

**А.Т.КАРМАНСКИЙ**, канд. техн. наук, ст. научный сотрудник, *kaf.sgp@mail.ru*  
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

**A.T.KARMANSKY**, *PhDr. tech. Sci, Senior Research Fellow, kaf.sgp@mail.ru*  
*Saint-Petersburg State Mining Institute (Technical University)*

## **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОРОД ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ, РАЗНЫХ УРОВНЯХ ВЛАЖНОСТИ И ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ**

Проведенные исследования позволили установить закономерности изменения механических свойств горных пород с учетом влияния вида напряженного состояния, форм и видов влаги в породах. Условие предельных состояний можно рассматривать как критерий разрушения пород в зависимости от влажности, порового давления и вида напряженного состояния при постоянной скорости деформирования.

**Ключевые слова:** порода, напряжение, деформация, прочность, поровое давление, влажность, свойства.

## **REGULARITIES OF CHANGES IN STRENGTH OF ROCKS UNDER COMPLICATED STRESS STATE, DIFFERENT LEVELS OF HUMIDITY AND PORE PRESSURE**

The conducted investigations allowed to establish the regularities of changes in mechanical properties of rocks with due account of influence of the stress state type, forms and kinds of moisture in rocks. Condition of the final state may be regarded as the criterion of rock failure depending on the moisture content, value of pore pressure and stress state type under constant velocity of deformation.

**Key words:** rock, stress, deformation, strength, pore pressure, humidity, properties.

Многочисленные натурные инструментальные наблюдения, лабораторные, а также аналитические оценки напряженного состояния массива горных пород, с учетом его разупрочнения и разрыхления, показывают, что различия в характере поведения горных пород вблизи выработки обусловлены, с одной стороны, влиянием внешних факторов (скорость нагружения, вид напряженного состояния), с другой – структурой, текстурой пород, формами и видами связи, поровым давлением насыщающих флюидов [1, 3, 4].

Объектом исследований являлись осадочные породы (крепкие и средней прочности), каменные угли (Прокопьевского, Вор-

кутского месторождений) и бурый уголь (Шурабское месторождение), экземпляры которых отличались характером разрушения – пластический или хрупкий, низкой растворимостью и различием форм связи воды с поверхностью породы.

Исследования механических свойств горных пород при прессовой скорости деформирования  $\varepsilon_1 = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  и температуре  $t = 20\text{--}22^\circ\text{C}$  проводились при напряженных состояниях одноосного сжатия и растяжения по методу диаметрального сжатия цилиндрических образцов по образующей, а также при сжатии в условиях сложного напряженного состояния. Диапазон давления

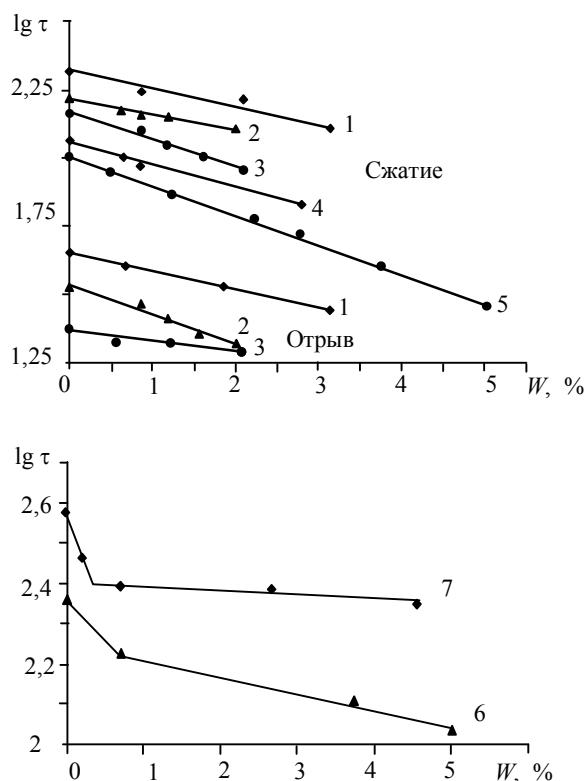


Рис.1. Зависимость предела прочности пород от влажности при одноосном сжатии (отрыве)  
1 – известняк; 2 – неравномерно-зернистый песчаник;  
3 – мелкозернистый песчаник; 4 – среднезернистый песчаник;  
5 – кайнитовая порода; 6 – горючий сланец;  
7 – кварцевый песчаник

всестороннего сжатия  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0\div200$  МПа. Агрегатное состояние форм влаги в образцах: в воздушно-сухом состоянии – высушенные в вакуумной камере при температуре 105 °C до постоянства массы; максимальная гигроскопическая влажность; капиллярная влажность и полное водонасыщение.

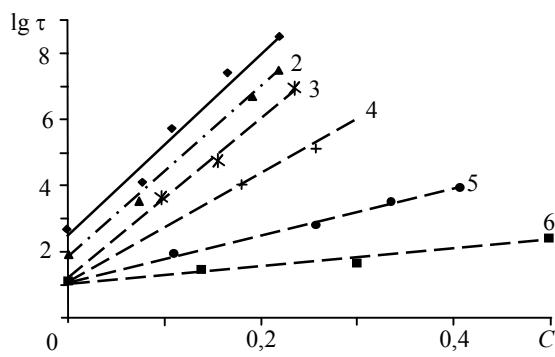


Рис.2. Типичная зависимость прочности от влажности и порового давления, создаваемого водой, при сложном напряженном состоянии (кварцевый песчаник)  
1 – воздушно-сухие; 2 – гигроскопическая влажность;  
3 – полное водонасыщение; 4 –  $a = 0,5$ ; 5 –  $a = 0,8$ ; 6 –  $a = 0,95$

Влияние порового давления  $P_n$  на деформационное поведение крепких горных пород и углей исследовалось при трехосном напряженном состоянии. Интенсивность порового давления  $a = P_n/\sigma_3 = 0\div0,95$ .

Результаты испытаний представлены на рис.1-3 в координатах  $\lg \tau - W$ ,  $\lg \tau - C$ ,  $\tau - P_n$ , где  $\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$  – касательное напряжение;  $C = \sigma_3/\sigma_1$  – вид напряженного состояния;  $W$  – влажность полного насыщения, %.

С ростом влажности прочность породы и угля уменьшается не только при одноосном сжатии (см.рис.1), но и при сложном напряженном состоянии (см.рис.2, кривые 1-3). Максимум прочности соответствует образцам в воздушно-сухом состоянии, а максимум снижения прочности горных пород при увлажнении достигается при максимальной гигроскопической влажности (рис.1, точки перегиба на кривых 6, 7 и рис.2, кривая 2). Дальнейшее увлажнение приводит к появлению в породе свободной воды, влияние которой проявляется в ее способности растворять породу, передавать гидродинамическое давление и дополнительно снижать прочность.

С ростом давления всестороннего сжатия прочность пород как в воздушно-сухом, так и увлажненных состояниях возрастает (рис.2, кривые 1-3).

Прочность горных пород при трехосном напряженном состоянии с ростом порового давления  $P_n$  снижается (рис.2, кривые 4-6, рис.3).

При значениях порового давления, близких или равных давлению всесторонне-

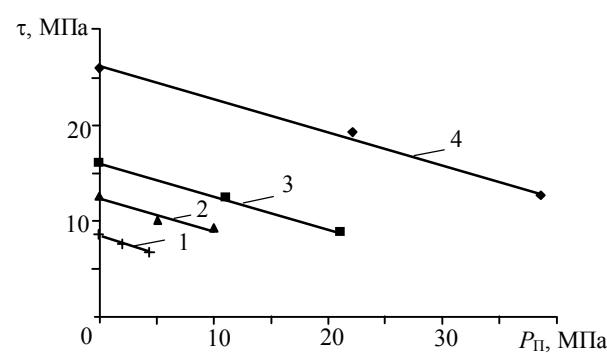


Рис.3. Типичная зависимость прочности от порового давления (каменный уголь, поровое давление создавалось азотом)  
1 –  $\sigma_3 = 5$  МПа; 2 –  $\sigma_3 = 10$  МПа; 3 –  $\sigma_3 = 20$  МПа;  
4 –  $\sigma_3 = 40$  МПа

го сжатия, прочность горных пород и угля только на 10-15 % превышает значение прочности на одноосное сжатие, т.е. пропадает эффект действия давления всестороннего сжатия. Характер изменения прочности с ростом порового давления не зависит от того, каким флюидом оно создается: газом или водой. Поровое давление оказывает механическое действие на скелет породы, которому противодействует внешнее давление, алгебраически суммируемое с поровым давлением  $P_n$ , что приводит к изменению вида напряженного состояния.

Как видно из приведенных зависимостей (рис.2), экспериментальные точки, в указанных координатах, достаточно хорошо ложатся на прямые линии, которые пересекаются в одной точке при  $C=0$ . Точка пересечения соответствует прочности водонасыщенного образца на одноосное сжатие, если поровое давление создается водой, или прочности образца в воздушно-сухом состоянии, если поровое давление создается газом.

Условия предельного состояния горных пород в соответствии со статистической теорией прочности при любом виде напряженного состояния и постоянной скорости деформирования могут быть представлены уравнением вида [5]

$$\tau_i(C) = \tau_{i0} \exp(AC), \quad (1)$$

где  $A$  – коэффициент, определяемый по паспорту прочности пород в увлажненном состоянии при  $P_n=0$ , а в случае создания порового давления газом – по паспорту прочности образца в воздушно-сухом состоянии в принятой системе координат (рис.2, кривые 1-3).

Условия предельных состояний пород и угля с учетом влияния влажности на прочность при одноосном сжатии и постоянной скорости деформирования (рис. 1) могут быть представлены уравнениями [6]:

– малопористые породы (пористость  $m < 8 \%$ ) различного минералогического состава

$$\tau_i(G) = \tau_{i0} \exp(-zG), \quad (2)$$

– высокопористые породы ( $m > 8 \%$  – кварцевый песчаник, горючий сланец)

$$\tau_i(G) = \tau_{i0} [\exp(-bG) + \exp(-dG)]. \quad (3)$$

Здесь  $\tau_n(G)$  – прочность на одноосное сжатие (отрыв) при разной влажности;  $\tau_{n0}$  – прочность на одноосное сжатие образцов в воздушно-сухом состоянии;  $z$  – постоянная, определяющая угол наклона линии предела прочности в принятой системе координат;  $G = W_i/W_{max}$  – относительная влажность;  $b$  и  $d$  – константы, определяемые из опыта (рис. 1).

По своей структуре уравнение (3) аналогично уравнению, полученному для песчаников из угольной шахты «Joban» (Япония), влажность которых варьировалась от 0,4 до 13,8 % [2].

В связи с тем, что линии пределов прочности пород при разной влажности в условиях сложного напряженного состояния (рис. 2) параллельны между собой, полное условие предельных состояний в общем виде может быть представлено уравнением вида

$$\tau_i(C, G) = \tau_{i0} \exp(AC - zG). \quad (4)$$

Анализируя экспериментальные зависимости предела прочности от порового давления  $P_n$  (рис.3), можно записать, что при любом  $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const}$

$$\tau_i^i = \tau_{(P_n=0)} - kP_i^i, \quad (5)$$

где  $\tau_i^i$  – предел прочности при текущем значении  $P_i^i$ ;  $\tau_{(P_n=0)}$  – прочность при заданном виде напряженного состояния и  $P_n=0$ ;  $k$  – константа, определяющая угол наклона экспериментальных зависимостей  $\tau_i^i - P_i^i$ .

Из анализа экспериментальных зависимостей прочности от вида напряженного состояния и порового давления (рис.2, 3) следует, что в уравнении (1) коэффициент  $A$  является функцией порового давления.

Текущее значение коэффициента  $A_i$  определяется следующим образом:

$$A_i = A - k \frac{P_i}{\sigma_3} = A_0 - k_1 a_i, \quad (6)$$

где  $k_1$  – угловой коэффициент;  $a_i = P_n/\sigma_3$ ,  $a_i = 0 \div 1$ .

Наличие полюса на графике  $A-a$  (рис.4) позволяет сделать вывод, что для прогноза прочностных свойств пород при наличии порового давления можно использовать установленные зависимости.

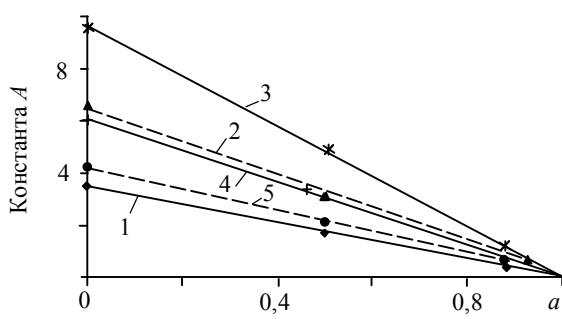


Рис.4. Зависимость коэффициента  $A$  при экспоненте от интенсивности порового давления  $a$   
 1 – каменный уголь; 2 – кварцевый песчаник;  
 3, 4 – песчаники, 5 – мрамор

Полное условие предельного состояния, учитывающее вид напряженного состояния, влажность, поровое давление насыщающей жидкости, можно представить уравнением

$$\tau_i(\sigma, G, P_i) = \tau_{i0} \exp[(A - k_1 a_i)(C - zG)]. \quad (7)$$

Установлено, что при каком-либо заданном значении давления всестороннего сжатия  $\sigma_3$  произведение  $AC = \text{const}$ , коэффициент  $A$  не зависит от влажности, а зависит от порового давления. Из этого следует, что для прогноза прочностных свойств горных пород при какой-либо постоянной скорости деформирования можно определить коэффициенты, входящие в уравнение (7) по упрощенной методике.

Таким образом, условие предельных состояний, представленное уравнением (7), можно рассматривать как критерий разрушения пород в зависимости от влажности, порового давления и вида напряженного состояния при постоянной скорости деформирования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Джегер Ч. Механика горных пород и инженерные сооружения. М.: Мир, 1975, 255 с.
2. Исследование зависимости между динамическим модулем упругости, прочностью на сжатие и влажностью углистых пород / Горибэ Томио, Кобаяма Редзи, Муранами Токаси, Окунуря Хиехино // J. Tohoku Mining Soc. 1985, pp. 6-11.
3. Марморштейн Л.М. Коллекторские и экранирующие свойства осадочных горных пород при различных термодинамических условиях. Л.: Недра, 1975. 276 с.
4. Напряженное состояние массива горных пород около очистных выработок произвольной формы / И.А.Петухов, В.В.Зубков, И.А.Зубкова и др. // ФТРПИ. 1982. № 5. С. 3-8.
5. Ставрогин А.Н. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах / А.Н.Ставрогин, А.Г.Протосеня. М.: Недра, 1985. 325 с.
6. Ставрогин А.Н. Методика и результаты исследований механических свойств горных пород при разной влажности в условиях сложных напряженных состояний / А.Н.Ставрогин, А.Т.Карманский // Горное давление и горные удары / ВНИМИ, 1971. N 82. С. 10-13.

## REFERENCES

1. Jager Ch. Rock mechanics and engineer constructions. M.: Mir, 1975. 255 p.
2. Investigation of relationship between dynamic elasticity modulus, compression strength and humidity of coaly rocks / Horibe Tomio, Kobayama Reji, Muranami Tokasi, Okunura Hiehino // J.Tohoku Mining Soc. 1985. 12.1, pp. 6-11
3. Marmorstein L.M. Collecting and screened properties of sedimentary rocks under different thermodynamic conditions. L.: Nedra, 1975, 276 p.
4. Stress state of rock mass near the productive workings of arbitrary shape / I.A.Petukhov, V.V.Zubkov and I.A.Zubkova et al. // FTRPI. 1982. No 5, pp. 3-8.
5. Stavrogin A.N. Strength of rocks and stability of mine workings at great depths / A.N.Stavrogin and A.G.Protosenna. M.: Nedra, 1985, 325 p.
6. Stavrogin A.N. Methods and results of study of mechanical properties of rocks with different humidity under complicated stress state / A.N.Stavrogin and A.T.Karmansky // J.Rock Pressure and Rockbursts / VNIMI. No.82, 1971, pp.10-13.