

# Лекции 4 и 5

Основные свойства горных пород.  
Упругость, хрупкость и пластичность  
пород. Деформационные характеристики  
пород.

# 1. Классификация горных пород по характеру внутренних связей

По степени связности горные породы разделены на *скальные*, *связные*, *рыхлые (сыпучие)* и *пывучие*.

- *Скальные породы* (песчаники, известняки, граниты, базальты) характеризуются наличием между минеральными частицами значительных сил сцепления, которые после разрушения не восстанавливаются. Такие породы могут быть монолитными или трещиноватыми. Стенки горных выработок (скважин), пройденных в монолитных скальных породах, устойчивы, в то время как в сильно трещиноватых породах требуют закрепления.
- *Связные породы* (глины, суглинки, мел, бокситы и др.) отличаются тем, что силы сцепления между частицами этих пород обеспечиваются за счет пленочной, капиллярной и свободной воды и могут сильно изменяться в зависимости от степени увлажнения, характера цементирующего вещества, фракционного состава и формы частиц. Эти породы дают большие остаточные деформации без нарушения связности. В сухом и мерзлом состоянии связные породы по свойствам близки к скальным.

- *Рыхлые (сыпучие) породы* представляют собой совокупность не связанных между собой частиц различной формы и размеров (песок, гравий, галька, валуны и др.). Стенки горной выработки (скважины) в этом случае неустойчивы, склонны к обвалам и требуют закрепления.
- *Плывучие породы (плывуны)* – это водонасыщенные песчано-глинистые породы. Отличительной особенностью данных пород является их способность расплываться; под влиянием горного давления они способны сохранять постоянный уровень в выработке или, например, подниматься на некоторую высоту по стволу скважины.

Существенное влияние на выбор технологии ведения горных работ оказывают природные свойства горных пород такие как *твердость, крепость, трещиноватость, хрупкость, абразивность.*

- *Твердость* – свойство горных пород оказывать сопротивление внедрению в них других тел при контактом силовом воздействии.
- *Крепость.* Полагая, что разрушение горных пород происходит в основном путем преодоления их прочности на сжатие, профессор М.М. Протодьяконов предложил оценивать прочность пород коэффициентом крепости  $f$ . Значение этого коэффициента для каждого вида породы численно равно частному от деления величины временного сопротивления одноосному сжатию  $R_{сж}$ , выраженному в МПа, на 10, т.е.

$$f = R_{сж} / 10.$$

Согласно предложенной классификации, все горные породы подразделены на 10 категорий от  $f = 20$  - для высшей степени крепких пород до  $f = 0,3$  - для слабых плавучих пород

М.М. Протодяконов, один из основоположников аналитических методов в механике горных пород, рассматривал горные породы как тела до некоторой степени несвязанные. Это позволило ему найти общую основу для решения различных задач, как для сыпучих тел, так и для связных.

Известно, что для сыпучих тел основной механической характеристикой является угол внутреннего трения -  $\rho$ . Условие предельного равновесия для такой среды имеет вид

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \rho = \sigma f, \quad (1.1)$$

где  $\tau$  и  $\sigma$  – соответственно касательные и нормальные напряжения на рассматриваемой предельной наклонной площадке, МПа,  $f$  – коэффициент внутреннего трения.

Из (1.1) следует, что

$$\frac{\tau}{\sigma} = f. \quad (1.2)$$

Для связных пород условие предельного равновесия записывается следующим образом

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \rho, \quad (1.3)$$

где  $C$  – сцепление пород, МПа.

Разделив правую и левую часть выражения (1.3) на  $\sigma$ , получим

$$\frac{\tau}{\sigma} = \frac{C}{\sigma} + \operatorname{tg}\rho. \quad (1.4)$$

Правую часть уравнения (1.4) обозначим через  $f_1$ , тогда из (1.4) получим

$$\frac{\tau}{\sigma} = f_1, \quad (1.5)$$

что по смыслу аналогично выражению (1.2).

Опираясь на (1.2) и (1.4), можно записать

$$f_1 = \frac{C}{\sigma} + \operatorname{tg}\rho = \operatorname{tg}\beta_1.$$

М.М. Протодьяконов назвал угол  $\beta_1$  «кажущимся углом трения», а коэффициент  $f_1$  – «кажущимся коэффициентом трения», позднее – коэффициентом крепости.

## Классификация пород по крепости по М.М. Протодьяконову

| Категория крепости породы | Степень крепости породы  | Породы  | f   |
|---------------------------|--------------------------|---|-----|
| I                         | В высшей степени крепкие | Наиболее крепкие, плотные и вязкие кварциты, базальты. Исключительные по крепости другие породы   | 20  |
| II                        | Очень крепкие            | Порфир, очень крепкий гранит, кремнистый сланец, менее крепкие, нежели указанные выше, кварциты. Самые крепкие песчаники и известняки   | 15  |
| III                       | Крепкие                  | Гранит (плотный) и гранитовые породы. Очень крепкие песчаники и известняки. Кварцевые рудные жилы. Крепкий конгломерат. Очень крепкие железные руды                             | 10  |
| III                       | То же                    | Известняки (крепкие). Некрепкий гранит. Крепкие песчаники. Крепкий мрамор, доломит. Колчеданы   | 8   |
| IV                        | Довольно крепкие         | Обыкновенный песчаник. Железные руды  | 6   |
| IVa                       | То же                    | Песчанистые сланцы. Сланцеватые песчаники   | 5   |
| V                         | Средней крепости         | Крепкий глинистый сланец. Некрепкий песчаник и известняк; мягкий конгломерат  | 4   |
| Va                        | То же                    | Разнообразные сланцы (некрепкие). Плотный мергель   | 3   |
| VI                        | Довольно мягкие          | Мягкий сланец, очень мягкий известняк, мел, каменная соль, гипс. Мерзлый грунт, антрацит. Обыкновенный мергель. Разрушенный песчаник, сцементированная галька, каменистый грунт | 2   |
| VIa                       | То же                    | Щебенистый грунт. Разрушенный сланец, слежавшаяся галька и щебень. Крепкий каменный уголь, отвердевшая глина  | 1,5 |
| VII                       | Мягкие                   | Глина (плотная). Мягкий каменный уголь, крепкий нанос, глинистый грунт  | 1,0 |
| VIIa                      | То же                    | Легкая песчанистая глина, лесс, гравий  | 0,8 |
| VIII                      | Землистые                | Растительная земля. Торф. Легкий суглинок, сырой песок  | 0,6 |
| IX                        | Сыпучие                  | Песок осыпи, мелкий гравий, насыпная земля, добытый уголь   | 0,5 |
| X                         | Плывучие                 | Плывуны, болотистый грунт, разжиженный лёсс и другие разжиженные грунты   | 0,3 |

*Трещиноватость* – совокупность трещин в горной породе.

*Трещина* – плоский разрыв сплошности среды, величина которого на порядок и более превосходит межатомные расстояния в кристаллической решетке минералов ( $\sim 10^{-10}$  м).

По происхождению различают трещины:

- первичные (эндогенные), которые образовались в период формирования породы;
- вторичные (тектонические, экзогенные);
- трещины выветривания и трещины, вызванные горным давлением и ведением горных работ.

Пределы изменения параметров трещиноватости: протяженность трещин ( $10^{-9} - 10^5$  м); раскрытие трещин ( $10^{-9} - 1$  м); расстояние между трещинами ( $10^{-9} - 1$  м).



- *Хрупкость* – способность горных пород к разрушению под воздействием внешних сил без заметных пластических деформаций (не более 5% от деформации разрушения), выражаемая **коэффициентом хрупкости**. Его значения определяются как отношение удельной энергии упругого деформирования породы к удельной энергии разрушения при одноосном сжатии.
- *Абразивность* – способность породы изнашивать контактирующие с ней поверхности горных машин или оборудования в процессе их работы. Ее оценивают **показателем абразивности**, выражающем среднюю потерю в массе (в миллиграммах) стального цилиндрического стержня при его истирании о породу во время вращения с определенными параметрами скорости и времени вращения при заданной осевой нагрузке.

Эффективность разрушения горных пород и угля существенно зависит от их сопротивляемости при механическом воздействии в процессах бурения шпуров и скважин и выемки полезного ископаемого, т.е. от буримости и сопротивляемости угля резанию.

- *Буримость* – сопротивляемость породы проникновению в нее бурового инструмента. Ее характеризуют *скоростью бурения* (мм/мин), реже – *продолжительностью бурения* 1 м шпура (мин/м) при стандартных условиях проведения измерений для каждого типа буровой машины.
- *Сопротивляемость резанию* – характеристика сопротивления, оказываемого горной породной разрушению режущим инструментом. За показатель сопротивляемости угля резанию (кН/см) принято приращение силы резания на 1 см толщины стружки. Для пород в качестве критерия сопротивляемости резанию используют показатель контактной прочности, измеряемый в кН/мм<sup>2</sup> при вдавливании цилиндрического стального стержня в образец породы до момента ее хрупкого разрушения в стандартных условиях.
- *Взрываемость* – сопротивляемость горной породы разрушению под действием взрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ). Ее характеризуют различными показателями: удельным расходом ВВ (кг/м<sup>3</sup>); удельной затратой энергии ВВ (кДж/м<sup>3</sup>); максимальным значением линии наименьшего сопротивления (л.н.с.). По степени взрываемости горные породы применительно к крупномасштабной отбойке скважинными зарядами ВВ делятся на *легко-, средне-, трудновзрываемые, весьма трудновзрываемые и исключительно трудновзрываемые*. Показатели взрываемости используются для нормирования труда горнорабочих, проектирования взрывов, расчета расхода ВВ, технологии взрывания.
- *Выбор технологии разрушения горных пород определяется совокупностью природных свойств этих пород. Знание основных свойств позволяет применять наиболее эффективные и безопасные способы разрушения.*

## 2. Упругость, хрупкость и пластичность горных пород

Способность горных пород сопротивляться внешним механическим воздействиям устанавливается на специальных установках. В процессе испытаний по стандартным методикам определяются *деформационные, прочностные и реологические* показатели.

В зависимости от скорости нагружения породные образцы деформируются по-разному, в связи с чем достаточно условно говорят об их *упругих, хрупких или пластических* качествах.

Способность горных пород полностью восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки называется **упругостью**. График деформирования таких пород изображен на рис.

Чем быстрее прикладывается нагрузка к образцу, чем выше ее интенсивность, тем с большей отчетливостью проявляются упругие свойства горных пород.

Упругие деформации возникают при нагрузке и исчезают при разгрузке со скоростью звука для данной среды (горной породы). Однако во многих случаях имеет место замедленное исчезновение некоторой части упругих деформаций.

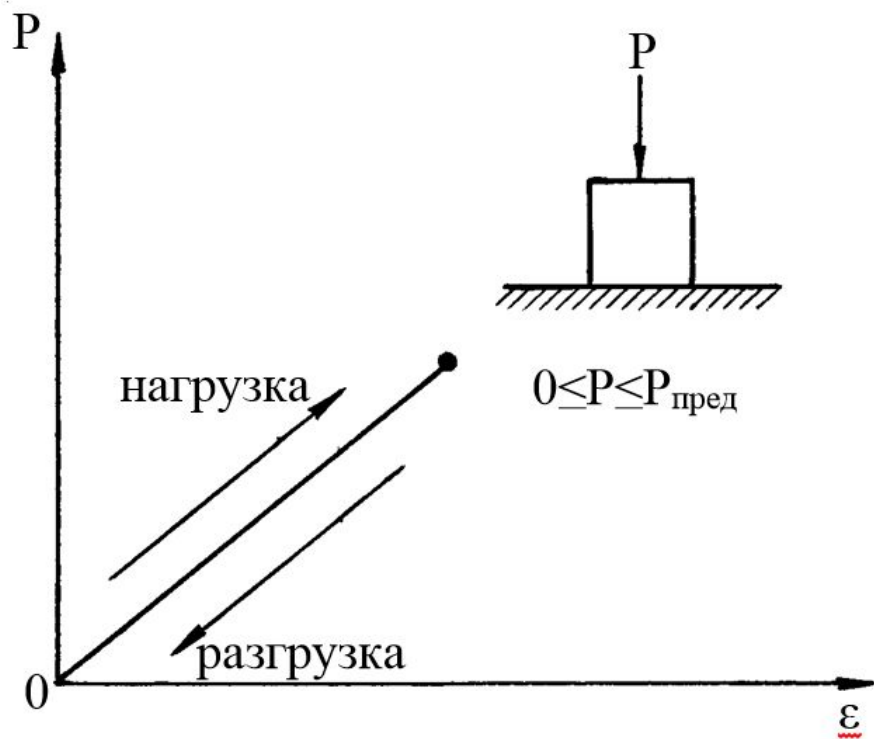


График упругого деформирования горных пород

Однако во многих случаях имеет место замедленное исчезновение некоторой части упругих деформаций. Это явление называют **упругим последствием**. После снятия нагрузки мгновенно исчезает только часть упругих деформаций, а для исчезновения же оставшейся части  $\varepsilon_{ост}$  требуется некоторое время, измеряемое часами, а иногда и сутками.

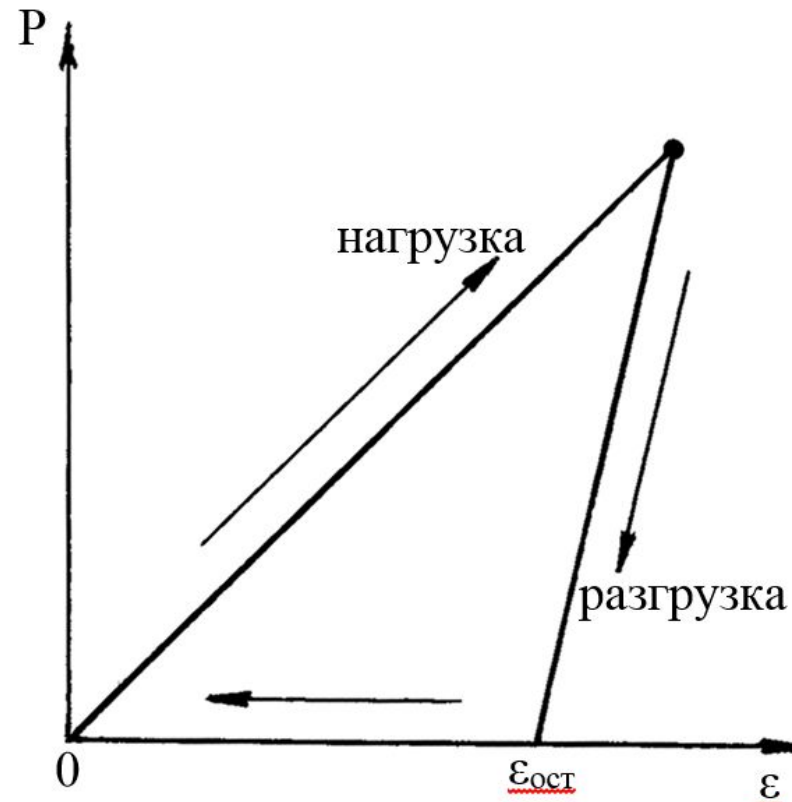
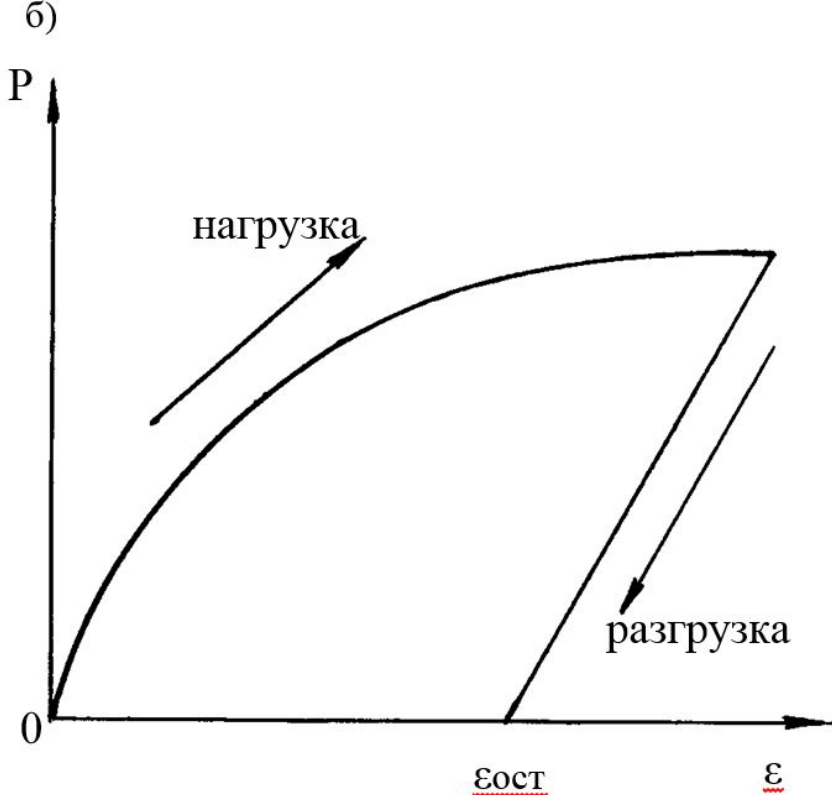
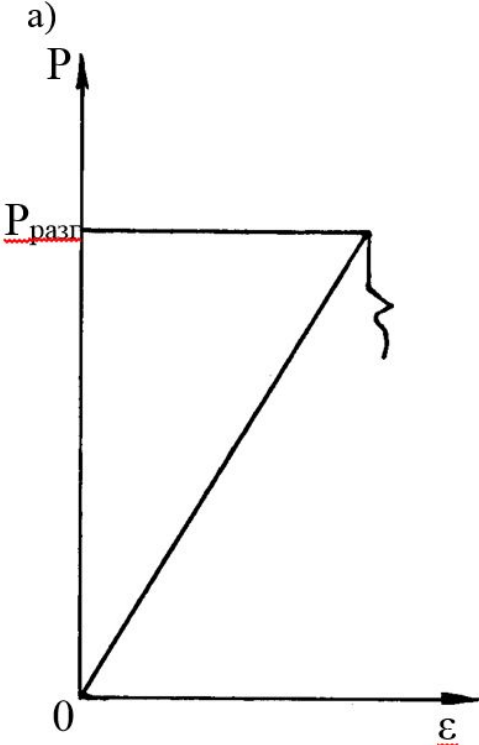


График упругого последствия

Хрупкости обычно противопоставляют понятие **пластичности**, под которой понимают способность горных пород приобретать необратимые (остаточные) деформации после снятия нагрузки.

Следует отметить, что деление горных пород на упругие и пластичные весьма условно: в зависимости от уровня и скорости нагружения одни и те же породные образцы проявляют как упругие, так и пластические свойства.



Хрупкость (а) и пластичность (б) горных пород

Для количественной оценки хрупкости (пластичности) горных пород общепринятых критериев не существует, хотя предложений в этой области достаточно много. 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 на одноосное растяжение  $R_p$  к величине предела прочности на одноосное сжатие  $R_c$

$$\Psi = \frac{R_p}{R_c}.$$

Коэффициент 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 влажных глин  $\Psi = 0,9$ , для аргиллитов  $\Psi = 0,33$ , для крепких песчаников  $\Psi = 0,1$ . Подавляющее большинство твердых пород имеют коэффициент хрупкости, равный, примерно, 0,1.



### 3. Деформационные характеристики горных пород

Способность горных пород упруго деформироваться характеризуется такими показателями, как модуль упругости –  $E$  (модуль Юнга), коэффициент Пуассона –  $\mu$  и модуль сдвига –  $G$ .

**Модуль упругости** представляет собой отношение величины нормального напряжения  $\sigma$  к величине соответствующей продольной относительной деформации  $\varepsilon$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}.$$

**Коэффициент Пуассона** – это отношение относительной поперечной  $\varepsilon'$  к относительной продольной деформации  $\varepsilon$

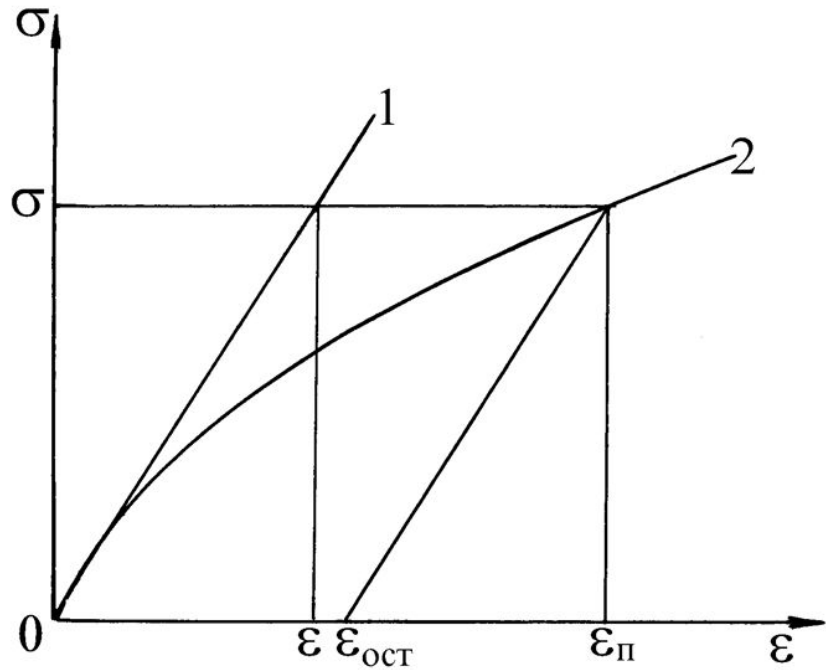
$$\mu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}.$$

**Модуль сдвига** зависит от двух предыдущих характеристик и определяется по следующей формуле:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}.$$

Величина  $\mu$  изменяется для различных материалов в пределах от 0 до 0,5 (0 – абсолютно жесткое тело; 0,5 – жидкость).





Определение модуля упругости (1) и модуля деформации (2)

Эти упругие константы определяются в процессе лабораторных испытаний горных пород. Нагружение образца производят по циклической схеме «нагрузка-разгрузка». При этом от цикла к циклу уменьшается доля пластических деформаций и модуль упругости, определенный для последнего цикла нагружения, лучше отражает упругие свойства горной породы. Величина его будет несколько больше, чем для модуля, рассчитанного по первому циклу.

В связи с тем, что реальная зависимость между напряжениями и деформациями для горных пород является криволинейной и пластические деформации появляются зачастую сразу же после нагружения, возникла необходимость введения понятия **модуля деформации**  $E_0$ , равного отношению величины нормального напряжения к полной относительной продольной деформации, включая остаточную (см. кривая 2)

$$E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\text{п}}}$$

По величине модуль упругости для одного и того же породного образца несколько больше модуля деформации ( $E > E_0$ ).