расстояниях от контура зоны неупругих деформаций может быть представлено в виде

$$\sigma_{сж} = \sigma_\theta - A \sigma_r = \begin{cases} \sigma_{сж}^0, & r > r_L, \\ \sigma_{сж}^{ост}, & r^* < r < r_L, \\ \sigma_{сж}^* = \left(\frac{r - r^{**}}{r^* - r^{**}} \right)^n \sigma_{сж}^{ост}, & r^{**} < r < r^*, \\ \sigma_{сж}^{**} = 0, & 1 < r < r^{**}, \end{cases}\tag{2}$$

где $\sigma_\theta = \frac{d\varphi}{dr}$, $\sigma_r = \frac{\varphi}{r}$, $\varphi(r)$ – функция напряжений, $\sigma_{сж}^0$ – предел прочности на одноосное сжатие, величина которого нормируется по отношению к гидростатической нагрузке q , приложенной на бесконечности, $\sigma_{сж}^{ост}$ – остаточная прочность, величина которой нормирована по отношению к пределу прочности пород на одноосное сжатие $\sigma_{сж}^0$.

Рассмотрим более подробно по зонам.

1) Для зоны отсутствия остаточной прочности $1 < r < r^{**}$

$$\frac{d\varphi}{dr} - A \frac{\varphi}{r} = 0.$$

Решение ищем в виде: $\varphi = C_1 r^A$.

Удовлетворяя граничным условиям на контуре выработки, находим постоянную интегрирования C_1 : при $r = 1$ $\sigma_r^{**} = P$, где P – отпор крепи, тогда $C_1 = 1$,

$$\sigma_r^{**} = Pr^{A-1} \text{ и } \sigma_{\theta}^{**} = \frac{d\varphi}{dr} = AP r^{A-1}. \quad (3)$$

2) Для зоны восстановления остаточной прочности $r^{**} < r < r^*$.

$$\frac{d\varphi}{dr} - A \frac{\varphi}{r} = \sigma_{сж}^{осм} \left(\frac{r - r^{**}}{r^* - r^{**}} \right)^n$$

Решение ищем в виде: $\varphi = C_1 r^A$ ($C_1 = C_1(r)$). Подставляя его в уравнение, получим:

$$C_1 A r^{A-1} + r^A \frac{dC_1}{dr} = \frac{d\varphi}{dr}.$$

После интегрирования определяем:

$$C_1 = \frac{\sigma_{сж}^{осм}}{(r^* - r^{**})^n} \int \frac{(r - r^{**})^n}{r^A} dr + C_2 \text{ и } \sigma_r^* = \frac{\varphi}{r} = \frac{\sigma_{сж}^{осм} r^{A-1}}{(r^* - r^{**})^n} I(r) + C_2 r^{A-1},$$

$$\text{где } I(r) = \int \frac{(r - r^{**})^n}{r^A} dr = \sum_{i=0}^n (-1)^i C_n^i \frac{r^{n-i-A+1}}{n-i-A+1} r^{**i}.$$

Постоянную интегрирования C_2 находим из условия: при $r = r^{**}$ $\sigma_r^* = \sigma_r^{**}$, тогда

$$C_2 = P - \frac{\sigma_{сж}^{ост}}{(r^* - r^{**})^n} I(r^{**}),$$

$$\sigma_r^* = \left(P + \frac{\sigma_{сж}^{ост}}{(r^* - r^{**})^n} \Delta I(r, r^{**}) \right) r^{A-1} \quad \text{и}$$

$$\sigma_\theta^* = Ar^{A-1} \left(P + \frac{\sigma_{сж}^{ост}}{(r^* - r^{**})^n} \Delta I(r, r^{**}) \right) + \frac{\sigma_{сж}^{ост} r^A}{(r^* - r^{**})^n} I'(r), \quad (4)$$

где $\Delta I(r, r^{**}) = I(r) - I(r^{**})$, $I'(r) = \frac{(r - r^{**})^n}{r^A} = \sum_{i=0}^n (-1)^i C_n^i r^{n-i-A} r^{**i}$.

3) Для зоны стабилизации остаточной прочности $r^* < r < r_L$

$$\frac{d\varphi}{dr} - A \frac{\varphi}{r} = \sigma_{сж}^{ост}.$$

Решение ищем в виде: $\varphi = C_1 r^A$ ($C_1 = C_1(r)$). Подставляя в уравнение, получим:

$$\frac{dC_1}{dr} = \sigma_{сж}^{ост} r^{-A},$$

после интегрирования:

$$C_1 = \frac{\sigma_{сж}^{ост}}{(1-A)r^{A-1}} + C_2 \quad \text{и} \quad \sigma_r^P = \frac{\varphi}{r} = \frac{\sigma_{сж}^{ост}}{(1-A)r} + C_2 r^{A-1}.$$

C_2 находим из условия: при $r = r^*$ $\sigma_r^P = \sigma_r^*$, тогда:

$$C_2 = \frac{\sigma_{сж}^{ост}}{(A-1)r^{*A-1}} + P + \frac{\sigma_{сж}^{ост}}{(r^* - r^{**})^n} \Delta I(r^*, r^{**}),$$

$$\sigma_r^P = \frac{\sigma_{сжс}^{осм}}{A-1} \left(\left(\frac{r}{r^*} \right)^{A-1} - 1 \right) + \left(P + \frac{\sigma_{сжс}^{осм}}{(r^* - r^{**})^n} \Delta I(r^*, r^{**}) \right) r^{A-1} \quad \text{и} \quad (5)$$

$$\sigma_\theta^P = \frac{\sigma_{сжс}^{осм}}{A-1} \left(A \left(\frac{r}{r^*} \right)^{A-1} - 1 \right) + A \left(P + \frac{\sigma_{сжс}^{осм}}{(r^* - r^{**})^n} \Delta I(r^*, r^{**}) \right) r^{A-1},$$

где

$$\Delta I(r^*, r^{**}) = \sum_{i=0}^n (-1)^i \frac{C_n^i r^{**i}}{n-i-A+1} \left(r^{*n-i-A+1} - r^{**n-i-A+1} \right).$$

На границе зоны неупругих деформаций $r = r_L$ и радиальная компонента напряжений $\sigma_r^P = P_L = \frac{2 - \sigma_{сжс}^0}{A+1}$, тогда:

$$\frac{\sigma_{сжс}^{осм}}{A-1} \left(\left(\frac{r_L}{r^*} \right)^{A-1} - 1 \right) + \left(P + \frac{\sigma_{сжс}^{осм}}{(r^* - r^{**})^n} \Delta I(r^*, r^{**}) \right) r_L^{A-1} = P_L \quad (6)$$

Подставив (1) в (6), получаем:

$$\frac{\sigma_{сжс}^{осм}}{A-1} \left(\left(\frac{r_L}{1+K_2(r_L-1)} \right)^{A-1} - 1 \right) + \left(P + \frac{\sigma_{сжс}^{осм}}{K_2^n (1-K_1)^n (r_L-1)^n} \Delta I(r_L) \right) r_L^{A-1} = P_L, \quad (7)$$

где

$$\Delta I(r_L) = \sum_{i=0}^n (-1)^i \frac{C_n^i (1+K_1 K_2 (r_L-1))^i}{n-i-A+1} \left((1+K_2(r_L-1))^{n-i-A+1} - (1+K_1 K_2 (r_L-1))^{n-i-A+1} \right).$$

Таким образом, получено трансцендентное уравнение (7) для определения размеров зоны неупругих деформаций. Решение уравнения для каждого конкретного случая может быть найдено численно. Например, для $\sigma_{сжс}^0 = 1$ ($P_L = 0,2$) при $\sigma_{сжс}^{осм} = 0,1$; $P = 0,005$; $n = 1$; $A = 4$; $K_1 = 0,5$; $K_2 = 0,4$ вычисленный методом Ньютона радиус зоны неупругих деформаций $r_L = 2,4$ и $r^* = 1,56$; $r^{**} = 1,28$ (рис. 1).

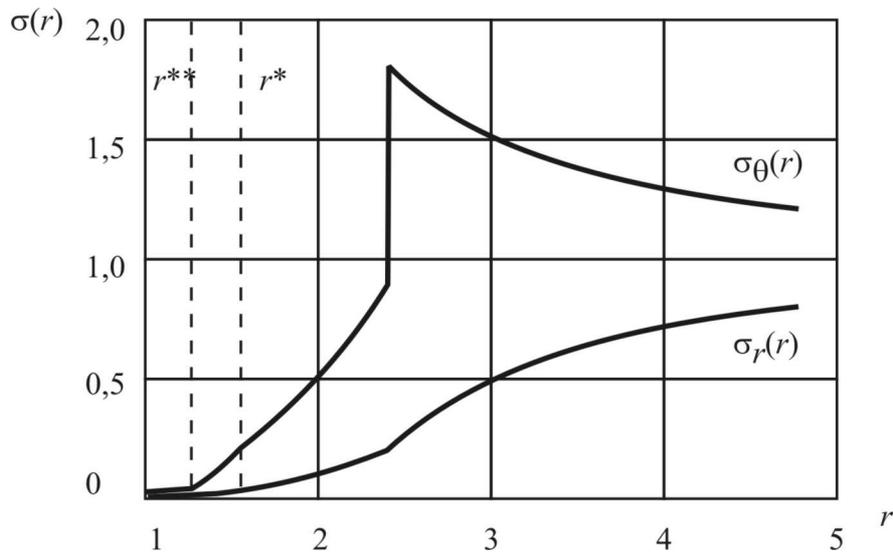


Рис. 1 – Графики распределения радиальной и тангенциальной компонент главных напряжений вокруг горизонтальной выработки

При $K_1 = 0$ и $K_2 = 0$ уравнение (7) переходит в соответствующее уравнение модели [1] для случая $M = \infty$, где M – модуль спада.

Предложенная модель может использоваться для исследования напряженно-го состояния горных пород вблизи выработок в условиях больших глубин разработки и применении податливых крепей. При наличии структурных ослаблений горного массива, действии масштабного, кинематического и других факторов разупрочнение пород вокруг таких выработок, происходит по механизмам хрупкого свободного разрушения, сопровождается потерей остаточной несущей способности пород вблизи контура и формированием значительных зон неупругих деформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – Киев: Наук. думка, 1985. – 192 с.
2. Баклашов И. В. Деформирование и разрушение породных массивов. – М.: Недра, 1988. – 271 с.
3. Brown E.T., Bray J.W., Ladany B., Hoek E. Characteristic line calculation for rock tunnels // J. Geotech. Engng, Am. Soc. Civ. Engrs. -1983-№109.- P 15-39.
4. Шашенко А.Н., Тулуб С.Б., Сдвижкова Е.А. Некоторые задачи статистической геомеханики // - Київ.: Університетське видавництво “Пульсари” 2002.-304 с.
5. Булич Ю.Ю., Головки С.А. Влияние разрыхления пород на развитие зоны неупругих деформаций вблизи выработок // Геотехн. механика: Межвуз. сб. научн. работ, Ин-т геотехнич. механики НАН Украины. – Днепропетровск: 1999. – Вып. 15. – С. 62-65.