

УДК 622.02:539.4

**В.И. Мирошников, И.Ю. Рассказов**

## **О ДЕФОРМАЦИОННОМ КРИТЕРИИ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД\***

*Проведено сравнение характеристик моделей прочности, основанных на критериях Кулона-Мора, Губера-Мизеса-Шлейхера и деформационного для неравнокомпонентных напряженных состояний. Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы для построения численных моделей разрушения горных пород, учитывающих изменение структуры материала и ее пространственную ориентированность.*

*Ключевые слова: горное давление, математические модели, прочность горных пород, предельные деформации образцов горных пород.*

**Семинар № 4**

### **V.I. Miroshnikov, I.Yu. Rasskazov ABOUT DEFORMATION CRITERIA OF STRENGTH OF THE ROCKS**

*Comparison of characteristics of strength models based on criteria of Coulomb-Mohr, Huber-Mises-Schleicher and deformation for 3D at High Rates of Strain is executed. The results received in the given work, can be used for simulation numerical models of fracture of the rocks which are taking into account change of structure of a material and its spatial orientation.*

*Key words: rock pressure, mathematical models, rock strength, critical strain of rock samples.*

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-05-00533-а).

**П**ри решении различных вопросов управления горным давлением при подземной разработке месторождений полезных ископаемых большое значение имеют адекватные математические модели, описывающие процесс разрушения массива горных пород и горных конструкций, который, как известно, протекает в несколько стадий [1].

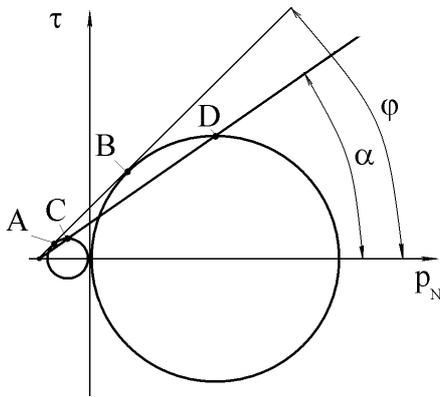
В теории необратимых процессов деформирования (пластичности и раз-

рушения) горных пород в настоящее время наибольшее распространение получили два направления [2]. Первое условно назовем гипотезой максимального касательного напряжения, инициированной в работах Треска, Сен-Венана, Прандтля (и Мизеса). Применительно к горным породам это направление осуществляется на основе критерия Кулона-Мора. Второе направление, условно названное гипотезой максимальной интенсивности сдвиговых напряжений, известной так же как гипотеза удельной потенциальной энергии формоизменения, берет начало в работах Губера и Мизеса, и было обобщено Шлейхером на геоматериалы [3-5].

В качестве паспорта прочности горных пород принята наиболее простая наглядная форма Кулона-Мора [6-7] (рис. 1).

Однако ей в силу простоты присущи определенные недостатки, в частности:

– предположение Мора о предельной огибающей кругов Мора не оставляет возможности учесть влияние среднего главного компонента напряжений, так как его круг никогда не касается предельной кривой. А такое влияние признается многими авторами [8, 9];



А-В – огибающая; С-Д – линия предельных состояний

– характерные точки С и D (соответствуют пределам растяжения и сжатия) не лежат на огибающей. Условие неразрушения на наш взгляд вернее было бы сформулировать без привлечения огибающей, как:

$$\max(|\tau_j^i|) < \tau_{K-M}^{np}(p_N), \quad (1)$$

где  $\tau_{K-M}^{np}(p_N)$  – уравнение линии С-Д, проходящей через характерные точки;  $p_N$  – нормальный компонент к площадке максимального касательного напряжения;

– гипотеза о том, что плоскость разрушения образцов связана с наклоном огибающей А-В (с углом  $\varphi$ , см. рис. 1.) так же не имеет экспериментального подтверждения [5];

– нарушается гладкость функций в точках равенства двух компонент (диаграммы предельных кривых в пространстве напряжений имеют вид многоугольников). Это противоречит гипотезе непрерывности;

– диаграмма трудно поддается расширению с целью учета влияний других (структурных) параметров.

Зависимость от третьего компонента напряжений учитывается переходом к форме Мизеса – Шлейхера:

$$\tau_{in} < \tau_{M-III}^{np}(\mathbf{\hat{p}}), \quad (2)$$

Рис. 1. Паспорт прочности горных пород

где  $\tau_{M-III}^{np}(\mathbf{\hat{p}})$  – зависимость предельной интенсивности напряжений сдвига от среднего напряжения;

$$\mathbf{\hat{p}} = tr(\overset{\circ}{p}) = \frac{1}{3}(p_1^1 + p_2^2 + p_3^3) \quad \text{– среднее}$$

напряжение сжатия (гидростатическое давление), мы используем тензоры сжимающих напряжений, которые обозначаем символом  $\overset{\circ}{p}$  [10], вместо обще-

принятых растягивающих  $\overset{\circ}{\sigma} = -\overset{\circ}{p}$ ;

$$\tau_{in} = \sqrt{\overset{\circ}{\tau} \cdot \overset{\circ}{\tau}} = \sqrt{\tau_j^i \tau_i^j} \quad \text{– интенсивность девиатора напряжений.}$$

Численная разница между этими формами небольшая, однако которая из них верней – экспериментально не установлено [5]. Вопрос заключается даже не в точности, сколько в адекватности описания процессов. Кроме того, обе формы не учитывают зависимость процессов разрушения от времени. Выбор в пользу напряжения сделан только в связи с тем, что это более удобный и легко определяемый параметр.

Преимущества деформационного подхода, в том что в обратимых упругих процессах аффинор преобразования  $\overset{\circ}{E}$  (тензор эpsilon), тензор деформаций  $\overset{\circ}{\varepsilon}$  и тензор напряжений  $\overset{\circ}{p}$  являются величинами (множествами) однозначными соответствующими друг другу (изоморфными). Здесь аффинор движения – тензор второго ранга

$$\frac{d\vec{r}}{d\vec{x}} = \overset{\circ}{E} \cdot \overset{\circ}{\Omega}, \quad \text{где } d\vec{r}, d\vec{x} \quad \text{– пространствен-}$$

ные и материальные переменные (координаты векторов), в общем случае несимметрический, представлен в виде полярного разложения на симметрический

левый тензор искажений  $\overset{\circ}{E}$  (аффинор или мера деформации) и тензор (оператор) вращения  $\overset{\circ}{\Omega}$ .

**Рис. 2. Изображение аффиноров деформирования элемента горной породы**



Вращения в настоящей работе рассматривать не будем. Аффинор деформации имеет разложение на сдвиговую и объемную составляющие  $\overset{\circ}{E} = \overset{\circ}{\Lambda} \cdot \overset{\circ}{E}_V$ ,  $\overset{\circ}{E}_V = \overset{\circ}{K} \overset{\circ}{I}$ ,

где  $\overset{\circ}{E}_V = \overset{\circ}{K} \overset{\circ}{I}$  – шаровой тензор,

$\overset{\circ}{K} = \det(\overset{\circ}{E})^{1/3}$  – средне объемная линейная деформация. Аффинор деформации имеет то преимущество перед классическими тензорами деформации, что любой тензор всегда имеет разложение в виде некоммутативного произведения тензоров, при этом тензоры могут быть несоосными в общем случае [10]. Тензор полных деформаций истинный  $\overset{\circ}{\varepsilon} = \ln(\overset{\circ}{E})$  или условный  $\overset{\circ}{\varepsilon} = (\overset{\circ}{E} - \overset{\circ}{I})$ ,

где  $\overset{\circ}{I}$  – единичный тензор. Мы будем использовать первый, так как логарифмирование произведения дает разложение на сдвиговое и объемное слагаемые  $\overset{\circ}{\varepsilon} = \overset{\circ}{\lambda} + \overset{\circ}{K} \overset{\circ}{I}$ .

Полные деформации подчиняются условиям совместности и имеют составляющие упругие и необратимые. Накопление дефектов приводит к необратимому деформированию материала горных пород (дилатансии). Эти деформации называют остаточными. Для того чтобы сопоставлять влияние на прочностные свойства материалов процессов как обратимых, так и необратимых, необходимо производить оценки при помощи одинаковых физических величин (критериев), какими являются деформации. Строго говоря остаточных напряжений не существует (когда говорят, что в теле есть остаточные напряжения, – это надо понимать как напряжения,

вызванные несовместными остаточными упругими деформациями). Наличие остаточных деформаций не является достаточным условием существования остаточных напряжений. Деформации должны быть несовместными. Если полные деформации являются полностью необратимыми, то упругой составляющей нет и напряжения равны нулю.

Необратимые деформации в отличие от обратимых процессов протекают во времени гораздо медленнее (среер – мм в год). При наличии необратимых остаточных явлений одному значению напряжений соответствуют два состояния в докритической и закритической областях. В этом случае предпочтительней являются деформационный параметр, т.к. в деформациях можно выделить различные составляющие: упругую, пластическую и трещиновато пористую (хрупкую) [11]. Это несложно сделать, так как любому тензору напряжений соответствует тензор упругих деформаций.

В настоящей работе мы хотим показать, что деформационные критерии прочности по информативности сопоставимы с критерием Кулона Мора, и более достоверно могут отображать процесс разрушения. В качестве примера представим модель, изображенную на рис. 2. Зададим предельную деформацию как максимальное допустимое растяжение по любому направлению. В изотропных материалах все направления равнозначны, в анизотропных различие в направлениях определяется тензором  $\overset{\circ}{\Lambda}$ .

На рис. 2, в плоскости  $X_1, X_3$ , в которой лежат два главных компонента аффинора деформации, показаны три эллипсоида деформирования элемента твердого тела (горной породы).

1. Начальная недеформированная сфера единичного радиуса  $|\vec{x}|=1$ . Образ тензора  $\vec{r} = \overset{\circ}{I} \cdot \vec{x}$ .

2. Эллипсоид  $\overset{\circ}{E}$  деформированного элемента тела  $\vec{r} = \overset{\circ}{E} \cdot \vec{x}$ ,  $\overset{\circ}{E}$  – симметрический тензор.

3. Эллипсоид предельного растяжения  $\overset{\circ}{\Delta}$ , для случая анизотропной (различной по направлениям) прочности, задаваемой главными удлинениями.

В процессе деформирования, даже при всесторонне сжимающих напряжениях, могут проявляться поперечные деформации расширения. При достижении элементом тела предельного удлинения тензор (эллипсоид)  $\overset{\circ}{E}$  касается тензора (эллипсоида)  $\overset{\circ}{\Delta}$  хотя бы в одной точке. По другим направлениям удлинения могут быть любыми. Если эллипсоид расширения элемента касается эллипсоида предельного растяжения, в нашем примере на рис. 2 в точке  $K$ , то по ортогональной этому направлению плоскости  $Z$  происходит образование щели (отрыв). Если тензоры  $\overset{\circ}{E}$  и  $\overset{\circ}{\Delta}$  соосны или тензор  $\overset{\circ}{\Delta}$  изотропный (сферический), то точка  $K$  лежит на главном векторе аффинора  $\overset{\circ}{E}_1$ . Если касание происходит не в одной точке, то поверхность отрыва ориентирована случайно. Предельное растяжение зависит от температуры (или энтропии) и от структурных параметров.

Разность симметрических тензоров  $\left( \overset{\circ}{\Delta} - \overset{\circ}{E} \right)$  – есть симметрический тензор. В момент касания такой тензор окажется вырожденным. Его образ будет ле-

жать в плоскости отрыва. Собственные числа (главные компоненты) тензора одно или два будут нулевыми, а определитель

$$\det \left( \overset{\circ}{\Delta} - \overset{\circ}{E} \right) = 0. \quad (3)$$

В приведенном ниже примере, в котором тензор  $\overset{\circ}{E}$  приведен к главным осям  $\overset{\circ}{E} = \text{diag}(E_1, E_2, E_3)$ , проведено сопоставление тензора напряжений предельно деформированного состояния элемента горной породы, задаваемого тензором предельных удлинений, с условиями Мизеса-Шлейхтера и Кулона-Мора. Множество предельных состояний зададим шаровым тензором (изотропное тело). Отношение  $G/K = 0,5$ . Обозначим предельное линейное удлинение  $\Delta_{np}$ ,  $\overset{\circ}{\Delta} = \Delta_{np} \overset{\circ}{I}$ . Хрупкое разрушение отрывом наступает, если  $\max(E_1, E_2, E_3) = \Delta_{np}$ .

Возможно, что  $\Delta_{np}$  зависит от всех значений  $E_i$ , но в первом приближении этой зависимостью можно пренебречь. Влияние этих компонент необходимо устанавливать эмпирическим путем.

Преобразуем ограничения по деформациям (4) в ограничения по напряжениям. Тензор напряжений имеет компоненты  $\overset{\circ}{p} = \text{diag}(p_1, p_2, p_3)$ .

Разложим тензор напряжений на сферическую и сдвиговую составляющие  $\overset{\circ}{p} = \overset{\circ}{p} \cdot \overset{\circ}{I} + \overset{\circ}{\tau}$ .

Среднее напряжение (гидростатическое давление)

$$\overset{\circ}{p} = -K \ln(V_D/V_0) = -K \ln \left( \det \left( \overset{\circ}{E} \right) \right) = -K \ln(E_1 E_2 E_3) = -K \varepsilon_v. \quad (5)$$

Девiator напряжений

$$\overset{\circ}{\tau} = -2G \overset{\circ}{\lambda}. \quad (6)$$

Компоненты девиатора тензора натуральной деформации  $\overset{\circ}{\lambda}$  имеют вид [10]:

$$\dot{\lambda} = \text{diag}(\ln(E_1/\bar{E}), \ln(E_2/\bar{E}), \ln(E_3/\bar{E})) \cdot (7)$$

В асимметричном случае количество переменных уменьшается до одного. Пусть  $E_1$  – осевой компонент, а радиальные компоненты  $E_2 = E_3$ . Тогда:

$$\dot{\lambda} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3} \end{bmatrix} \ln(E_1/E_3) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \ln(E_1/E_3) \quad (8)$$

максимальные касательные напряжения

$$\tau_m = |\tau_3 - \tau_1| = 2G |\ln(E_1/E_3)|, \quad (9)$$

интенсивность касательных напряжений

$$\tau_m = \sqrt{\tau \cdot \tau} = 2G \sqrt{\frac{2}{3}} |\ln(E_1/E_3)|, \quad (10)$$

(выражения (9) и (10) не зависят от смены направления сдвиговых деформаций), а среднее напряжение  $\bar{\sigma} = -K \cdot \ln(E_1(E_3)^2)$ .

Тогда компоненты тензора напряжений:

$$\begin{cases} p_1 = -K \ln(E_1(E_3)^2) - \frac{4}{3} G \ln(E_1/E_3) \\ p_3 = -K \ln(E_1(E_3)^2) + \frac{2}{3} G \ln(E_1/E_3) \end{cases} \quad (11)$$

Рассмотрим два случая разных знаков  $\ln(E_1/E_3)$ .

Первый случай  $E_1 = \Delta_{np} > E_2 = E_3$  – одноосное растяжение или сжатие образца с осевым напряжением  $p_1$  и равномерным боковым давлением  $p_3$ , *большим* осевого напряжения.

В этих условиях две характерные точки: первая точка, испытание образца на растяжение, когда  $p_1 = -\sigma_{pc} < 0$  и  $p_2 = p_3 = 0$  – разрыв образца осевым усилием,  $\sigma_{pc}$  – предельные напряжения растяжения; вторая точка,  $p_1 = 0$ ,  $p_2 = p_3 > 0$  – сжатие цилиндрического образца по поверхности без осевой на-

грузки (такие эксперименты с осевой нагрузкой меньшей боковой описаны в работе [12]).

Из условия  $p_3 = 0$  получаем  $K \cdot \ln(E_1 E_3^2) = \frac{2}{3} G \cdot \ln(E_1 E_3^{-1})$ . Тогда предельное напряжение разрыва происходит при соотношении  $(E_3)^{2+2G/3K} = (E_1)^{1-2G/3K}$ . (12)

Подставив  $E_1$  из (12) в выражение для  $p_1$  получим

$$\begin{cases} p_1 = -\sigma_{pc} = \begin{cases} -K \left[ 1 - \frac{6-4G/K}{6+2G/K} \right] - \\ -\frac{4}{3} G \left[ 1 + \frac{3-2G/K}{6+2G/K} \right] \end{cases} \ln(\Delta_{np}) < 0 \\ p_3 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

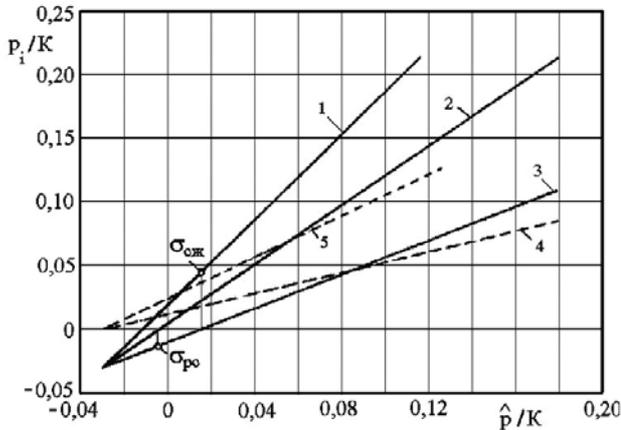
при среднем напряжении

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}(E_3) &= -K * \ln(\Delta_{np} (E_3)^2) = \\ &= -K \left[ 1 - 2 \frac{(3-2G/K)}{(6+2G/K)} \right] \ln(\Delta_{np}) \end{aligned}$$

Вторую точку можно получить из условия  $p_1 = 0$  аналогично:

$$\begin{cases} p_1 = 0 \\ p_3 = -\sigma_{pc} = \begin{cases} K \left[ 1 - \frac{6-8G/K}{6-4G/K} \right] + \\ + \frac{2}{3} G \left[ 1 - \frac{3-4G/K}{6-4G/K} \right] \end{cases} \ln(\Delta_{np}) > 0 \end{cases}$$

Второй случай  $E_1 < E_2 = E_3 = \Delta_{np}$ ,  $p_1 > p_2 = p_3$  – одноосное растяжение или сжатие образца с осевым напряжением  $p_1$  и боковым равномерным давлением  $p_3$ , *меньшим* осевого напряжения. В этом случае зависимости так же две характерные точки: первая – когда  $p_1 = 0$  и  $p_2 = p_3 < 0$  – разрыв образца равномерным поверхностным растяжением; и вторая точка  $p_1 > 0$ ,  $p_2 = p_3 = 0$ . Первая точка чисто теоретический случай, так как не представляется возможным опытным путем растянуть образец ухватив за боковую поверхность, но при сложном поле на-



**Рис. 3. Зависимость компонент тензоров напряжений на предельной линии от среднего напряжения для разных знаков  $\ln(E_1/E_3)$ . Отношение  $G/K = 0,5$ : Линии 2 –  $p_1$ , 3 –  $p_2 = p_3$ , 4 –  $\tau_{in}$  – относятся к первому случаю (разрыв поперек оси). Линии 1 –  $p_2 = p_3$ , 3 –  $p_1$ , 5 –  $\tau_{in}$  – относятся ко второму случаю (раскол вдоль оси).**

пряжений такое состояние среды возможно в некоторой области тела. Вторая точка – классическое испытание стержневого образца на сжатие. Из условия  $p_3 = 0$ , подставив  $E_3$  из (12) в выражение для  $p_1$  получим

$$\begin{cases} p_1 = \sigma_{сж} = \left\{ \begin{array}{l} -K \left[ 2 - \frac{6+2G/K}{3-2G/K} \right] + \\ + \frac{4}{3}G \left[ 1 + \frac{6+2G/K}{3-2G/K} \right] \end{array} \right\} \ln(\Delta_{np}) \\ p_3 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

при среднем напряжении  $\hat{p}(E_1) = -K \cdot \ln(E_1(\Delta_{np})^2) =$

$$= -K \left[ 2 + \frac{6+2G/K}{3-2G/K} \right] \ln(\Delta_{np}) .$$

На рис. 3 показаны зависимости компонент напряжений (сплошные) и сдвиговые инварианты  $\tau_{in}$  (штриховые линии) в предельных состояниях от среднего напряжения. Переменная  $E_i = E_{min}$  на этих линиях менялась в пределах  $E_i \in \{0,9 \pm \Delta_{np} = 1,01\}$ .

Предельным для обоих случаев будет точка равномерного всестороннего растяжения  $E_1 = E_2 = E_3 = \Delta_{np}$ . В этой точке пересекутся линии 1, 2, 3. Это так же всего лишь теоретический случай.

Штриховые линии 4 и 5 – среднеквадратичный инвариант интенсивность касательных напряжений  $\tau_{in} < \tau_{M-III}^{np}(\hat{p})$ . Эти зависимости напоминают прямые Кулона-Мора. Существенное отличие от Кулоновских прямых в том, что эти зависимости разные для первого и второго случаев (т.е. зависят от трех компонент) и точки предельного напряжения при сжатии и растяжении лежат на разных линиях. Соответствующие зависимости Кулона-Мора для обоих случаев одинаковые (на рис. 3 не показаны). В тех случаях, когда все  $E_i$  разные, линии предельных состояний будут располагаться между соответствующими двумя случаями.

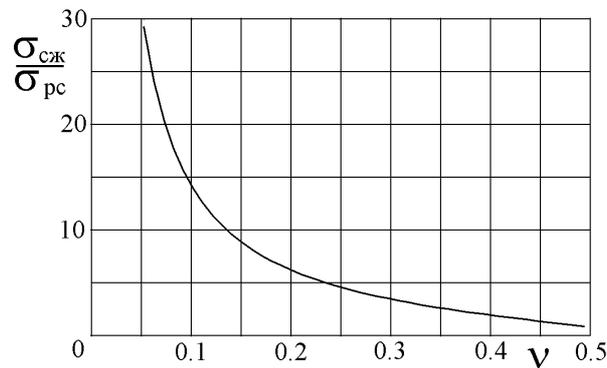
В этой работе была применена характеристика вида деформированного состояния в форме тензора (матрицы)

$$\overset{\circ}{\Lambda}(\alpha) = \text{diag}(1, -\alpha, \alpha - 1), \alpha \in 0 \div 1, \text{ в формуле (8). Эта форма является некоторым анна-логом параметра Надаи-Поде}$$

Поде  $N_L \cdot \overset{\circ}{\Lambda}(0)$  соответствует  $N_L = 0$ .

$\overset{\circ}{\Lambda}(0,5)$  соответствует  $N_L = 1$ . Отрицательным значениям  $N_L = -1$ , соответствуют отрицательные значения матрицы  $-\overset{\circ}{\Lambda}(0,5)$ . В отличие от параметра Надаи-Поде, изменение которого изменяет

**Рис. 4. Зависимость отношения предельных напряжений сжатия и растяжения от коэффициента Пуассона по деформационной теории прочности для  $\Delta_{пр} = 1,01$**



среднее значение тензора, предлагаемый параметр влияет только на сдвиговые компоненты и среднее значение от него не зависит.

Мы показали, что при сжатии образцов, когда наблюдается расширение в направлении по нормали к направлению сжатия, условие предельной деформации соответствует диаграмме по форме аналогичной диаграммам Кулона – Мора или Мизеса-Шлейхтера. Деформационное условие прочности задано только одним параметром  $\Delta_{пр}$ , и наклон линии зависит только от коэффициента Пуассона, в то время, как по формуле Кулона – Мора можно задавать разные углы наклона. В этом недостаток однопараметрического условия.

Отношение предельных напряжений сжатия и растяжения выразим из формул (13) и (14)

$$\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_{рс}} = \frac{-\left[2 - \frac{6+2G/K}{3-2G/K}\right] + \frac{4G}{3K} \left[1 + \frac{6+2G/K}{3-2G/K}\right]}{\left[1 - \frac{6-4G/K}{6+2G/K}\right] + \frac{4G}{3K} \left[1 + \frac{3-2G/K}{6+2G/K}\right]}, \quad (15)$$

и с учетом того, что  $\frac{G}{K} = \frac{3-6\nu}{2+2\nu}$ , зави-

симость этого отношения от коэффициента Пуассона  $\nu$  показана на рисунке 4. Как видно из рисунка это отношение перекрывает весь интервал эмпирических значений.

В заключении необходимо отметить, что разрушение весьма сложный процесс, и ограничиваться только одним параметром при его описании наверное недостаточно. Прочность материалов зависит, прежде всего, от наличия необратимых деформаций, о которых зачастую почти ничего не известно. Поэтому так важен анализ поля деформаций с разложением на простые составляющие и изменение его во времени в областях интенсивного проявления горного давления. Для повышения адекватности модельных представлений следует учитывать эмпирические данные по предельным деформациям образцов горных пород.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассказов И.Ю., Мирошников В.И. Прогнозирование опасных проявлений горного давления на основе трехстадийной модели разрушения горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: МГУ, 2007. - № 4. - С. 234-240.
2. Коврижных А.М. О жесткопластической модели деформирования и разрушения горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2003. - № 2. - С. 15-29.
3. Николаевский В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред. - М.: Недра, 1984.
4. Райс Дж. Механика очага землетрясения. - М.: Мир, 1982.
5. Поль Б. Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения // Разрушение. Т. 2: Математические основы теории разрушения / ред. Либовиц Г. - М.: Мир, 1975. - С. 336-520.

6. Протодьяконов М.М. Обобщенное уравнение огибающих к предельным кругам напряжений Мора // Исследование физико-механических свойств горных пород применительно к задачам управления горным давлением. - М.: Изд-во АН СССР, 1962.

7. Шемякин Е.И. О паспорте прочности горных пород // Измерение напряжений в массиве горных пород. Ч.1. - Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1974. - С. 9-20.

8. Шемякин Е.И. Две задачи механики горных пород, связанных с разработкой глубоких месторождений угля и руды // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 1975. - № 6. - С. 39-45.

9. Чирков С.Е. Зависимость прочности горных пород при сдвиге от вида напряженного состояния // Физическая мезомеханика. - 2007. - № 4. - С. 39-40.

10. Седов Л.И. Механика сплошной среды. - М.: Наука, 1970. - Т. 1. - 492 с., Т. 2. - 568 с.

11. Мирошников В.И. О разложении тензора деформации горных пород на упругие, вязко-пластические и хрупко-трещиноватые составляющие // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2007. - № 0В9. - С. 401-409.

12. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Пластичность горных пород. - М.: Недра, 1979. - 301 с. **ГИАБ**

### Коротко об авторах

Мирошников В.И. – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
Рассказов И.Ю. – доктор технических наук, директор,  
Институт горного дела ДВО РАН, [eco@igd.khv.ru](mailto:eco@igd.khv.ru)



РУКОПИСИ,

### ДЕПониРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

1. Петухов П.П. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БАЗЫ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ СРЕДЫ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ (694/07-09 — 13.04.09) 6 с.

Разработка методики формирования информационной базы оценки экономической эффективности инвестиционных проектов горнодобывающих предприятий с учетом неопределенности среды его реализации? Обеспечивающей возможность оценки, анализа и принятия инвестиционных решений в процессе комплексного управления его технико-экономическими показателями и эффективностью реализации.

Ключевые слова: специфика проектов горнодобывающих предприятий Экономическая эффективность в условиях неопределённости, Информационная база для экономической оценки, неопределённость среды реализации инвестиционного проекта, внешняя и внутренняя среда предприятия, сценарный подход.

*Petuhov P.P.* THE WORKING OUT OF THE TECHNIQUE OF FORMATION OF INFORMATION BASE OF THE ESTIMATION ECONOMIC EFFICIENCY OF CAPITAL INVESTMENT PROJECTS OF THE MINING ENTERPRISES IN THE CONDITIONS OF UNCERTAINTY OF ENVIRONMENT OF THEIR REALIZATION

The main problems of investing limit the inflow investments is the high level of information uncertainty in the outer and inner environment which makes investing risky for investors. Development of new methods of gathering and using the information to provide an opportunity for estimation and analyses of making decisions in the process of governing the technical-economic dots and the effectiveness of its realization.

Keywords: Specificity of projects of the mining enterprises Economic efficiency in the conditions of uncertainty, Information base for an economic estimation, uncertainty of the environment of realization of a capital investment project, the external and internal environment of the enterprise, the scenario approach.