УДК 622.243.94

М.Д.ИЛЬИНОВ, *канд. техн. наук, заведующий лабораторией, ilinov_md@spmi.ru*
Ю.М.КАРТАШОВ, *д-р. техн. наук, главный научный сотрудник*
А.Т.КАРМАНСКИЙ, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник*
В.А.КОЗЛОВ, *старший научный сотрудник*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

M.D.ILYINOV, *PhD in eng. sc., head of laboratory, ilinov_md@spmi.ru*
Yu.M.KARTASHOV, *Dr. in eng. sc., chief research assistant*
A.T.KARMANSKY, *PhD in eng. sc., senior research assistant*
V.A.KOZLOV, *senior research assistant*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ВЛИЯНИЕ НАРУШЕННОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД НА ИХ РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Проведены комплексные исследования реологических свойств ненарушенных и нарушенных горных пород в лабораторных условиях, в режиме ползучести, релаксации и бокового распора. Установлено, что реологические свойства нарушенных горных пород существенно отличаются от свойств ненарушенных горных пород. Даны рекомендации по использованию полученных результатов при решении задач горной геомеханики.

Ключевые слова: ползучесть, релаксация, боковой распор, нарушенные и ненарушенные образцы горных пород.

INFLUENCE OF ROCK DISTURBANCE ON THEIR RHEOLOGICAL PROPERTIES

Complex investigations have been conducted of rheological properties of undisturbed and disturbed rocks under laboratory conditions in the modes of creeping, relaxation and lateral pressure. It was stated that the rheological properties of disturbed rocks substantially differ from those properties of undisturbed rocks. Recommendations are given for the use of the obtained results in solution of tasks in mining geomechanics.

Key words: creeping, relaxation, lateral pressure, disturbed and undisturbed rock specimens.

Различные формы проявлений горного давления – горные удары, внезапные выбросы угля, породы и газа, пучение и конвергенция пород в капитальных и подготовительных выработках определяются как уровнем действующих в массиве напряжений, так и продолжительностью их воздействия. Поэтому при решении задач по предотвращению этих явлений или снижению их негативных последствий необходимо учитывать фактор времени.

Наиболее важными временными показателями свойств горных пород, используемыми в геомеханических расчетах, являются характеристики ползучести, релаксации и бокового распора. Одним из существенных недостатков расчетов реологических характеристик пород является то, что они определяются на образцах пород с ненарушенным строением. Породы, окружающие горные выработки, находятся, как правило, в нарушенном состоянии и их свойства существенно отличаются от свойств ненарушенных горных пород. Неучет этого фактора снижает достоверность исходных данных.

Работа посвящена комплексному изучению реологических свойств нарушенных горных пород и сравнению их с аналогич-

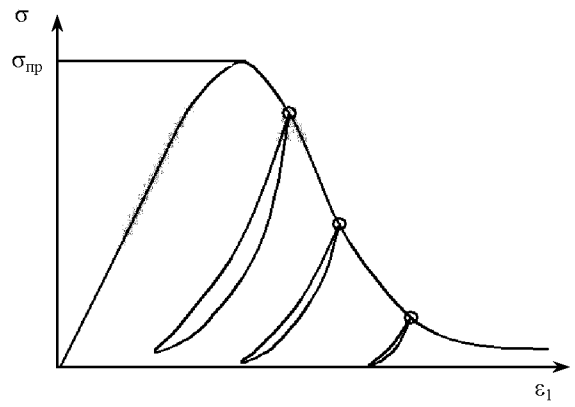


Рис.1. Схема режима испытаний образцов пород при создании нарушенности их структуры

ными показателями ненарушенных пород. В основу методики исследований положен метод моделирования на образцах горных пород процессов нагружения и деформирования пород в окрестностях горных выработок.

Очевидно, что при проведении лабораторных исследований невозможно в полной мере воспроизвести все особенности строения и напряженного состояния пород вследствие их сложности и разнообразия. Поэтому при проведении настоящих исследований воспроизводилась лишь качественная сторона процесса нагружения и деформирования пород в окрестности горной выработки.

Сущность методики заключалась в создании в монолитных образцах горных пород под воздействием силового поля определенной степени нарушенности структуры и последующее испытание образцов в режиме ползучести, релаксации и бокового распора. Наряду с проведением испытаний нарушенных горных пород проведены испытания ненарушенных образцов горных пород в аналогичных режимах нагружения. Сравнительный анализ показателей свойств этих двух групп позволил оценить влияние нарушенности пород на проявление реологических свойств.

Исследования проводили на семи разновидностях горных пород: песчанике (Донбасс), каменном угле (Кузбасс), аргиллите (Донбасс), алевролите (Донбасс), горючем сланце (Ленинградская обл.), каменной соли (Оренбургская обл.) и кембрийской глине (Ленинградская обл.). Выбор этих пород обусловлен стремлением охватить наиболее представительные для большинства месторождений полезных ископаемых породы, достаточно хорошей их изученностью по многим показателям физико-механических свойств в ненарушенном состоянии и сравнительной однородностью, что является немаловажным при исследованиях, направленных на выявление новых закономерностей деформирования и разрушения горных пород. Исследования проводили на образцах цилиндрической формы диаметром 42 мм и высотой 90 мм. Форма и размеры образцов обусловлены конструктивными особенностями существующего испытательного оборудования.

Моделирование нарушенности горных пород в лабораторных условиях проводили с помощью камеры запредельного деформирования БВ-21 [3] путем нагружения образцов в режиме контролируемого деформирования до определенной стадии их разрушения, т.е. перехода в запредельную часть диаграммы σ-ε_1. Степень нарушенности характеризовали показателем, представляющим отношение величины снижения прочности к предельному значению прочности $\sigma_{пр}$. Испытания проводили до достижения одной из следующих стадий разрушения образца (рис.1): снижение несущей способности образца на 10 % по отношению к предельному значению; выход на стадию остаточной прочности (~90 %); промежуточная стадия, составляющая 50 % от общей величины спада несущей способности образца.

После достижения одной из перечисленных выше стадий деформирования процесс нагружения прекращали, образец разгружали и проводили исследование реологических свойств данного образца.

Испытания образцов горных пород на ползучесть в условиях одноосного напряженного состояния проводили с помощью установки одноосной ползучести УП-2 [2]. Испытания образцов прекращали при достижении одного из следующих состояний: отсутствие приращений деформаций; стабилизация скорости изменения деформаций; разрушение образца [1].

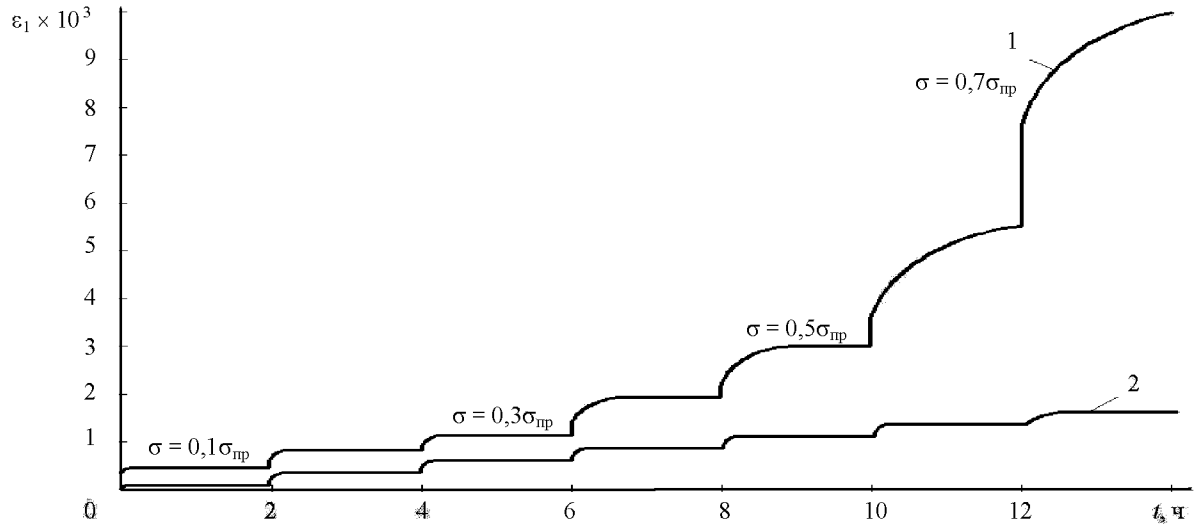


Рис.2. Графики ползучести образцов каменной соли при ступенчатом режиме нагружения
1 – ненарушенный образец; 2 – нарушенный

Проведенные исследования показали, что нарушенность строения пород приводит к резкому снижению деформаций ползучести. При уровне постоянно действующей нагрузки, составляющей 70 % от предельной, деформации ползучести нарушенного образца кембрийской глины (степень нарушенности 0,1) меньше аналогичного показателя ненарушенного образца при тех же условиях в 10-15 раз. Для каменной соли эта разница составляет от 8 до 10 раз, для аргиллита – 4-6 раз и для песчаника около двух раз. При меньших значениях постоянно действующей нагрузки и той же степени нарушенности различие в деформировании нарушенных и ненарушенных пород несколько сокращается. Результаты испытаний образцов пород с большей нарушенностью (0,5 и выше) показали, что с ростом нарушенности деформации ползучести уменьшаются. Деформации ползучести образцов пород, имеющих нарушенность 0,1, на 15-20 % больше деформаций ползучести образцов, имеющих степень нарушенности 0,5. Характерные кривые ползучести нарушенных и ненарушенных образцов каменной соли приведены на рис.2.

Как следует из приведенных результатов, различие в ползучести нарушенных и ненарушенных пород в большей мере проявляется на пластичных породах (каменная соль, кембрийская глина) и в меньшей степени на хрупких породах (песчаник, каменный уголь). Характерно, что пластичные и склонные к ползучести породы, такие как каменная соль и кембрийская глина в нарушенном состоянии ведут себя подобно хрупким породам и разрушаются через некоторое время при весьма малых деформациях ползучести.

Существенное снижение деформаций ползучести нарушенных пород по сравнению с ненарушенными объясняется тем, что основная часть пластических деформаций нарушенных пород была реализована в процессе предшествовавшего нагружения (разрушения) и при повторном нагружении реализуется оставшаяся незначительная часть. Эти результаты позволяют сделать вывод о том, что деформации ползучести нарушенных пород не могут оказывать значительного влияния на смещения пород на контуре выработок.

Испытания образцов горных пород в режиме релаксации напряжений проводили на механических прессах типа ЦДМ-10 и ЦДМ-2,5 при различных уровнях первоначально задаваемых напряжений. В большинстве проведенных экспериментов эти напряжения составляли 30, 50 и 70 % от предельных значений.

Результаты испытаний в режиме релаксации образцов нарушенных пород и сравнение их с ненарушенными образцами показали, что нарушенность пород приводит к активизации процесса релаксации напряжений. В большей мере это сказывается на хрупких породах типа песчаника и каменного угля. Для этих пород падение напряжений у нарушенных образцов на 20 % больше, нежели у ненарушенных образцов за равный промежуток времени. Для пластичных пород типа каменной соли и кембрийской глины, отличающихся высокой релаксационной активностью в ненарушенном состоянии, нарушенность ведет к незначительному увеличению их релаксационной активности. Величины падения напряжений у нарушенных образцов на 8-12 % выше, чем у ненарушенных пород.

Как для хрупких, так и для пластичных пород наибольшее отличие в активности релаксационных процессов у нарушенных и ненарушенных образцов наблюдается при первоначально заданных напряжениях, близких к предельным. С уменьшением значений начальных напряжений отмечается сближение показателей релаксации у нарушенных и ненарушенных образцов пород. Следует также отметить бóльшую продолжительность процесса релаксации напряжений (до полного затухания) у нарушенных пород по сравнению с ненарушенными. Хотя и у тех, и у других основной процесс релаксации напряжений (до 90 %) происходит в первые минуты испытаний. Для хрупких пород этот промежуток времени составляет 3-5 мин, для пластичных – 10-15 мин.

Испытания образцов пород в режиме бокового распора производили на установке КБР [2], позволяющей реализовывать режим нагружения вида:

$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 \text{ при } \varepsilon_1 > 0;\ \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.$$

Испытания образцов горных пород в режиме бокового распора, т.е. в режиме осевого нагружения при условии предотвращения деформаций бокового выдавливания образца ($\varepsilon_2 = 0$), проводили также в несколько этапов приложения нагрузки.

Результаты проведенных испытаний свидетельствуют о том, что коэффициент бокового распора λ является величиной непостоянной и зависит как от типа породы, так и от величины приложенной активной нагрузки. Для образцов с ненарушенной структурой наименьшее значение коэффициента бокового распора (при значении активной нагрузки, равной $2\,\sigma_{пр}$) получено у песчаника (0,29), максимальное значение – у кембрийской глины (0,82). У каменного угля, аргиллита и каменной соли этот показатель составил соответственно 0,42; 0,58 и 0,70.

Зависимость коэффициента бокового распора от приложенной активной нагрузки носит нелинейный характер. У хрупких пород (песчаник, каменный уголь) нелинейность проявляется незначительно и ею можно пренебречь, т.е. принимать зависимость в первом приближении линейной. У пластичных пород (каменная соль, кембрийская глина) зависимость $\sigma - \lambda$ носит ярко выраженный нелинейный характер.

Сравнительный анализ изменения коэффициента бокового распора от активной нагрузки для образцов с нарушенной и ненарушенной структурой показал, что нарушенность структуры пород приводит к увеличению показателя бокового распора и большей нелинейности зависимости $\sigma - \lambda$. Наименьшее влияние нарушенности пород на показатель бокового распора отмечено у кембрийской глины. Для этой породы изменения коэффициента бокового распора по отношению к ненарушенному образцу составили: для степени нарушенности, равной 0,1, – 4 %; для степени нарушенности, равной 0,5 и 0,9, – 19 %. Для каменной соли эти показатели составили соответственно 22, 25 и 37 %. В большей степени влияние нарушенности пород на показатели бокового распора отмечено у аргиллита. Прирост значения коэффициента бокового распора по мере перехода от образцов с ненарушенной структурой к образцам с максимальной степенью нарушенности составил 9; 32; 63 %. Характерные кривые изменения коэффициента бокового распора для нарушенных и ненарушенных образцов приведены на рис.3.

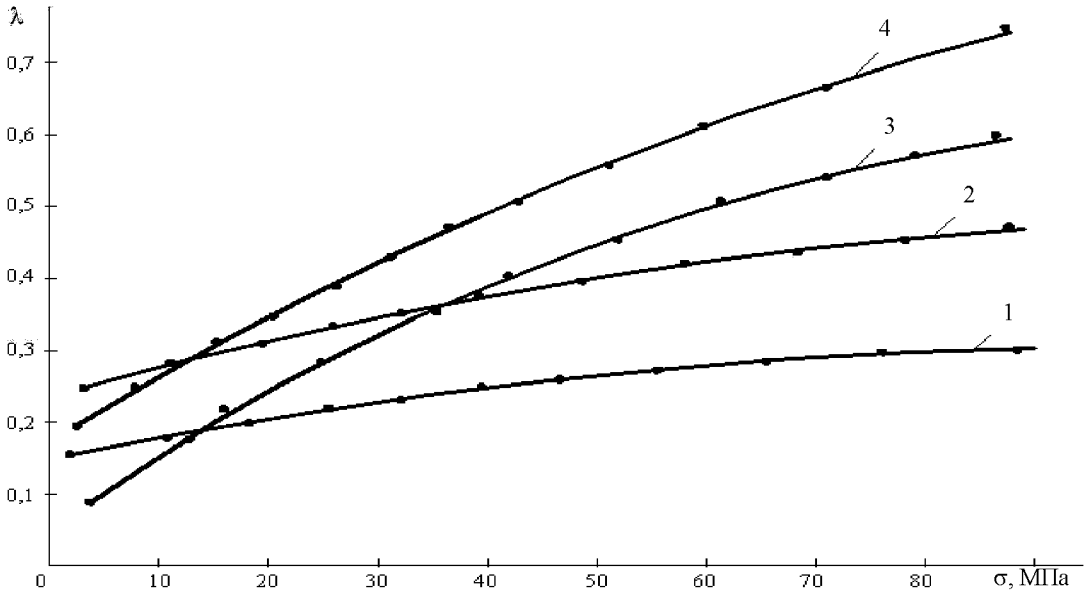


Рис.3. Графики изменения коэффициента бокового распора песчаника с различной степенью нарушенности
1 – не нарушен; 2 – степень нарушенности 0,1; 3 – степень нарушенности 0,5; 4 – степень нарушенности 0,9

Наибольшее влияние нарушенности структуры пород на показатели бокового распора отмечено у каменного угля и песчаника. Для каменного угля изменения коэффициента бокового распора для различной степени нарушенности составили 11; 48 и 112 %. Для песчаника эти показатели составили 55; 93 и 148 %.

Проведенные исследования показали, что значение коэффициента бокового распора у пород с максимальной степенью нарушенности близки к значению 0,96, что соответствует показателю бокового распора сыпучего материала (кварцевый песок). Этот результат является косвенным подтверждением того, что на стадии минимальной остаточной прочности состояние породы близко к состоянию сыпучего материала.

Проведенные исследования образцов горных пород в режимах ползучести, релаксации и бокового распора выявили существенное отличие в проявлении реологических свойств у нарушенных и ненарушенных пород.

Результаты испытаний в режиме релаксации свидетельствуют о более активном протекании процесса релаксации напряжений у нарушенных пород по сравнению с ненарушенными. При этом, чем больше нарушенность пород, тем продолжительней процесс релаксации напряжений.

Применительно к массиву пород полученные результаты можно интерпретировать следующим образом:

1. Ползучесть нарушенных горных пород не оказывает существенного влияния на смещение пород на контурах выработок и формирование нагрузок на крепь. Величины смещений пород и нагрузок на крепь определяются в основном процессом дальнейшего снижения несущей способности пород (разрушения и разрыхления) на контуре выработок.

2. Одним из важнейших показателей свойств нарушенных пород является показатель бокового распора, в значительной мере зависящий от степени нарушенности пород. Боковой распор несомненно должен оказывать существенное влияние на характер и величины смещений пород на контуре горных выработок и формирование нагрузок на крепь.

3. Методики расчета проявлений горного давления в горных выработках должны

учитывать показатели запредельного деформирования пород и бокового распора. Учет этих характеристик позволит повысить надежность производимых расчетов и избежать неоправданных расходов на проведение и поддержание горных выработок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические указания по исследованию ползучести горных пород / ВНИМИ. Л., 1973. 32 с.

2. Прочность и деформируемость горных пород / Ю.М.Карташов, Б.В.Матвеев, Г.В.Михеев, А.Б.Фадеев. М.: Недра, 1979. 282 с.

3. Рекомендации по определению полного паспорта прочности и деформируемости горных пород / Ю.М.Карташов, Б.В.Матвеев, М.Д.Ильинов и др. / ВНИМИ. Л., 1988. 54 с.

REFERENCES

1. Methodological Instructions for study of rock creeping / VNIMI. L., 1973. 32 p.

2. Strength and Deformability of Rocks / Yu.M.Kartashov, B.V.Matveev, G.V.Micheev and A.B.Fadeev. M.: Nedra, 1979. 282 p.

3. Recommendations on the determination of the whole data sheet of strength and deformability of rocks / Yu.M.Kartashov, B.V.Matveev, M.D.Ilyinov / VNIMI. L., 1988. 54 p.