

## **ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕОСРЕДЫ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ**

### ***Анвар Исмагилови Чанышев***

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, заместитель директора по науке, тел. (383)335-97-50; Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, Каменская, 52, профессор, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

### ***Ольга Евгеньевна Белоусова***

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)335-97-50, e-mail: o.e.belousova@mail.ru

### ***Ольга Анваровна Лукьяшко***

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, инженер, тел. (383)335-97-50, e-mail: lykola@yandex.ru

Для деформируемых сред (первоначально изотропных и первоначально анизотропных) вводится блочная модель, в которой основными элементами деформации являются простые удлинения и простые сдвиги. Для первоначально изотропных сред модель со структурой возникает в момент приложения нагрузок, далее она существует и изменяется в соответствии с изменяющимися главными осями тензора напряжений. На основе этой модели строятся определяющие соотношения поведения геосреды в упругости, в пластичности, при разрушении. Параметры определяющих соотношений восстанавливаются посредством обработки данных известных экспериментов. Показывается, что в окрестности выработок при нагружении происходят и простые сдвиги, и простые удлинения. Однако в отдаленных точках осуществляются только простые удлинения. В рамках указанных представлений дается интерпретация образования эффекта зональной дезинтеграции массива пород вокруг выработок.

**Ключевые слова:** блочная модель, определяющие соотношения, упругость, пластичность, разрушение, простое удлинение, простой сдвиг.

## **PHENOMENOLOGICAL GEOMEDIUM MODEL AND ITS APPLICATIONS**

### ***Anvar I. Chanyshev***

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Deputy Director for Science, tel. (383)335-97-50, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

### ***Olga E. Belousova***

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., tel. (383)335-97-50, e-mail: belousova\_o@ngs.ru

### ***Olga A. Luk'yashko***

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Engineer, tel. (383)335-97-50, e-mail: lykola@yandex.ru

The block model is introduced for deformed media being initially isotropic and initially anisotropic. The basic strain elements of the block model are simple extensions (stretchings) and pure shears. For initially isotropic media the structured model arises at the load-application moment. Hereupon it exists and alters according to variations in main axes of stress tensor. This model serves the basis for construction of constitutive relationships of geomedium behavior in elasticity, plasticity, and failure conditions. Parameters of constitutive relationships are recovered by processing of the earlier experimental data. It is justified that loads in periphery of mine workings result in simple shears and simple extensions. However exclusively simple extensions tend to develop in remote spots. The effect of zonal disintegration of a rock mass around mine workings is interpreted within the frame of the above concept.

**Key words:** block model, constitutive relationships, elasticity, plasticity, simple extension, simple shear.

Традиционно в геомеханике горные пород рассматриваются как материалы, которые в упругости ведут себя как металлы с двумя константами упругости -  $E$  и  $\nu$ , в пластичности считается, что для них, в отличие от металлов, не выполняется ассоциированный закон течения, когда вектор приращений пластических деформаций не ортогонален к поверхности нагружения (направлен не по градиенту к указанной поверхности). Вместе с тем в механике деформируемого твердого тела все чаще [1] делаются выводы, что практически все материалы, включая металлы, не подчиняются при упругом деформировании обычному закону Гука, то есть двумя константами их поведение в упругости не описать. Виной являются разные значения модулей Юнга и коэффициента Пуассона при растяжении и сжатии, что подталкивает исследователей к созданию нового закона Гука, который эти различия мог бы учесть. На этом пути появились и продолжают образовываться новые определяющие соотношения упругости, так называемой разномодульной теории упругости, некоторые из вариантов которой представлены в [2].

Понятно, что этот вопрос находится в неразрывной связи с построением теории пластичности горных пород потому, что сумма пластических и упругих деформаций составляет общую или полную деформацию, которую регистрируют в экспериментах. Если неправильно вычисляется упругая деформация, то такой же результат имеем и для пластических деформаций и, в конечном счете, и для теории пластического деформирования горных пород. Это факт означает еще и то, что возможно для «правильных» теорий пластических деформаций выполняется ассоциированный закон течения (если были правильно вычислены упругие деформации), который во многих работах отрицается.

Необходимо еще добавить, что от того, какой теорией (правильной или неправильной) пользоваться, зависит безопасная работа шахты и рудников, эффективная добыча полезных ископаемых.

Предлагается модель первоначально изотропной среды горной породы при упругом, упругопластическом и запредельном деформировании как обобщение модели поведения металлических материалов при плоской деформации С.А. Христиановича и Е.И. Шемякина, соответствующей состоянию неполной пластичности [3]. Представим, что имеется тензор напряжений  $T_\sigma$ , у которого главные оси обозначены как 1,2,3 и нумерация осей выбрана так, что  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ . В направлении оси «2»

предполагается, что связь упругая и то, что происходит вдоль этой оси (напряжения, деформация и их изменения), никак не влияет на то, что происходит в плоскости 1, 3.

На рис. 1 изображен элемент среды в плоскости, проходящей через оси 1,3. К этому элементу, «вырезанному» площадками действия максимальных касательных напряжений, приложены нормальные напряжения  $\sigma_n = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ , касательные  $\tau_n = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ . На рис. 1б показано действие и результат действия максимальных касательных напряжений, то есть происходят подвижки одних частиц элемента среды относительно других. При этом, как видно из рис. 1б объем при сдвигах не увеличивается, вдоль направления действия усилий  $\sigma_n$  происходит упругое изменение деформации  $\varepsilon_n$ .

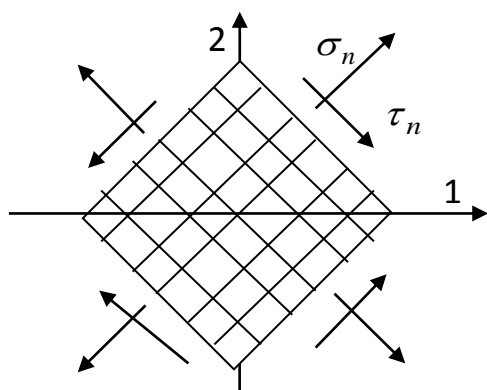


Рис. 1а. Элемент металлического материала в плоскости 1,3

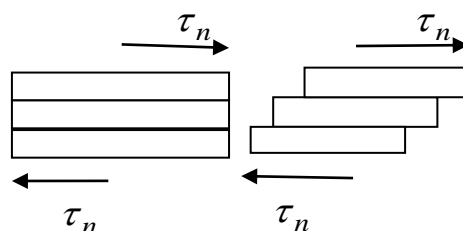


Рис. 1б. Сдвиги вдоль площадок действия максимального касательного напряжения

Расширим картину деформирования на рис. 1б введением «зубчатой» структуры, которая может привести к эффекту дилатансии. Эта ситуация представлена на рис. 2а. Здесь структура элемента среды наделяется возможными плоскостями скольжений, наклоненными к оси абсцисс под разными углами  $\alpha$ ,  $\beta$ . Понятно то, что поскольку речь идет о первоначально изотропной среде, где сдвиг в ту или другую сторону должен быть идентичным, то отсюда следует, что  $\alpha = \beta$ . Далее из рис. 2б видно, что при сдвиге образуется эффект дилатансии (положительный). Обратимся снова к рис. 2а, рис. 1а. Видно, что здесь существует конус с раствором угла при вершине  $2\alpha$ , при попадании силой внутрь которого никаких подвижек одних частей элемента среды относительно других быть не должно. Сдвиги появятся, если проекция силы  $\vec{p}_n = \vec{\tau}_n + \vec{\sigma}_n$  на направление  $\vec{l}$  будет положительной (рис. 2а). Отметим, что векторы  $\vec{p}_n = \vec{\tau}_n + \vec{\sigma}_n$  и  $\vec{q}_n = \vec{\gamma}_n + \vec{\varepsilon}_n$  ( $\vec{q}_n$  - вектор деформации) – это феноменологические векторы по сути, рассматриваются на равно наклонных к осям 1,3 площадках (рис. 1а).

Для описания движения (на рис. 2б) проектируем их на направление  $\vec{l}$  (направление сдвига) и направление  $\vec{m}$  (перпендикулярно плоскости скольжения). Когда вектор  $\vec{p}_n$  будет направлен внутрь конуса, образованного нормальными к плоскости скольжения на рис. 2а, то в этом случае предполагается, что векторы  $\vec{p}_n$  и  $\vec{q}_n$  пропорциональны – в направлении этих векторов происходит простое удлинение по схеме рис.3а с модулем жесткости  $2k$ :

$$\vec{q}_n = \vec{p}_n / 2k. \quad (1)$$

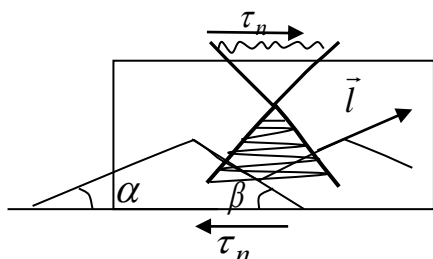


Рис. 2а. Усложненная структура элемента среды

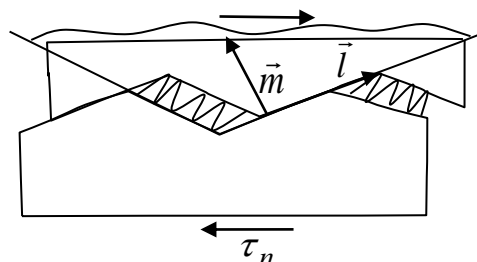


Рис. 2б. Положительный эффект дилатансии

Далее, если вектор  $\vec{p}_n$  имеет на направление  $\vec{l}$  (рис. 2) положительную проекцию, то  $\vec{p}_n$  представляется суммой двух векторов:

$$\vec{p}_n = \vec{p}_l + \vec{p}_m. \quad (2)$$

Аналогично раскладывается соответствующий вектор  $\vec{q}_n$ :

$$\vec{q}_n = \vec{q}_l + \vec{q}_m. \quad (3)$$

Для направления  $\vec{l}$  предполагается, что

$$\vec{q}_l = \vec{p}_l / 2\mu \quad (4)$$

в случае упругости или

$$\vec{q}_l = \vec{p}_l / 2\mu_c, \quad (5)$$

в случае пластичности, где  $2\mu_c$  - секущий модуль на диаграмме деформирования  $|\vec{p}_l| = |\vec{p}_l|(|\vec{q}_l|)$ . Для направления  $\vec{m}$  имеем зависимость, аналогичную (1):

$$\vec{q}_m = \vec{p}_m / 2k. \quad (6)$$

Если проекция  $\vec{p}_n$  на направление  $\vec{m}$  на рис. 2б окажется положительной (вектор  $\vec{p}_n$  на рис. 2а будет направлен во внутрь конуса, то этом случае возможны чередования скольжений в направлении  $\vec{l}$  (как указано на рис. 2б) и в другом противоположном направлении, определяемом углом  $\beta$  ( $\beta = \alpha$ ) на рис. 2а. Сумма этих скольжений определяется суммарным вектором деформаций  $\vec{q}_n$ , который будет связан с полным вектором напряжений  $\vec{p}_n$  зависимостью

$$\vec{q}_n = \vec{p}_n / 2\mu \quad (7)$$

(в случае упругости).

Результатом этих гипотез являются представленная на рис. 4 картина деформирования, на которой изображены три области деформирования – область I, в которой происходит один вид деформирования – простое удлинение в соответствии с (1); об-

ласть II, в которой происходят сдвиги в направлении  $\bar{l}$  и простые удлинения в направлении  $\bar{m}$  (формулы (2)-(6)); область III, в которой имеют место только простые сдвиги по формуле (7).

Эти соотношения (1)-(7) могут быть применены к задаче об определении напряженно-деформированного состояния массива пород вокруг выработки. Решение показывает, что в этом случае вокруг выработки реализуются два режима деформирования на рис. 4. В ближней зоне к контуру выработки происходят простые сдвиги и простые удлинения по схеме рис. 3, рис. 2, в дальней зоне – только простые удлинения (что соответствует области I рис. 4). С ростом нагрузки на бесконечности деформации сдвига по схеме рис. 2 вблизи контура выработки возрастают, переходят в пластическую зону. Далее наступает ситуация, когда «трещины» на рис. 2б раскроются максимально, и в условиях сжимающей нагрузки  $\sigma_n$  части тела на рис. 2 по-прежнему остаются в связанном состоянии, происходит переход из положения раскрытия «трещин» в состояние их закрытия. Таким образом в окрестности выработки реализуются области с раскрытыми трещинами и закрытыми. Это явление в [4] называется явлением зональной дезинтеграции массива горных пород. Отметим, что кривые  $\sigma_l = \sigma_l(\varepsilon_l)$ ,  $\sigma_m = \sigma_m(\varepsilon_m)$  и угол  $\alpha$  – это то, что находится на основе экспериментальных данных, например, [5].

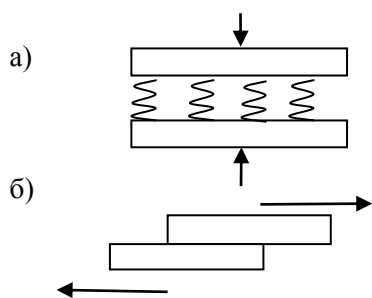


Рис. 3. Простое удлинение и простой сдвиг

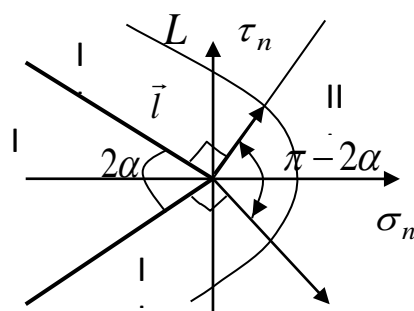


Рис. 4. Три области деформирования горных пород

Вывод.

Построена механическая и математическая модели поведения горных пород при сдвиге.

Решена задача о деформировании массива пород вокруг выработки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цвелодуб И.Ю. О разномодульной теории упругости // Прикладная механика и техническая физика. - 2008. – Т.49. - №1(287). – С.157-164.
2. Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости. - М.: Наука. - 1982. – 320с.
3. Христианович С.А., Шемякин Е.И. О плоской деформации пластического материала при сложном нагружении // Известия Российской академии наук. - Механика твердого тела. - 1969. - № 5. - С. 138.
4. Открытие № 400 СССР. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок / Е. И. Шемякин, М. В. Курленя, В. Н. Опарин, В. Н. Рева, Ф. П. Глушихин, М. А. Розенбаум. - Опубликовано в В.Б.И. – 1992. - № 1.
5. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. - СПб.: Наука. - 2001. - 343с.

© А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова, О. А. Лукьяшко, 2017