

**ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОДНОГО МАССИВА  
И ПРОЦЕССЫ ДЕФОРМАЦИЙ СЛОИСТЫХ ПОРОД**

Проаналізовано деформаційні характеристики шаруватого породного масиву в процесі його деформування та методики визначення механічних та деформаційних властивостей породного масиву, визначено метод, що здатний точніше до існуючих умов визначати ці властивості.

**DEFORMATION CHARACTERISTICS OF A ROCKY FILE AND  
PROCESSES OF DEFORMATIONS OF LAYERED BREEDS**

The analysis of deformation characteristics of layered rocky file is executed during its deformation and technique of definition of mechanical and deformation properties of rocky file, the method which is capable to define more precisely to existing conditions these properties is determined.

Слои, слагающие кровлю выработки в общем случае отличаются величинами жесткостей  $EJ$  ( $J$  – момент инерции слоя) и при совместном изгибе пачки слоев, зажатых на опорах, расслаиваются. Поэтому, знания деформационных характеристик пород является необходимым условием для установления закономерностей и определения количественных показателей этого процесса.

Модуль продольной упругости, как коэффициент пропорциональности между величиной нормальных напряжений (сжимающих или растягивающих) и относительной деформацией, образующейся вдоль оси нагружаемого образца, является одним из основных параметров упругости горных пород. Согласно рекомендациям Международного бюро механики горных пород модуль  $E$  определяется по результатам испытаний на одноосное сжатие породных образцов.

На величину модуля  $E$  большое влияние оказывает слоистость породы, причем величина  $E^{\parallel}$  всегда больше  $E^{\perp}$ . Поэтому коэффициент анизотропии определяется зависимостью  $K_E = E^{\parallel} / E^{\perp}$ . Для одной литологической разности, например, для мелкозернистого песчаника  $E^{\parallel} = 2,67$  ГПа, а  $E^{\perp} = 1,72$  ГПа.

Величины модулей Юнга (и сдвига) имеют минимальные значения в направлении  $45^{\circ}$  относительно слоистости пород, что объясняется дополнительным влиянием сдвиговых (касательных) напряжений, которые возникают на границе слоев.

На величину модуля продольной упругости большое влияние оказывает пористость или соотношение между величиной поверхности твердой фазы породы и величиной поверхности пор в рассматриваемой плоскости породного образца. Вследствие сжатия породный материал уплотняется, увеличивается контактная поверхность зерен и тем самым снижается способность породы деформироваться. Как следствие возрастает модуль продольной упругости.

Реальная зависимость между напряжениями и деформациями для горных пород является криволинейной, и пластические деформации появляются зачастую сразу после начала нагружения образца. Поэтому возникла необходимость

введения понятия модуля деформации  $E_0$ , который равен отношению величины нормального напряжения к полной относительной продольной деформации, включая остаточную [1]. Для одного и того же породного образца модуль упругости несколько больше модуля деформации.

Реализация физической модели слоистой надугольной толщи, в виде пакета тонких плит и моделирование кровли вышележащих слоев пород в расчетных схемах балками-полосками для использования более простого расчетного метода, допустима только при условии эквивалентности напряжений и деформаций. В общем случае имеется серьезное различие в деформируемости плит и балок: материал балки находится в плосконапряженном состоянии и имеет возможность свободно деформироваться в направлении, перпендикулярном к плоскости изгиба, а материал плиты находится в плоскодеформированном состоянии и не имеет возможности деформироваться в указанном направлении. Поэтому, в общем случае замена в целях расчета плиты балкой неправомерна. Однако, в теории плит показано [2], что заменить плиту можно эквивалентной балкой-полоской, мысленно вырезанной двумя параллельными между собой плоскостями, ориентированными в плоскости изгиба, но при этом в расчетах надо ввести, так называемый «приведенный» модуль упругости

$$E_{np} = \frac{E}{1 - \mu^2}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости;  $\mu$  - коэффициент поперечной деформации.

Важной деформационной характеристикой является коэффициент поперечной деформации  $\mu$ , представляющий абсолютную величину отношения поперечной деформации  $\varepsilon^I$  к продольной  $\varepsilon$  в условиях одноосного сжатия при растяжении [3], т.е.

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon^I}{\varepsilon} \right|.$$

В области линейного деформирования коэффициент поперечной деформации называется коэффициентом Пуассона и является величиной постоянной. За пределами линейного деформирования  $\mu \neq \text{const}$ .

Коэффициент поперечной деформации (если только его не связывать с коэффициентом горизонтального распора в нетронутым породном массиве) не влияет на качественную картину напряженно-деформированного состояния массива и весьма незначительно влияет на количественную сторону этого состояния. Так, погрешность от замены  $\mu = 0,3$  (наиболее распространенное значение для горных пород) на  $\mu = 0,5$  составляет всего 10 – 15 %, то есть, находится в пределах точности экспериментального определения этого параметра. При решении упруго-пластических задач и задач, учитывающих ползучесть

пород, введение коэффициента поперечной деформации, равного 0,5, является еще более обоснованным.

По данным, приведенным в [4], значения коэффициента Пуассона при растяжении в 2-3 раза меньше, чем при сжатии.

Величина, обратная коэффициенту Пуассона  $1/\mu = m$ , является функцией глубины залегания пород, т.е. она зависит от величины геостатического давления  $P_z = \gamma H$  ( $\gamma$  - объемный вес покрывающих пород,  $H$  - глубина залегания).

С ростом нагрузки величина  $m$  постепенно уменьшается, приближаясь асимптотически к пределу  $m = 2$ , что соответствует состоянию несжимаемости материала.

Величина коэффициента Пуассона изменяется в пределах  $0 \leq \mu \leq 0,5$ , причем нижний предел характерен для абсолютно сжимаемой среды, а верхний – для абсолютно несжимаемой среды. Теоретически можно принять,  $2 \leq m \leq \infty$ , а  $0 \leq \lambda \leq 1$ .

Практически большие значения  $m$  соответствуют небольшой глубине залегания пород, тогда как меньшее значение  $m$  относится к большим глубинам.

Учитывая, что основной характеристикой деформационных свойств горных пород, в отличие от других материалов, является модуль деформаций, рассмотрим этот вопрос подробнее, на основе результатов, изложенных в работах [3, 4].

В пределах упругого линейного деформирования коэффициент  $E$  имеет смысл модуля упругости и характеризует отношение нормального напряжения к величине соответствующей деформации в направлении его действия. В этом случае коэффициент  $G$  имеет смысл модуля сдвига и также является константой.

В отличие от металлов предел упругости у горных пород носит весьма условный характер, так как остаточные деформации могут проявляться при сравнительно небольших по величине напряжениях. Рассмотрим этот вопрос подробнее. На рис. 1 приведены графики «напряжение – осевая деформация» (кривая 1) и «напряжение – поперечная деформация» (кривая 2)

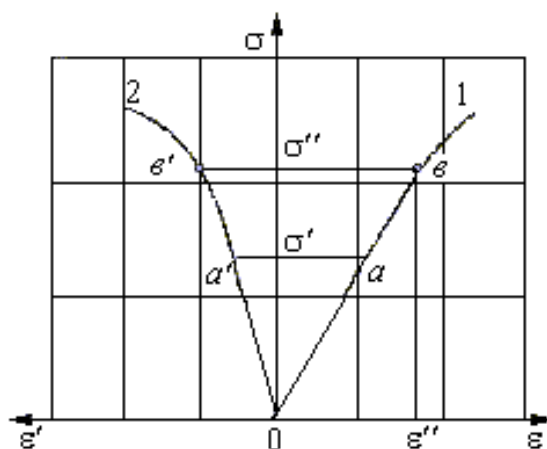


Рис. 1 – Графики «напряжение – осевая деформация» (1) и «напряжение – поперечная деформация» (2) для горных пород

При увеличении напряжения от 0 до некоторого значения  $\sigma^I$  (участки «0а» и «0а'» на рис. 1) обе диаграммы представляют линейные зависимости. Данная стадия характеризуется закрытием дефектов в породе, если таковые имеются, и упругим сжатием минерального скелета. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к началу процесса трещинообразования, в результате чего происходит постепенное увеличение коэффициента поперечной деформации  $\mu$ , которое характеризуется нарушением прямой пропорциональной зависимости «напряжение – поперечная деформация». При этом зависимость «напряжение – осевая деформация» сохраняет линейный характер. Однако, с появлением неупругих деформаций коэффициент  $E$  приобретает смысл модуля деформации, численные значения которого меньше, чем модуля упругости.

Физическая природа и степень отличия модулей упругости и деформации может быть объяснена следующим.

Одним из проявлений упругости горных пород является хрупкость. Для количественной оценки хрупкости (пластичности) горных пород одним из наиболее простых, но достаточно объективных, является предложение оценивать степень хрупкости различных материалов, в том числе и горных пород, посредством отношения величины предела прочности при одноосном растяжении  $R_p$  к величине предела прочности при одноосном сжатии  $R_c$  [1].

Величина коэффициента хрупкости  $\Psi$  изменяется от 0 до 1. При  $\Psi = 0$  имеет место идеальная хрупкость, при  $\Psi = 1$  – идеальная пластичность. Реальные же горные породы, как и иные твердые тела, занимают некоторое промежуточное положение. Например, для аргиллитов  $\Psi = 0,33$ , для крепких песчаников  $\Psi = 0,1$ . Подавляющее большинство твердых пород имеют коэффициент хрупкости, равный, примерно 0,1.

Таким образом, доля пластической деформации в допредельной части диаграммы «напряжение - деформация» является причиной различия величин модулей упругости и деформации.

При достижении напряжением величины  $\sigma^{II}$ , которая, как показывают исследования, связана с длительной прочностью породы (рис. 1, точка *в*), начинается процесс развития образовавшихся трещин, приводящий к нарушению прямой пропорциональной зависимости «напряжение – осевая деформация». Процесс неустойчивого распространения трещин заканчивается потерей прочности породы и ее разрушением.

В общем случае участок «0в» на рис. 1 может быть нелинейным с незначительными отклонениями от линейной зависимости. В связи с тем, что при решении задач методами теории упругости используется модель линейно-деформируемого массива, данный участок следует считать условно-линейным, а точку *в* – пределом условно-линейного деформирования. Однако такая замена возможна, если она не приводит к существенному искажению напряженно-деформированного состояния массива.

В этом случае коэффициент  $E_d$ , называемый в дальнейшем модулем деформации, определяется как отношение нормального напряжения  $\sigma^{II}$ , соответст-

вующего пределу линейного (условно линейного) деформирования, к вызываемой им величине полной относительной деформации  $\varepsilon^H$  (рис. 1, кривая 1). За пределом линейного (условно линейного) деформирования коэффициент  $E_D$  перестает быть константой, зависит от уровня действующих напряжений и, как правило, уменьшается с увеличением напряжений. В табл. 1 приведены значения коэффициента  $E_D$  и коэффициента поперечной деформации  $\mu$  на разных стадиях деформирования.

Таблица 1 – Значения коэффициентов  $E_D$  и  $\mu$  на разных стадиях деформирования породы

Стадия деформирования	$E_D \cdot 10^{-5}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\mu$
Сжатие вплоть до:		
зарождения трещин.....	9,5	0,226
неустойчивого распространения трещин ...	9,5	0,298
потери прочности .....	0,15	0,33
Растяжение (все стадии реализуются одновременно)	8,5	0,226

Горные породы, как известно, относятся к группе физически анизотропных материалов, неодинаково сопротивляющихся сжатию – растяжению. Поэтому следует различать модуль деформации в зависимости от направления действия нагрузки. Результаты отдельных исследований [3] показывают, что для некоторых типов сланцев модуль деформации при сжатии в 1,2-1,5 раза больше, чем при растяжении. Различие в деформационных характеристиках при сжатии и растяжении объясняется разными характерами процессов деформирования. Если при сжатии можно различить несколько последовательно протекающих стадий, таких, как закрытие имеющихся трещин, образование новых, их неустойчивое распространение с последующей потерей прочности породы, то при растяжении все указанные процессы протекают практически одновременно.

Деформационные характеристики горных пород зависят от вида напряженного состояния. При переходе от одноосного сжатия к объемному последующее увеличение среднего нормального напряжения ( $\sigma_{cp}$ ) приводит к тому, что модуль деформации увеличивается. Это явление связано с изменением плотности образца и наиболее характерно для пористых пород.

В частности, при увеличении всестороннего давления от 0 до 1000 кгс/см<sup>2</sup> модуль деформации известняка увеличился на 10 %, у глины на 12,5 %, а для известкового песчаника это увеличение составило 35 – 40 % [3, 4].

В заключение необходимо подчеркнуть, что большинство горных пород строго не подчиняется закону линейного деформирования даже при сравнительно небольших напряжениях, и кривые деформирования приобретают вид, показаны на рис. 2 [3].

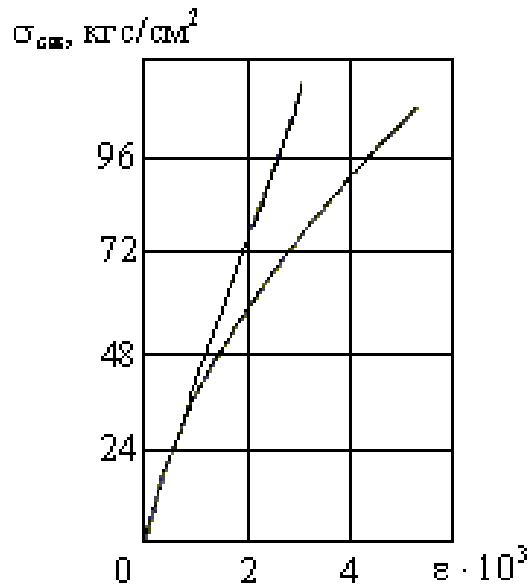


Рис. 2 – График нелинейной зависимости «напряжение – деформация» для аргиллита

Для учета этой нелинейности при решении задач механики горных пород кривые «напряжение - деформация» можно аппроксимировать степенной зависимостью вида [3]

$$\sigma = E\xi \cdot \varepsilon^{-m} \varepsilon,$$

где  $E = \text{const}$  – модуль деформации;  $0 < \xi < 1$ ,  $0 \leq m < 1$  – безразмерные параметры аппроксимации.

Определение указанных параметров осуществляется путем спрямления кривых «напряжение - деформация» в логарифмических координатах. Для кривой, изображенной на рис. 2 эти параметры составляют для аргиллита  $\xi = 0,133$ ;  $m = 0,27$  [3].

Известно, что величина модуля деформации зависит от вида напряженного состояния массива.

В объемном (трехосном), в т.ч. неравнокомпонентном, напряженно-деформированном состоянии породы горного массива находятся в нетронутом горном массиве или в массиве, находящемся за пределами области сдвижения пород подработанной толщи. Как известно [1, 3] объемный модуль упругости пород определяется по зависимости

$$E_o = \frac{E}{1-2\mu}, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль продольной упругости (Юнга).

В принятой модели сдвижения подработанной надугольной толщи породные слои, расположенные выше зоны обрушения до дневной поверхности, моделируются балками-полосками, которые мысленно вырезаются двумя парал-

лельными плоскостями, ориентированными в плоскости изгиба. Поэтому балки-полоски в отличие от плит находятся в плосконапряженном состоянии, которые характеризуются компонентами напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ . При расчетах с использованием балок-полосок необходимо использовать, так называемый приведенный модуль упругости:

$$E_n = \frac{E}{1 - \mu^2}, \quad (3)$$

который является «плоским» аналогом модуля продольной упругости в объемном напряженном состоянии [4]. Как показано в [4] «плоский» аналог коэффициента Пуассона определяется зависимостью:

$$\mu_n = \frac{\mu}{1 - \mu}. \quad (4)$$

Для приближенной, но обеспечивающей практически необходимую точность, оценки степени влияния глубины залегания породы на величину модуля деформации, как показано в [4], могут быть использованы корреляционные связи упругих характеристик с иными физико-механическими свойствами. О корреляции прочностных и деформационных характеристик известно давно: более крепки породы обычно имеют и более высокие модули упругости (деформации).

В работе [4] приведены корреляционные соотношения между модулями упругости и пределами прочности пород при одноосном сжатии:

- для песчаников с  $R_{сж} = 200 - 3200$  кг/см<sup>2</sup> (при надежном диапазоне корреляции от 600 до 2000 кг/см<sup>2</sup>)

$$E = 226R_{сж} + 1,22 \cdot 10^5, \text{ кг/см}^2; \quad (5)$$

коэффициент корреляции  $80,4 \pm 1\%$ ;

- для алевролитов с  $R_{сж} = 200 - 1700$  кг/см<sup>2</sup> (при надежном диапазоне корреляции от 250 до 950 кг/см<sup>2</sup>)

$$E = 245R_{сж} + 1,24 \cdot 10^5, \text{ кг/см}^2; \quad (6)$$

коэффициент корреляции  $57,1 \pm 3,3\%$ ;

- для аргиллитов с  $R_{сж} = 150 - 1100$  кг/см<sup>2</sup> (при надежном диапазоне корреляции от 200 до 800 кг/см<sup>2</sup>):

при сжатии по нормали к напластованию

$$E = 242R_{сж} + 0,16 \cdot 10^5, \text{ кг/см}^2; \quad (7)$$

при сжатии вдоль напластования

$$E = 585R_{сж} + 0,95 \cdot 10^5, \text{ кг/см}^2. \quad (8)$$

Используя эти зависимости и приведенные выше данные, характеризующие хрупкость осадочных пород, можно получить аналогичные корреляционные соотношения между пределом прочности пород при одноосном сжатии и модулями деформации.

Анализ существующих способов определения механических и деформационных свойств породных массивов показал следующее [5].

Наиболее трудоемкими и вместе с тем наиболее достоверными для данного объекта исследования являются методы натуральных механических испытаний непосредственно в породном массиве: искусственное нагружение специально оконтуренных частей массива для определения его деформируемости и прочности; вдавливание штампов в породные обнажения и прессиометрические исследования для определения деформируемости массивов и другие методы.

Менее трудоемкими и вместе с тем менее достоверными являются так называемые обратные методы – определение механических свойств массива расчетным путем по натурным замерам проявлений горного давления: метод определения деформируемости породного массива по замерам смещений его элементов, успешно развиваемый в ИГД СО АН СССР; определение прочности массивов по наблюдениям за разрушением породных целиков и откосов и другие методы.

В последние годы в инженерных расчетах определение характеристик механических свойств массивов сводится к перемножению характеристик механических свойств породных образцов на так называемые коэффициенты структурного ослабления.

Необходимо подчеркнуть, что первые две группы методов носят локальный характер, так как определяемые характеристики механических свойств могут быть использованы только для исследуемого породного массива. Иными словами, при таком подходе практически исключается возможность прогнозирования механических свойств породных массивов другой структуры. Последняя группа методов при известных механических свойствах породных образцов и структурно-механических особенностях массивов (например, по данным геологической разведки) обеспечивает возможность построения подобных прогнозов, что особенно важно на стадии проектирования горных работ. Этот метод принят нами за основу для решения поставленных задач.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П. Механика горных пород. – К.: Новий друк, 2004. – 400 с.
2. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. – М.: Недра, 1980. – 360 с.
3. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика горных пород. – М.: Недра, 1975. – 271 с.
4. Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Милев Г.В. Прочность и деформируемость горных пород. – М.: Недра, 1979. – 269 с.
5. Баклашов И.В. Деформирование и разрушение породных массивов. – М.: Недра, 1988. – 271 с.