

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОРОДНОГО МАССИВА И ЧИСЛЕННЫЕ ПРОЦЕДУРЫ УЧИТЫВАЮЩИЕ ЗАПРЕДЕЛЬНУЮ ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ И НЕОДНОРОДНОСТЬ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ СЛОЖНОМ КОНФИГУРАЦИИ ВЫРАБОТОК**

**Абдылдаев Э.К., Абдылдаев А.Е. Исаев Б.А., Нурдинова А.А.**

*ИГД и ГТ, Бишкек, Кыргызстан, [alisher\\_leader@mail.ru](mailto:alisher_leader@mail.ru)*

***Аннотация:** Рассмотрены модели массива, отражающие различные стадии деформирования горных пород: упругопластической среде с разрыхлением, разупрочняющейся и разрыхляющейся среда с упрочнением и модели учитывающей трещиноватость горных пород. Предложенные модели реализованы ввиду численных процедур на компьютере.*

***Ключевые слова:** трещиноватость, изотропные среда, деформируемость горных пород.*

**GEOMECHANICAL MODEL OF THE ROCK MASS AND NUMERICAL PROCEDURES TAKING INTO ACCOUNT BEYOND THE DEFORMABILITY AND THE HETEROGENEITY OF THE ROCK MASS WITH A COMPLEX CONFIGURATION WORKINGS**

**Abdyldaev E. K., Abdyldaev A. E. Isaev B. A., Nurdinova A. A.**

*Institute of mining and mining technologies named after, Bishkek, Kyrgyzstan*

***Abstract:** In the considered mass models. reflecting different stages of deformation of rocks: elastic-plastic medium with loosening. softening and retription environment. environment hardening and models taking into account criminality rocks. The proposed model is implemented in the form of numerical procedures on the computer.*

***Key words:** fracturing, isotropic media, deformability of rocks.*

Одной из важнейших предпосылок эффективного освоения и эксплуатации месторождений полезных ископаемых является исследование процессов перераспределения напряжений, деформирования и разрушения породных массивов, вызываемых горными работами. В результате натурных наблюдений и экспериментов на моделях, выполненных многими учеными установлено, что указанные процессы зависят от геомеханической структуры месторождения (механических свойств горных пород, их естественного напряженного состояния, структурно-геологических условий, морфологии, мощности и угла падения залежи). Учет элементов геомеханической структуры является необходимым условием для выбора и обоснования систем разработки, их параметров и методов управления горным давлением, расчета устойчивости горных выработок при добыче полезных ископаемых. Результаты экспериментальных исследований стимулировали интенсивное развитие аналитических, и численных методов анализа геомеханических процессов, происходящих в породном массиве под влиянием горных работ, и позволили определить начальные и граничные условия для постановки и решения соответствующих краевых задач геомеханики. Ввиду многообразия и сложности геомеханической структуры массивов пород фактически трудно построить математически точные зависимости для аналитического решения задачи геомеханики в постановке, адекватное реальным условиям. Это обстоятельство вынуждает вводить в аналитических методах решения геомеханических задач некоторые допущения, облегчающие процесс исследований. В настоящее время предложены двух-, трех-, четырехзвенные аппроксимации запредельных кривых «напряжение – деформация» и на этой основе выполнены исследования устойчивости протяженных, одиночных горных выработок, пройденных, в однородных изотропных средах. Трудности, возникающие из-за сложных граничных условий, неоднородности среды и неопределенности положения упругопластической границы, ограничивают возможность применения аналитических методов для решения широкого круга задач геомеханики с учетом запредельной деформируемости горных пород.

Учет многообразных факторов, приближающих расчетную модель массива к реальной, может быть осуществлен на основе применения современных численных методов решения краевых задач как метода конечных и граничных элементов. Среди различных численных методов наиболее совершенным, для решения геомеханических задач, является метод конечных элементов (МКЭ). Наглядность и возможность учета сложных горно - геологических и горно - технических условий породного массива, особенно при разработке месторождений полезных ископаемых комбинированным способом, открывает перспективный путь к эффективному применению МКЭ в геомеханике. Аналитическое описание зависимостей между напряжениями и деформациями в породном массиве является основной целью построения геомеханической модели. В работе путем анализа результатов известных экспериментальных испытаний пород предложены модели, отражающие различные стадии деформирования горных пород: упруго-пластическая среда с разрыхлением; разупрочняющаяся и разрыхляющаяся среда; среда с упрочнением и модели учитывающей трещиноватость горных пород.

На рис.1 представлен комплекс графиков, характеризующих свойства построенных нами моделей упругопластической разрыхляющейся среды и среды с разупрочнением с традиционным условием прочности обобщенным на область растяжения, близко отражающий реальное состояние горных пород вокруг выработок:

$$\sigma_1 - \sigma_3 \delta = S; \quad (1),$$

$$\delta = \text{ctg } \Psi; S = 2-C-\text{ctg}(\pi/4 - \varphi/2),$$

где  $\text{ctg} \Psi = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$ ;  $\varphi$  - угол внутреннего трения;  $C$  - сцепление;  $S$  - прочность на одноосное сжатие.

Запредельные диаграммы  $\sigma_i - \varepsilon_i$  (рис.1) моделей аппроксимируются кусочно-линейными функциями. Верхние графики зависимостей отражают изменения сопротивляемости среды по мере деформирования при различных боковых давлениях, нижние - закон пластического течения. При этом для упругопластической среды (штрих пунктирные линии на рис.1) формула 1 сохраняется для всего процесса деформирования, а для разупрочняющейся среды сопротивляемость снижается от исходной величины до остаточной по линейному закону (рис. 1 с):

$$\sigma = \begin{cases} S + \sigma_3 \delta, & \text{если линия (АБН)} \\ S^{OCT} + \sigma_3 \delta^{OCT}, & \text{если линии (АБН)} \end{cases} \quad (2)$$

где  $S^{OCT}$ ,  $\delta^{OCT}$  - характеристики остаточной прочности.

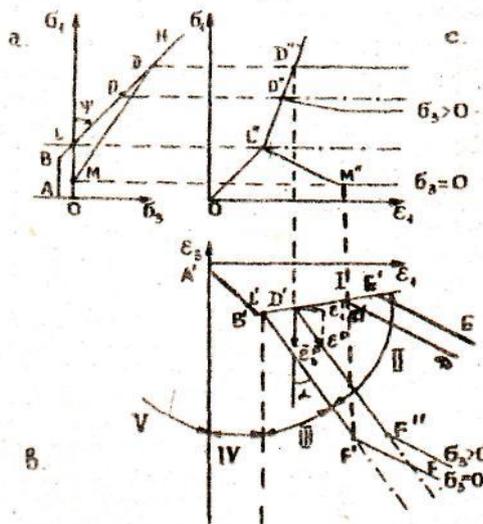


Рис.1. Комплекс графиков, характеризующих модели упругопластической разрыхляющейся среды и среды с разупрочнением с переменным законом течения

Пластическое течение характеризуется параметром  $\lambda = \text{ctg } \alpha$  (рис. 1в). При  $\lambda = 1$  в условиях плоской деформации объем элемента среды в ходе пластического течения будет постоянным, а при значении  $\lambda > 1$  течение будет характеризоваться разрыхлением. В частном случае, когда  $\alpha = \phi$  ( $\lambda = \text{ctg } \phi$ ), разработанная модель соответствует ассоциированному закону течения. В результате проведенных исследований в моделях установлены 5 характерных зон: зона упругости I; зона пластического течения II; зоны одноосного и двухосного разрушения III – V (рис.1в). Причем, для модели разупрочняющейся и разрыхляющейся среды в зоне II, на участках снижения прочности происходит разрыхление, а в области остаточной прочности необратимая составляющая изменения объема остается постоянной. В целом значения напряжений в выделенных зонах определяется использованием семейств линеаризованных графиков зависимостей:

$$\sigma_0 = f(\varepsilon_1, \varepsilon_3), \quad (3)$$

$$\sigma_1 = f(\varepsilon_1, \sigma_3),$$

Законы состояния горных пород для разупрочняющейся среды определяются путем испытания образцов на жестком прессе, в результате чего можно получить табличные данные. В работе предложен возможный способ задания для компьютерной технологии табличных данных состояния горной породы, для которой подбор аппроксимирующей функции оказывается затруднительным. При этом, в случае, когда значения  $\sigma_3^i$  и  $\sigma_1^i$

соответствующие произвольной комбинации  $\varepsilon_3^i$  и  $\varepsilon_1^i$ , не совпадают с табличными данными, используется интерполяционная формула;

$$Z(\varepsilon_1^i, \varepsilon_3^i) = \alpha_{\sigma_3} + \beta_{\sigma_3} \varepsilon_1^i + \tau_{\sigma_3} \gamma \varepsilon_1^i + \eta_{\sigma_3} \varepsilon_1^i \varepsilon_3^i \quad (4),$$

$$Z(\varepsilon_1^i, \varepsilon_3^i) = \alpha_{\sigma_1} + \beta_{\sigma_1} \varepsilon_1^i + \gamma_{\sigma_1} \varepsilon_1^i + \eta_{\sigma_1} \varepsilon_1^i \varepsilon_3^i$$

где  $\alpha, \beta, \gamma, \eta$  с соответствующими индексами  $\sigma$  и  $\sigma$  параметры линеаризации.

На рис. 2 приведен комплекс графиков, характеризующих модель упруго пластической упрочняющейся среды

$$\tau = \frac{\gamma G \tau_{np} A}{\tau_{np} + \gamma G^* A} \quad (5),$$

где  $G$  - модуль сдвига,  $A$  - параметр, определяемый по эксперименту.

В геомеханических задачах существенное влияние на прочностные и деформационные свойства оказывают трещиноватость массива, а также характеристики контакта, по которым могут развиваться сдвиги. Нами построена и обоснована модель трещиноватой среды на основе результатов экспериментальных исследований. При этом механические характеристики (сцепление и угол внутреннего трения) аппроксимируются функциями, зависящими от мер сдвига  $h$ :

$$C(h) = C_0 + (C_H - C_0)e^{-nh} \quad (6),$$

$$\varphi(h) = \varphi_0 + (\varphi_H - \varphi_0)e^{-nh}$$

Где  $C$ -сцепления и  $\varphi$  - угол внутреннего трения,  $n$ - экспериментальный параметр. Тогда предельные значения величины контакта

$$\tau_{ПП}^k = C(h) + \sigma \text{ctg}(\varphi(h)) \quad (7)$$

Главным моментом при решении практических задач геомеханики является оценка устойчивости обнажений породного массива. В работе обоснован критерий, позволяющий оценить устойчивость (открытых, подземных или их комбинации) горных выработок. Сущность предложенного критерия заключается в том, что первоначально с помощью выделенных, на моделях, характерных зон (предельного состояния, разупрочнения, полного

разрушения) определяется размеры и формы области неупругих деформаций. Затем в каждом элементе, выделенной области массива, в ходе решения задачи строятся изолинии  $\omega = \tau_{\beta}^n - \tau_{\beta}$  (8), где индекс  $\beta$  означает угол между нормалью N к площадке и направлением напряжений  $\sigma_1$ ;  $\tau_{\beta}^n$  - предельные касательные напряжения на площадке, определяемые по паспорту прочности;  $\tau_{\beta}$  - расчетные значения касательного напряжения полученные при решении нелинейной задачи. После этого на изолинии минимальной величины  $\omega$  определяем коэффициент устойчивости:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^m \{ \operatorname{tg} \varphi_i [\sigma_{1i} (1 + \sin \varphi_i) + \sigma_{3i} (1 - \sin \varphi_i)] + 2 C_i \}}{\sum_{i=1}^m (\sigma_{1i} - \sigma_{3i}) \cos \varphi_i} \quad (9),$$

где m- количество элементов через которые проходит линия с минимальным значением  $\omega$ ;  $C_i, \varphi_i$ - расчетные характеристики сцепления и угла внутреннего трения  $i$ - разновидности пород.

Считается, что, если значение  $K > 1$ , состояние равновесия устойчиво, в противоположных случаях, т.е. когда ( $K \leq 1$ )- неустойчиво.

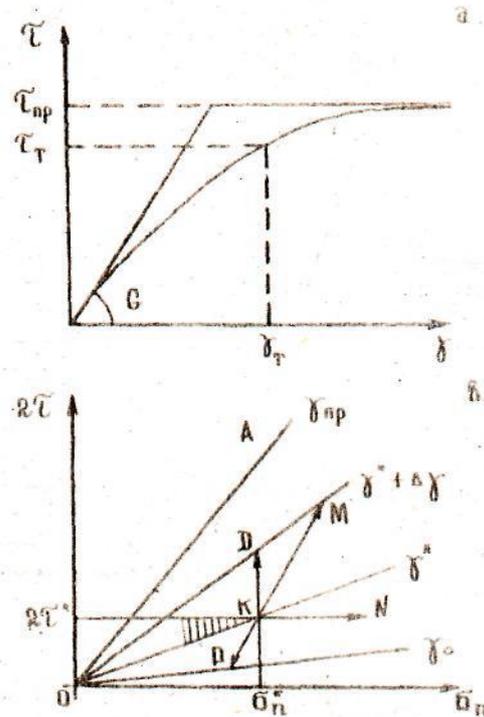


Рис.2. Комплекс графиков, характеризующих модели среды с упрочнением

Нами предложенные модели реализованы в виде численных процедур для случаев плоской деформации в деформационном варианте теории пластичности и теории пластического течения. С практической точки зрения для численной реализации моделей наиболее удобен метод конечных элементов.

Основная процедура метода конечных элементов рассматривает среду как упругую и сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных перемещений  $\{u\}$ :

$$\{F\} = [K]\{u\}, \quad (10),$$

где  $[K]$  - матрица жесткости системы;  $\{F\}$  - вектор узловых сил.

Поскольку исследование напряженно - деформированного состояния породного массива с учетом предельной деформируемости представляет собой нелинейную задачу, в работе подробно анализированы известные методы получения нелинейных решений. В результате исследований показаны достоинства и универсальность процедуры варьируемой жесткостью (когда  $K$ -переменная), метода начальных напряжений ( $F$ -переменная) и получены новые разработки в области комбинированной процедуры применительно к общему случаю, когда закон состояния среды задается в виде  $I - V$  (рис.1,2).

Для случая комбинированной разработки полезных ископаемых расчет устойчивости породного массива вблизи обнажений выработок, для случая поэтапной отработки открытых и подземных выработок, реализованы в виде единой программы на персональном компьютере. Отладка программы, проверка качества конечно-элементной сетки и обобщенной геомеханической модели породного массива осуществлены решением тестовых задач, имеющих аналитические решения.

С целью проверки работоспособности программы в случае комбинированной разработки месторождений полезных ископаемых получена серия решений с последовательно изменяемыми контурами на одной и той же сетке конечно - элементной модели (рисунок 3).

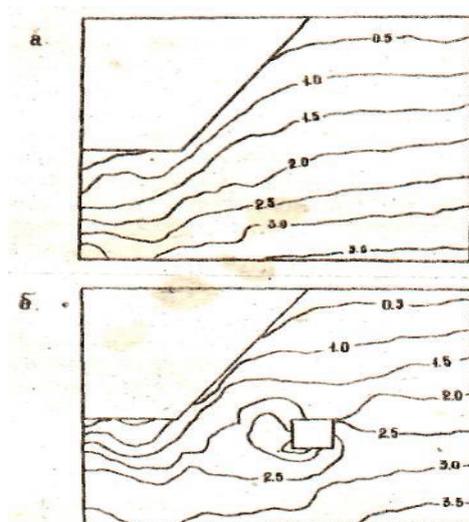


Рис.3. Изолинии напряжений для прибортового массива:  
а) неподроботонного, б) подроботанного

### Использованная литература

1. Абдылдаев Э.К. Оценка напряженно- деформированного состояния откосов и реализация расчетных моделей сред методом конечных элементов, Сборник «Маркшейдерское дело в социалистических странах» Том 11, – Л., 1988.
2. Абдылдаев Э.К. Анализ устойчивости северного борта карьера «Макмал», «Вестник ИГУ» №2, Каракол, 1999.
3. Абдылдаев Э.К. Методика оценки устойчивости породного массива вблизи выработок, Вестник Казахского национального технического университета им. К.И.Сатпаева, – Алматы, 2006.
4. Чунуев И.К., Айтматов И.Т. и др. Оценка напряженно-деформированного состояния массивов пород (НДСМ) нагорных карьеров. В сборнике "Вопросы геомеханики и разработки месторождений полезных ископаемых". – Бишкек, ИЛИМ, 1997.