

# **Основы инженерно-геологической характеристики и оценки дисперсных грунтов –рыхлые несвязные и глинистые связные породы (продолжение).**

- 1. Физические и водные свойства.**
- 2. Механические свойства.**

# Главнейшими физическими свойствами песчаных и глинистых пород являются плотность, пористость и влажность.

Плотность минеральной части

$$\rho_s = g_1/v_1$$

Плотность породы  

$$\rho = (g_1 + g_2) / (v_1 + v_2)$$

Плотность сухих частиц  
 (плотность скелета)  

$$\rho_d = g_1 / (v_1 + v_2) = \rho / 1+W$$

Плотность породы под водой  

$$\rho' = (\rho_s - 1) / (1 - n)$$

Влажность весовая  

$$W = g_2/g_1$$

Пористость и коэффициент пористости  

$$n = 1 - m = 1 - \rho_d / \rho_s$$
  

$$e = n / (1 - n) = \rho_s / \rho_d - 1$$

ТАБЛИЦА VIII-2  
 Средняя плотность некоторых типов песчаных и глинистых пород

Наименование пород	Район	Плотность минеральной части, г/см <sup>3</sup>	Плотность породы, г/см <sup>3</sup>	Плотность скелета, г/см <sup>3</sup>
Кембрийские глины	Ленинград	2,74	2,16	1,90
Верхнедевонские глины	р. Свирь	2,85	2,18	1,86
Нижнекаменноугольные глины	Нелидово	2,67	2,07	1,72
Верхнекаменноугольные глины	Москва	2,60	2,05	1,72
Аргиллиты казанского яруса	Левшино	2,75	2,10	1,78
Аргиллиты татарского яруса	Воткинск	2,76	2,14	1,81
Глины татарского яруса	р. Шексна	2,77	2,08	1,72
Верхнеюрские (келловой) глины	Ярославль	2,66	1,88	1,41
Верхнеюрские (кимеридж) глины	Москва	2,78	1,84	1,32
Нижнемеловые (готерив) глины	Ульяновск	2,70	1,92	1,47
Нижнемеловые (апт) глины	»	2,70	1,95	1,52
Верхнемеловые (сантон) глины	р. Дон	2,59	1,84	1,36
Палеогеновые (киевские) глины	Волгоград	2,53	1,80	1,33
Палеогеновые спондиловые глины	Киев	2,75	1,90	1,47
Майкопские глины	Волгоград	2,70	1,80	1,27
Нижнесарматские глины	Севастополь	2,70	1,74	1,17
Меотические глины	Одесса	2,74	2,01	1,61
Хвалынские глины	Волгоград	2,77	1,92	1,44
Моренные суглинки московского горизонта	р. Нева	2,69	2,21	1,95
Моренные суглинки валдайского горизонта	»	2,70	2,15	1,82
Иольдиевые глины	р. Выг	2,75	1,78	1,20
Ленточные глины	Ленинград	2,72	1,91	1,44
Лёсс	Запорожье	2,62	1,48	1,36
Озерно-ледниковые пески тонко- и мелкозернистые	Ленинград	2,66	1,99	1,59
Озерно-ледниковые пески средне- и крупнозернистые	»	2,65	1,70	1,60
Литоринные пески тонко- и мелкозернистые	»	2,66	1,97	1,58
Литоринные пески средне- и крупнозернистые	»	2,65	1,90	1,67
Аллювиальные пески	р. Москва	2,66	1,65	1,35
Аллювиальные пески	р. Ока	2,65	1,60	1,39
Флювиогляциальные пески	Мытищи	2,66	1,72	1,56
Эоловые пески	Казахстан	2,70	1,71	1,55
»	Астрахань	2,74	1,63	1,42
Морские пески	Черное море	2,63	1,66	1,38

Формулы списать!  
 На следующем слайде!

# Основные показатели физического состояния песчано – глинистых пород

Плотность минеральной части  $\rho_s = g_1/v_1$

Плотность породы  $\rho = (g_1 + g_2) / (v_1 + v_2)$

Плотность сухих частиц (плотность скелета)  
 $\rho_d = g_1 / (v_1 + v_2) = \rho / 1+W$

Плотность породы под водой  $\rho' = (\rho_s - 1) / (1 - n)$

Влажность весовая  $W = g_2/g_1$

Пористость и коэффициент пористости  $n = 1 - m = 1 - \rho_d / \rho_s$   
 $e = n/(1-n) = \rho_s / \rho_d - 1$

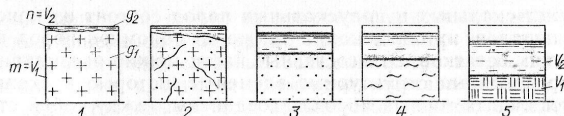


Рис. III-1. Схематическое изображение соотношения объема минеральной части (скелета)  $m$  и объема пор  $n$  в единице объема горных пород.  
 1 – скальные; 2 – полускальные; 3 – рыхлые несвязные; 4 – мягкие связные; 5 – торф.

(см. лекцию 3)

**Плотность породы характеризует плотность её сложения и позволяет косвенно судить о прочности, деформируемости и устойчивости.**

**ТАБЛИЦА VIII-3**  
**Плотность наиболее типичных песчаных и глинистых пород в естественных условиях залегания**

Породы	Состояние	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Плотность скелета, г/см <sup>3</sup>
Пески гравелистые, крупно- и среднезернистые	Плотное сложение	>1,85	>1,70
То же	Средней плотности	1,65—1,85	1,55—1,70
»	Рыхлое сложение	<1,65	<1,55
Пески мелкозернистые, тонкозернистые, супесь легкая	Плотное сложение	>1,75	>1,65
То же	Средней плотности	1,60—1,75	1,50—1,65
»	Рыхлое сложение	<1,60	<1,50
Глины, суглинки, супеси тяжелые	Уплотненные	1,70—2,20	1,35—1,90
То же	Мягкие	1,10—1,70	0,80—1,35

Пористость песчаных и глинистых пород зависит от их дисперсности, отсортированности и однородности, плотности сложения, степени и характера цементации коллоидами, солями, растительными остатками, а в обломочных породах глинистым веществом.

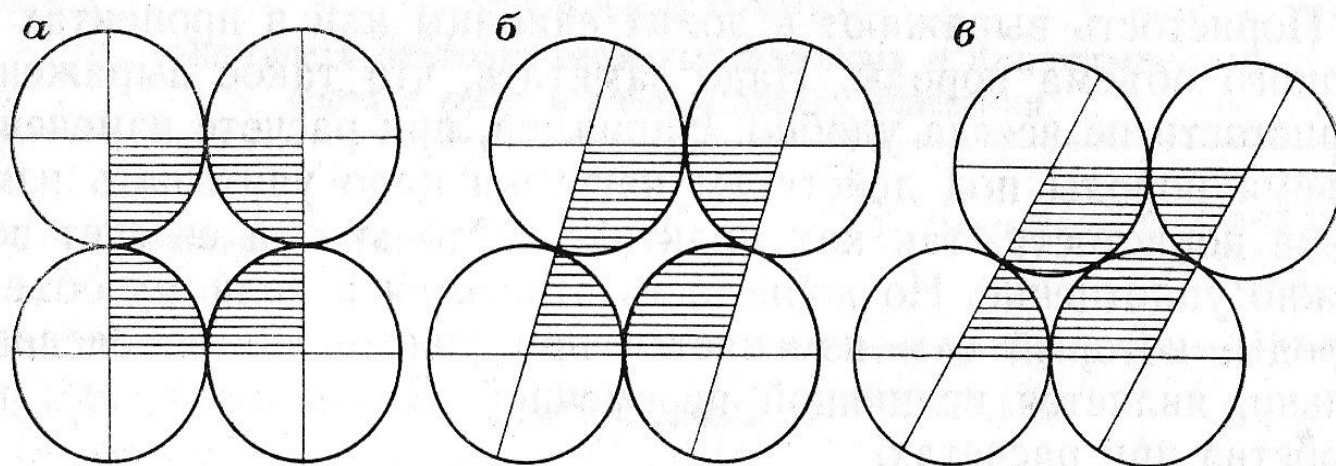


Рис. VIII-1. Изменение пористости породы, состоящей из равновеликих частиц шарообразной формы, в зависимости от плотности их сложения.  
*a* — наиболее рыхлое сложение ( $n=48\%$ ;  $e=0,92$ ); *б* — средней плотности сложение ( $n=40\%$ ;  $e=0,67$ ); *в* — наиболее плотное сложение ( $n=26\%$ ;  $e=0,35$ ).

*a* — кубическая укладка частиц;

*б, в* — тетраэдрическая укладка частиц

Пористость песчаных и глинистых пород изменяется в широких пределах, обычно она больше 20%. По сравнению со скальными и полускальными породами песчаные и глинистые породы высокопористые.

ТАБЛИЦА VIII-4

Пористость и коэффициент пористости некоторых типов песчаных и глинистых пород

Породы	Пористость, %	Коэффициент пористости
Кембрийские глины	30	0,43
Верхнедевонские глины	32	0,47
Нижнекаменноугольные глины	34	0,52
Верхнекаменноугольные глины	34	0,52
Вапны казанского яруса	33	0,49
Аргиллиты татарского яруса	34	0,52
Глины татарского яруса	38	0,61
Верхнеюрские (келловей) глины	47	0,89
Верхнеюрские (кимеридж) глины	52	1,10
Нижнемеловые (готерив) глины	46	0,85
Нижнемеловые (апт) глины	44	0,78
Верхнемеловые (сантон) глины	48	0,92
Палеогеновые (киевские) глины	47	0,89
Палеогеновые спондиловые глины	44	0,78
Майкопские глины	53	1,12
Нижнесарматские глины	56	1,28
Меотические глины	43	0,76
Хвалынские глины	48	0,92
Моренные суглинки московского горизонта	28	0,39
Моренные суглинки валдайского горизонта	32	0,47
Иольдиевые глины	57	1,33
Ленточные глины	47	0,89
Лёсс	48	0,92
Озерно-ледниковые пески тонко- и мелкозернистые	38	0,61
Озерно-ледниковые пески средне- и крупнозернистые	39	0,64
Литориновые пески тонко- и мелкозернистые	40	0,67
Литориновые пески средне- и крупнозернистые	39	0,64
Аллювиальные пески (Ергени)	42	0,73
Морские пески	43	0,76

Важнейшей характеристикой физического состояния песчаных и глинистых пород является их весовая влажность, определяемая сушкой при постоянной температуре 105°C.

Влажность характеризуется количеством воды, заполняющей поровое пространство и равняется отношению массы испарившейся воды к массе сухого вещества породы

$$W = g_2 / g_1 = \rho / \rho_d - 1,$$

соответственно полная влагоёмкость породы

$$W_{\Pi} = 1 / \rho_d - 1 / \rho_s = n / \rho_s (1-n)$$

Для характеристики степени насыщения пород водой служит коэффициент водонасыщения, отражающий отношение естественной влажности к их полной влагоёмкости

$$G = W / W_{\Pi} = W \rho_s / e_0 \rho_v \text{ (обычно } \rho_v = 1 \text{ г/см}^3\text{)}.$$

Для маловлажных пород  $G = 0 \dots 0.5$ ;

для влажных  $G = 0.5 \dots 0.8$ ;

для насыщенных  $G = 0.8 \dots 1$

**Формулы списать!**

состояния глинистых пород служит их консистенция, которая характеризует подвижность глинистых частиц при определённой влажности под воздействием внешних усилий

ТАБЛИЦА VIII-6  
Форма консистенции глинистых пород

Консистенция	Состояние консистенции	Название по СНиП	Признаки консистенции	Пределы консистенции
Текучая	Состояние породы	Норм. ая название	Порода растекается ким слоем под в нием собственного	Характерные показатели влажности
	Вязко-текучее	Текуче-пластичная	Порода растекается тол-стым слоем под влия-нием собственного веса	
Пла-стичная	Липко-пластичное	Мягко-пластичная	Порода под действием внешней силы легко принимает различ-ную форму и сохраняет ее после устранения усилий, не изменяя при этом своего объёма, но прилипает к по-сторонним предметам	Предел текучести $(W_L)$ Предел липкости
	Вязко-пластичное	Туго-пластичная	Порода под действием внешней силы прини-мает различную форму и сохраняет ее после устранения усилий, не изменяя при этом свое-го объёма, и не прили-пает к посторонним предметам	
Твердая	Полутвер-дое	Полутвер-дая	Порода под действием внешней силы после явно выраженных пла-стических деформа-ций покрывается тре-щинами, нарушается ее сплошность, проис-ходит хрупкопласти-ческое разрушение	Предел пластич-ности $(W_p)$ Предел усадки
	Твердое	Твердая	Порода под действием внешней силы после явно выраженных уп-ругих деформаций хрупко разрушается, раскалывается с нару-шением сплошности	



**Консистенция зависит от вязкости породы, т. е. внутреннего сопротивления перемещению частиц породы в определённом объёме.**

**Вязкость и консистенция проявляются только при их деформации.**

**Консистенция во многом зависит от минерального состава глинистой породы, а также от состава и минерализации поровой воды.**

ТАБЛИЦА VIII-8

Пределы пластичности глинистых пород в зависимости от их минерального состава и состава обменных катионов (по Р. Е. Гриму [1967 г.])

Типы глин по минеральному составу	Предел текучести, %						Предел пластичности, %						Число пластичности, %						
	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Li <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Li <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Li <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	
Монтмориллонитовая:																			
шт. Миссисипи	344	161	638	214	166	158	93	57	80	75	65	59	251	104	558	139	101	99	
шт. Аризона	443	125	565	114	155	199	89	57	59	75	65	51	354	98	506	39	90	148	
Южная Дакота	700	297	600	323	177	162	97	60	60	60	63	53	603	237	540	263	104	109	
Иллинойс	280	108	292	140	123	138	86	76	82	74	79	73	194	32	210	66	44	65	
Гидрослюдистая:																			
Иллинойс	61	81	68	82	90	83	34	43	41	42	40	39	27	38	27	40	50	44	
Огайо	59	72	63	60	69	71	34	40	38	37	36	35	25	32	25	23	33	36	
Иллинойс	75	72	89	76	100	98	41	41	40	39	42	43	34	31	49	37	58	55	
Каолинитовая:																			
Иллинойс	52	69	67	75	73	60	26	38	33	34	36	30	26	31	34	41	37	30	
Джорджия	29	35	37	35	34	39	28	28	28	28	26	28	1	7	9	7	8	11	

**Обычно консистенцию характеризуют определёнными влажностями. Эти характерные влажности называют пределами консистенции.**

ТАБЛИЦА VIII-7

Пределы пластичности некоторых типов глинистых пород

Породы	Район	Предел текучести, %	Предел пластичности, %	Число пластичности, %
Кембрийские глины	Ленинград	33	20	13
Девонские глины	р. Свирь	25	16	9
Каменноугольные глины	Нелидово	46	24	22
Вапны казанского яруса	Левшино	31	21	10
Глины татарского яруса	Шексна	42	22	20
Верхнеюрские (келловей) глины	Ярославль	74	40	34
Верхнеюрские (кимеридж) глины	Москва	83	46	37
Нижнемеловые (готерив) глины	Алатырь	55	31	24
Майкопские глины	Волгоград	78	41	37
Хвалынские глины	»	64	27	37
Иольдиевые глины	Маткожня	39	23	16
Ленточные глины	Ленинград	37	19	18
Моренные суглинки валдайского горизонта	р. Нева	18	14	4
Моренные суглинки московского горизонта	»	22	15	7
Пойменные суглинки Волги	Ульяновск	49	25	24
Пойменные суглинки Камы	Воткинск	51	28	23
Лёссовидные суглинки	Запорожье	32	16	16

Для ориентировочного суждения о состоянии глинистых пород часто используют показатель консистенции

$$I_L = (W - W_P) / (W_L - W_P),$$

соответственно применяя нормативную классификацию  
ГОСТ 25100 - 97

Предел текучести соответствует влажности, при которой глинистая порода при нарушении сложения переходит из пластичного состояния в текучее, т. е. становится вязкой жидкостью.

Предел пластичности соответствует влажности, при которой глинистая порода при нарушении сложения из полутвёрдого состояния переходит в пластичное.

Между пределами текучести и пластичности глинистые породы находятся в пластичном состоянии, т. е. под действием внешней силы способны принимать различную форму и сохранять её после устранения этой силы, не изменяя объёма<sup>10</sup>

# Для оценки песчаных пород как основания, среды или материала для различных сооружений первостепенное значение имеет определение плотности их сложения

глины имеют показатель чувствительности, измеряемый десятками и даже сотнями единиц.

**Относительная плотность песчаных пород.** Для оценки песчаных пород как основания, среды или материала для различных сооружений первостепенное значение имеет определение плотности их сложения. Выше уже отмечалось, что деформации песчаных и других обломочных пород или нарушение их устойчивости связаны главным образом с недостаточной плотностью сложения. Плотность сложения пород определяется их пористостью. Абсолютное значение пористости песков может изменяться в довольно широких пределах в зависимости от взаимного расположения и плотности укладки частиц, их слабокций. Поэтому при оценке плотности сложения песчаных пород кроме пористости и коэффициента пористости дополнительно определяют относительную плотность сложения. Для этого сравнивают плотность песка естественного сложения, выраженную через  $e_0$ , с плотностями, соответствующими его наиболее рыхлому и наиболее плотному сложению. Численно относительная плотность песчаных пород определяется отношением

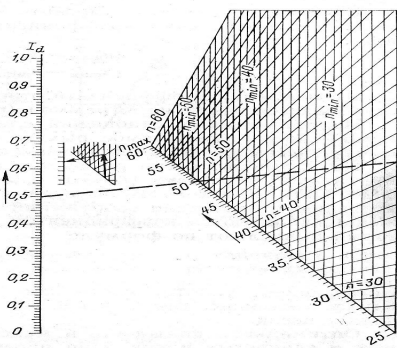


Рис. VIII-3. Номограмма для вычисления коэффициента относительной плотности песчаных пород.  
Пример. Дано  $e_{\min} = 25\%$ ;  $e = 40\%$ ;  $e_{\max} = 50\%$ . Находим точку пересечения прямой  $e_{\min} = 25\%$  (вертикальная) и прямой  $e = 40\%$  (наклонная). Эту точку соединим с отметкой 50 на шкале  $e_{\max}$  и в пересечении со шкалой  $I_d$  читаем ответ — 0,5.

$$I_d = \frac{e_{\max} - e_0}{e_{\max} - e_{\min}}$$

где  $e_{\max}$  — коэффициент пористости песка при самом рыхлом сложении (определяется путем насыщения рыхлого сухого песка в мерный цилиндр);  $e_0$  — коэффициент пористости песка естественного сложения;  $e_{\min}$  — коэффициент пористости песка при самом плотном сложении (определяется путем трамбования до постоянного объема).

**Относительная плотность песчаных пород определяется отношением:**

$$I_d = (e_{\max} - e_0) / (e_{\max} - e_{\min}), \text{ где}$$

$e_{\max}$  — коэффициент пористости песка при самом рыхлом сложении (определяется при простом наполнении мерного цилиндра сухим песком);

$e_{\min}$  — коэффициент пористости песка при самом плотном сложении (определяется трамбованием до постоянного объема);

$e_0$  — коэффициент пористости песка естественного сложения.

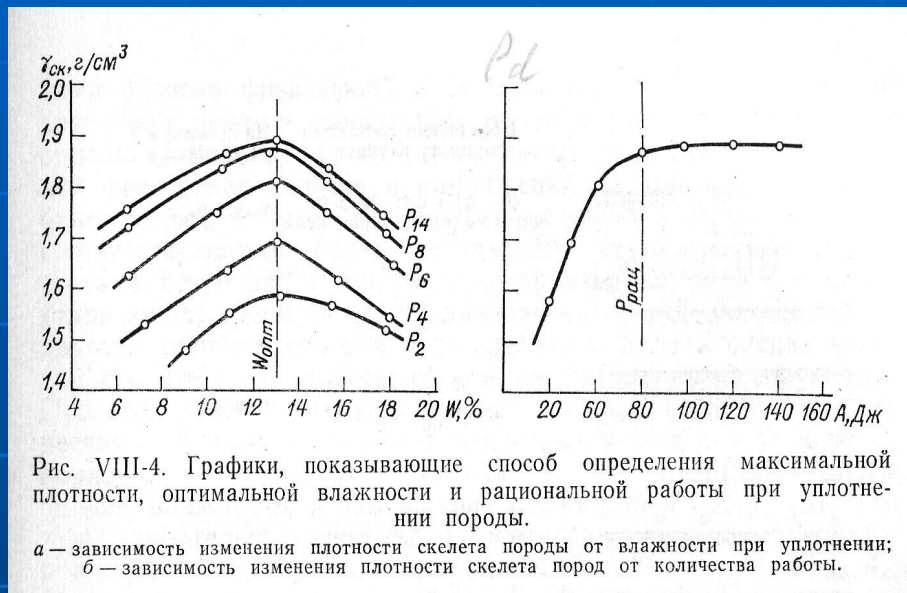


Рис. VIII-4. Графики, показывающие способ определения максимальной плотности, оптимальной влажности и рациональной работы при уплотнении породы.

а — зависимость изменения плотности скелета породы от влажности при уплотнении; б — зависимость изменения плотности скелета пород от количества работы.

**Для оценки способности песков к уплотнению в основании сооружений или в теле земляных сооружений используют коэффициент уплотняемости песков:**

$$U = (e_{\max} - e_{\min}) / e_{\max}$$

Чем ближе этот показатель к 1, тем большей способностью к уплотнению обладает песок

По плотности пески разделяют на:

- плотные  $I_d = 0.66...1.0$ ;

-средней плотности  $I_d = 0.33... 0.66$ ;

-рыхлые  $I_d = 0...0.33$ .

# Для песчаных и глинистых пород верхних горизонтов земной коры можно выделить несколько типов режима физического состояния в зависимости от условий обводнения и напряжённого состояния

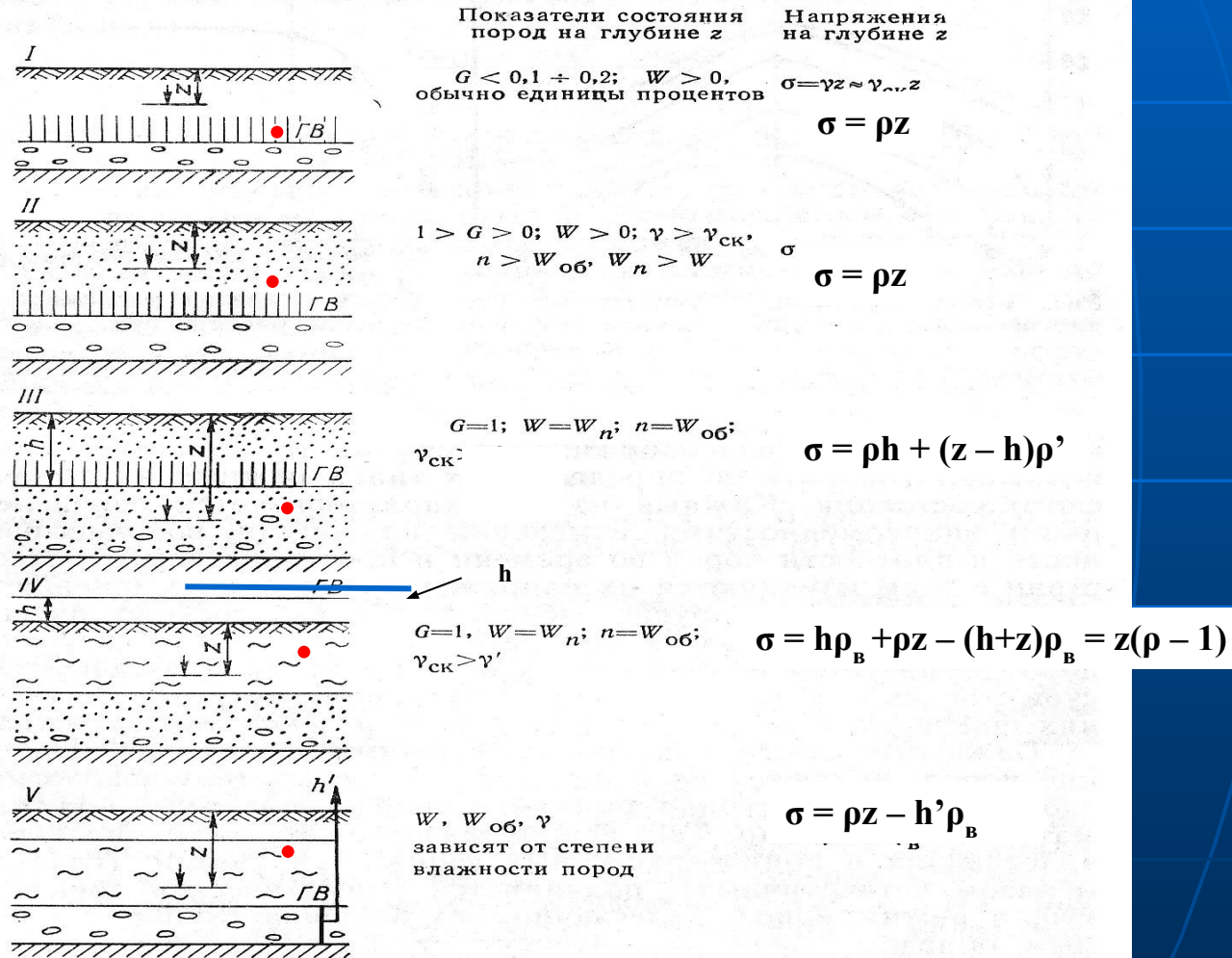


Рис. VIII-5. Типовые схемы режима физического состояния песчаных и глинистых пород.

I — порода сухая; песчаная порода выше уровня грунтовых вод; II — влажная; любая порода выше уровня грунтовых вод; III — насыщена водой; любая порода ниже уровня грунтовых вод; IV — насыщена водой; любая порода на участке затопления; V — влажная или насыщенная; глинистая порода выше уровня напорных подземных вод.

# Главнейшими водными свойствами песчаных и глинистых пород являются водоустойчивость, влагоёмкость, капиллярность и водопроницаемость.

## Размокание

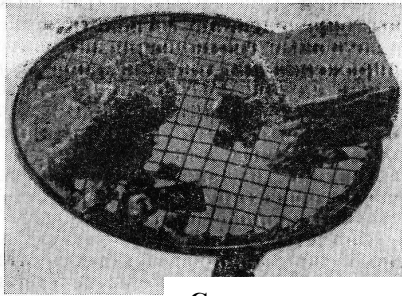


Рис. VIII-6. Характерный песок

Самыми водонепроницаемыми породами являются лёссы и сильно пылеватые глинистые породы

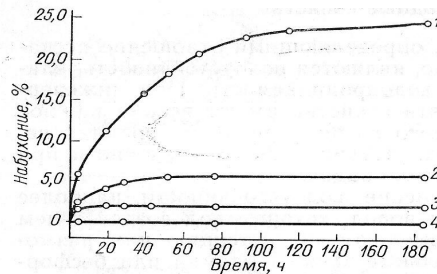


Рис. VIII-7. Набухание некоторых глинистых пород и тонкозернистого кварцевого песка (маршаллита).

1 — огланлинский бентонит; 2 — кембрийская глина; 3 — глуховский каолинит; 4 — маршаллит.

## Набухание

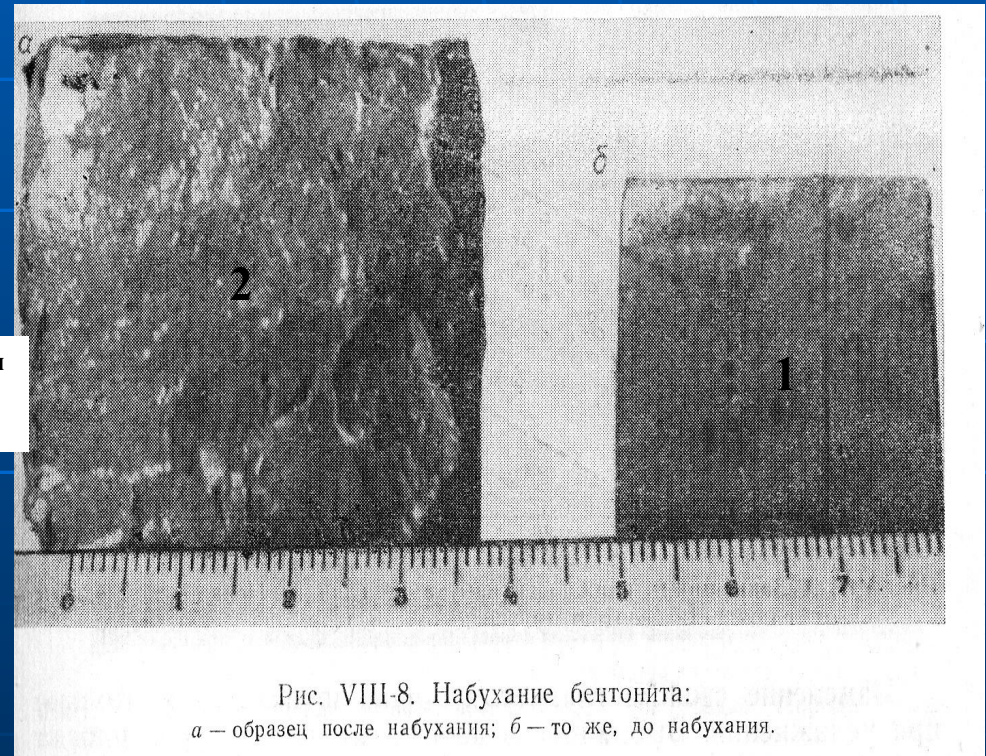


Рис. VIII-8. Набухание бентонита:  
а — образец после набухания; б — то же, до набухания.

Некоторые разновидности глинистых пород при набухании увеличивают объём на 25 – 30%, а давление набухания может достигать 0.1...1.5 МПа. Особенно сильно набухают монтмориллонитовые глины (бентонит).

# Под влагоёмкостью породы понимается её способность вмещать и удерживать определённое количество воды.

Различают породы:

- влагоёмкие (глины и суглинки);
- средне влагоёмкие (супеси, пески мелкозернистые и тонкозернистые;
- невлагоёмкие (пески, галечники, щебень).

Применительно к породам невлагоёмким следует говорить об их водоёмкости, т. е. способности вмещать

определённое количество воды.

У влагоёмких пород различают влагоёмкость полную, капиллярную и молекулярную

Водоотдачей обладают неглинистые песчаные, гравийные, щебенистые породы и галечники. Она зависит от состава пород и продолжительности их дренирования.

Водоотдача пород примерно равна разности между полной их влагоёмкостью и максимальной молекулярной

$$W_{\text{отд.}} = W_{\text{п}} - W_{\text{мм}}$$

ТАБЛИЦА VIII-13  
Максимальная молекулярная и полная влагоёмкость пород различного минерального состава

Породы	Максимальная молекулярная влагоёмкость, %	Полная влагоёмкость, %
Монтмориллонитовая глина (бентонит огланлинский)	44	71
Гидрослюдистая глина (глина кембрийская)	14	29
Каолинистая глина (каолин глуховский)	22	43
Маршаллит (тонкозернистый кварцевый песок)	2	25

ТАБЛИЦА VIII-14  
Максимальная молекулярная влагоёмкость фракций разной крупности (по А. Ф. Лебедеву [1927 г.]

Фракции	Размер фракций, мм	Максимальная молекулярная влагоёмкость, %	
Песчаные:	крупнозернистые	1—0,5	1,6
	среднезернистые	0,5—0,25	1,6
	мелкозернистые	0,25—0,10	2,7
	тонкозернистые	0,10—0,05	9,8
	Пылеватые (алеуритовые)	0,05—0,002	10,2
Глинистые	<0,002	44,2	

**Мелкозернистые, тонкозернистые пески и глинистые породы могут увлажняться за счёт капиллярных сил выше уровня грунтовых вод. Зона капиллярного поднятия может достигать поверхности земли и вызывать заболачивание.**

ТАБЛИЦА VIII-16

Высота капиллярного поднятия в однородных песках (по Аттербергу)

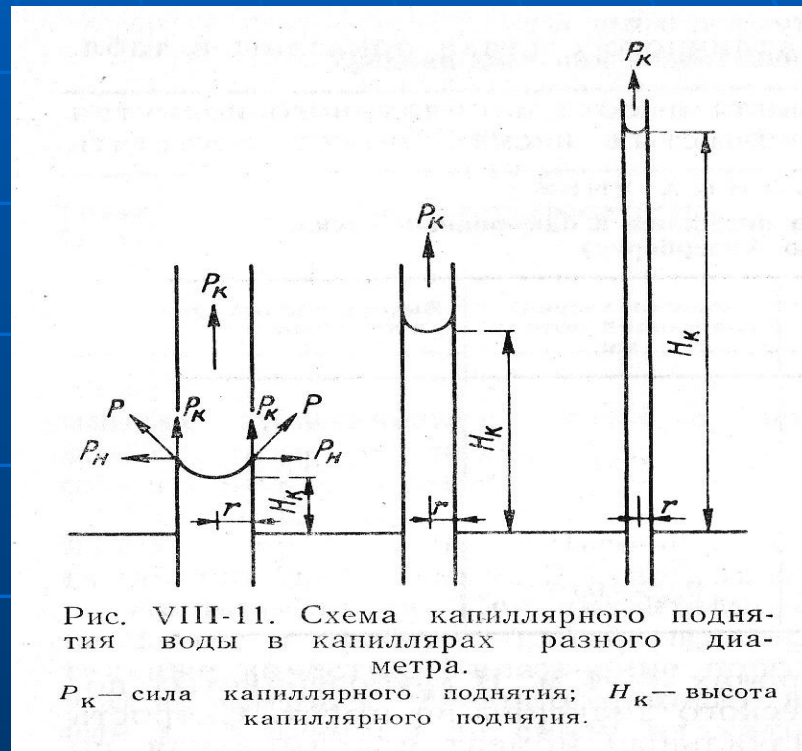
Породы	Размер частиц, слагающих породу, мм	Высота капиллярного поднятия, см
Гравий мелкий	5—2	2,5
Песок:		
грубозернистый	2—1	6,5
крупнозернистый	1—0,5	13,1
среднезернистый	0,5—0,2	26,4
мелкозернистый	0,2—0,1	42,8
тонкозернистый	0,1—0,05	105,5
Алеврит	0,05—0,02	200,0

1,5—2 м, а в глинистых породах 3—4 м. В грубозернистых породах она мала и практического значения не имеет. Скорость капиллярного поднятия в начальный момент максимальная, но затем постепенно уменьшается и при наибольшей высоте становится ничтожно малой.

ТАБЛИЦА VIII-17

Высота капиллярного поднятия для некоторых разностей глинистых пород (по Ф. П. Саваренскому)

Породы	Достигнутая высота, см	Число дней	Скорость, см/сут	
			в первые сутки	в последующие сутки
Суглинок	160,6	85	73,0	0,2
Глина	90,7	25	27,0	2,5
»	99,5	25	64,0	0,5
»	153,6	114	59,3	0,2
»	125,0	207	74,3	0,05
Суглинок легкий	196,0	207	73,0	0,1



Сила капиллярного поднятия определяется по формуле Лапласа

$$P_K = 2\sigma/r, \text{ где}$$

$\sigma$ — поверхностное натяжение воды (7.5 Па);

$r$ — радиус капилляра

**К числу основных водных свойств горных пород относится водопроницаемость, т. е. способность пропускать через себя воду под действием напора**

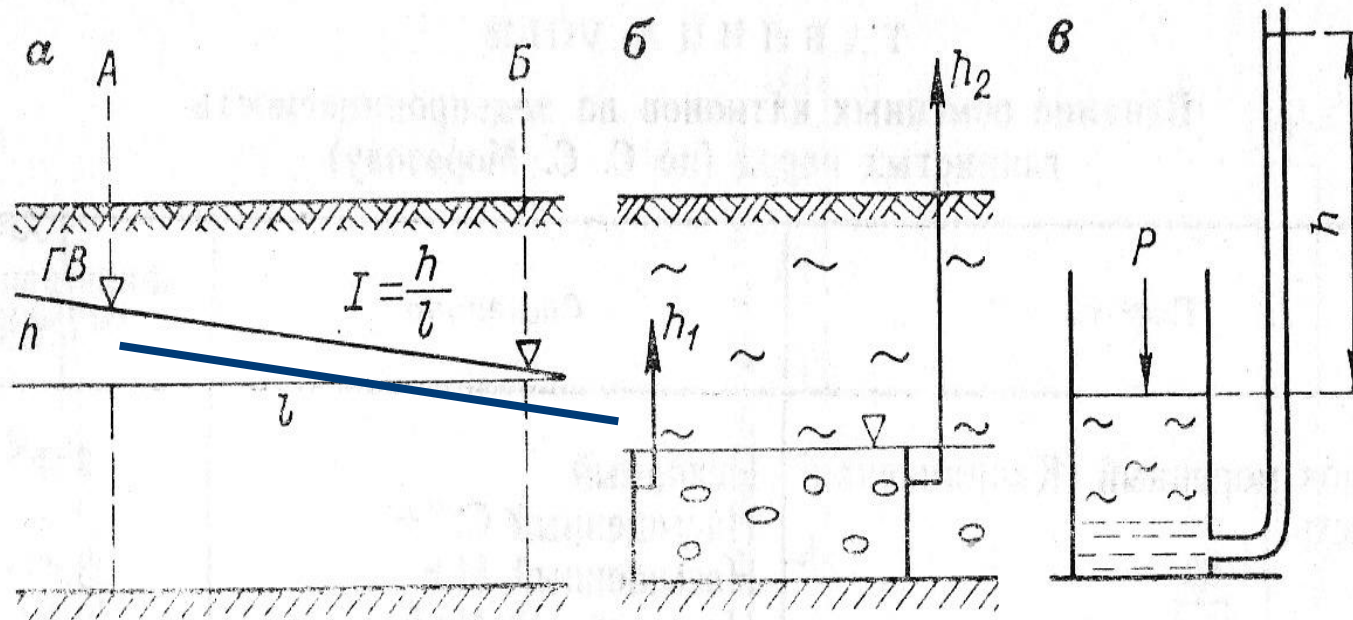


Рис. VIII-15. Возникновение напора воды  $h$  в песчаных и глинистых породах.

$a$  — в результате разности уровней воды в разных точках горизонта грунтовых вод;  
 $б$  — в результате разности пьезометрических уровней в разных точках напорного водоносного горизонта;  $в$  — в результате действия нагрузки.



Скорость движения воды через пористые породы прямо пропорциональна гидравлическому градиенту, т. е. отношению действующего напора к длине пути фильтрации

Важнейший закон водопроницаемости песчаных и глинистых пород – закон ламинарной (плоскопараллельной) фильтрации:

$$V = Q/F \text{ или } Q = k_{\phi} \times F \times I$$

$$\text{при } F = 1 \text{ и } I = 1$$

$$k_{\phi} = Q \text{ м}^3/\text{сут}$$

Скоростное выражение коэффициента фильтрации (см. лекцию 3)

$$Q/F = V = k_{\phi} \times I$$

$$\text{при } I = 1$$

$$V = k_{\phi} \text{ м/сут}$$

$Q$  – количество фильтрующейся воды.  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;

$F$  – площадь поперечного сечения породы,  $\text{м}^2$ .

Действительная площадь фильтрации воды  $F_d < F$ , так как часть сечения породы занята агрегатами и и частицами, отсюда действительный коэффициент фильтрации

$$k_{\phi.d.} = k_{\phi.} / n, \text{ где}$$

$n$  – пористость породы в долях единицы

# Характеристики водопроницаемости необходимы для проектирования дренажных мероприятий любых территорий

## Permeability

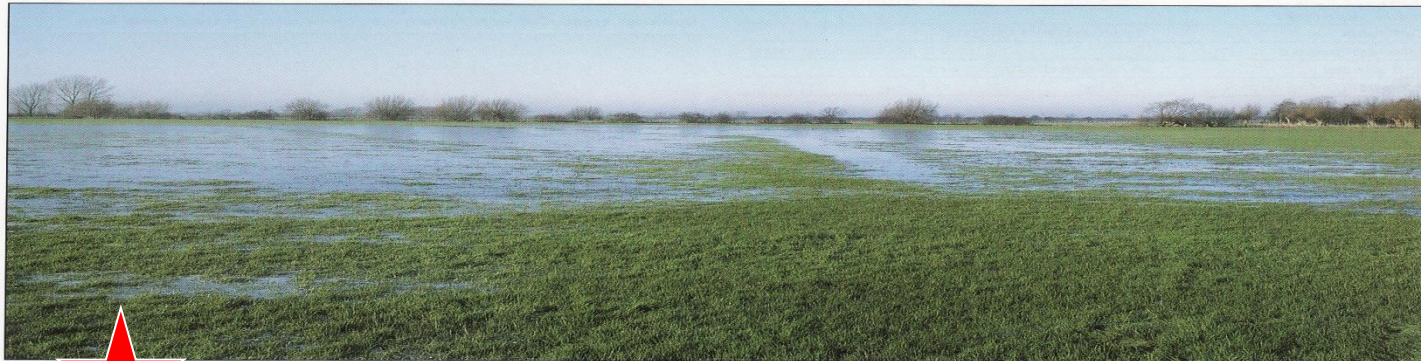
Knowledge of the permeability characteristics of soil is required for many construction projects in which drainage is an important feature. In many applications the use of a flow-net analysis together with permeability data, enables the rate of seepage of water through or under a structure to be estimated, and seepage pressures to be calculated. Permeability is a major parameter used in the design and assessment of landfill sites and the investigation of contaminated ground.

## Why Measure Permeability?

**DETERMINE DRAINAGE CHARACTERISTICS**  
**DESIGN OF LANDFILL SITES**  
**INVESTIGATION OF CONTAMINATED LAND**  
**DESIGN OF EARTH DAMS AND SHEET-PILE WALLS**  
**GROUNDWATER LOWERING FEASIBILITY**

### Types of Laboratory Test

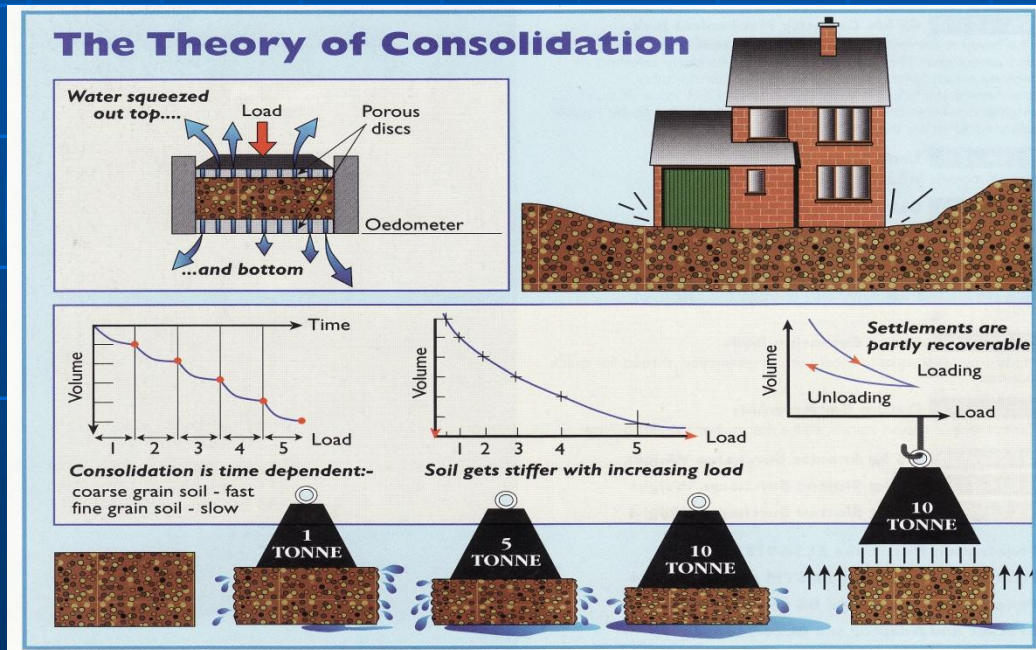
**Constant Head**, for soils of high permeability, such as sands  
**Falling Head**, for soils of intermediate and low permeability, such as silts and clays



## Permeability and Drainage Characteristics of Main Soil Types

		coefficient of permeability m/s												
		k = 1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-11</sup>	10 <sup>-12</sup>
<b>Drainage Characteristics</b>		GOOD					POOR			PRACTICALLY IMPERVIOUS				
<b>Permeability Classification</b>		HIGH		MEDIUM		LOW		VERY LOW		PRACTICALLY IMPERMEABLE				
<b>General Soil Type</b>		GRAVELS		CLEAN SANDS		FISSURED AND WEATHERED CLAYS VERY FINE OR SILTY SANDS				INTACT CLAYS				
<b>Test Methods:-</b>	Direct	Large CH cell		Standard CH cell		FH cell					FH in Oedometer			
	Indirect	X		Computation from PSD				X					From consolidation data	
		<b>CH</b> = Constant Head				<b>FH</b> = Falling Head				<b>PSD</b> = Particle Size Distribution Analysis				

Механические свойства горных пород определяют их поведение под воздействием внешних усилий – нагрузки. В песчано-глинистых породах под влиянием внешних усилий происходит изменение внутреннего сложения и объёма, т. е. уменьшение пористости и увеличение концентрации частиц в единице объёма. В лаборатории этот процесс моделируется в компрессионных камерах (одометрах).



## Внимание!

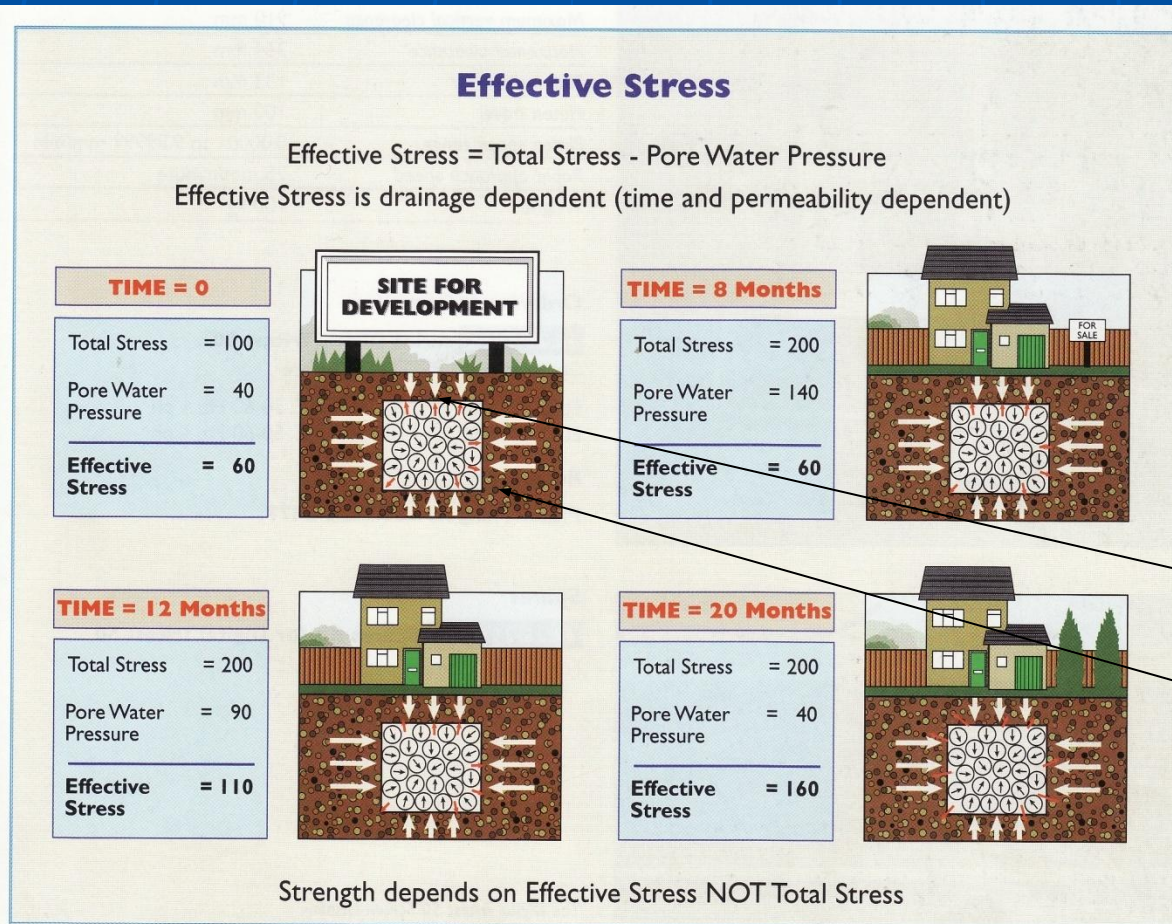
Когда под влиянием внешних усилий возникают касательные напряжения, превышающие силы сопротивления сдвигу, породы начинают разрушаться, наступает потеря прочности.

Следовательно, механические свойства песчано-глинистых пород, как и любых других, характеризуются их деформируемостью и прочностью!

Под влиянием внешней нагрузки породы находятся в напряжённом состоянии. Если породы водонасыщены, напряжения в них могут быть подразделены на два вида:

- действующие в поровой воде;
- непосредственно передающиеся на скелет породы.

Поровое давление, возникшие под действием внешней нагрузки, постепенно рассеивается, что определяется водопроницаемостью породы.



**Внимание!**

Только эффективное напряжение действует на скелет породы, вызывая её сжатие и уплотнение!

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$$

В условиях обводнения и движения поровой воды на напряжённое состояние породы влияет фактор гидродинамического давления (см. схему).

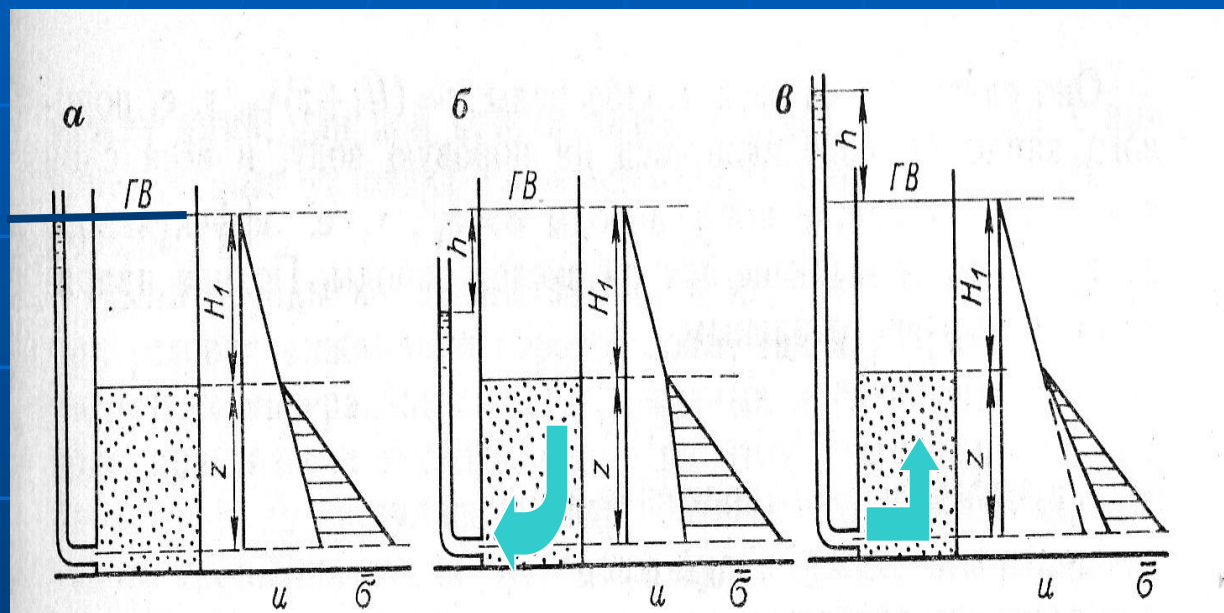


Рис. VIII-18. Распределение напряжений в водонасыщенных породах.  
 а — эффективное и поровое давление при стационарном положении воды в приборе,  $u = (H_1 + z)\gamma_B$ ,  $\bar{\sigma} = z\gamma'$ ; б — при движении воды сверху вниз,  $u = (H_1 + z - h)\gamma_B$ ,  $\bar{\sigma} = z\gamma' + D_{ГД}$ ,  $D_{ГД} = \frac{H_1 + z - h}{z}\gamma_B$ ; в — при движении воды снизу вверх,  $u = (H_1 + z + h)\gamma_B$ ,  $\bar{\sigma} = z\gamma' - D_{ГД}$ ,

$$D_{ГД} = \frac{H_1 + z + h}{z}\gamma_B$$

Поровое давление

$$U = (H_1 + z)\rho_B$$

Эффективное давление

$$\sigma' = z\gamma'$$

Полные напряжения

$$\sigma = U + \sigma'$$

В случае движения воды

$$\sigma = U + \sigma' \pm D_{ГД}$$

В условиях объёмного сжатия, рассматривая горные породы как линейно деформируемые тела, зависимость между напряжениями  $\sigma_z$ ,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и соответствующими им относительными деформациями определяется из теории сопротивления материалов.

$$\varepsilon_z = 1/E_0[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

$$\varepsilon_x = 1/E_0[\sigma_x - \mu(\sigma_z + \sigma_y)]$$

$$\varepsilon_y = 1/E_0[\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)]$$

Параметры, входящие в эти уравнения:

- Модуль общей деформации  $E_0$
  - Коэффициент Пуассона  $\mu$
- являются количественными характеристиками механических свойств пород, т. е. их способности деформироваться при сжатии.



Модуль общей деформации

$$E_0 = \sigma_z / \varepsilon_z$$

Коэффициент Пуассона (поперечного расширения)

$$\mu = \varepsilon_y / \varepsilon_z \quad (0,27...0,42)$$

## По компрессионным данным:

Модуль общей деформации определяют полевыми и лабораторными испытаниями и вычисляют по формуле

$$E_0 = \beta (1 + e_1) / a, \quad \text{где}$$

$E_0$  – модуль общей деформации, МПа;

$e_1$  – коэффициент пористости, соответствующий по компрессионной кривой нагрузке  $\sigma_1$ ;

$a$  – коэффициент сжимаемости, 1/МПа, определяемый по компрессионной кривой в интервале нагрузок  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ ;

$\beta$  – множитель для перехода к условиям объёмного сжатия:

- для песков 0,76;
- для супесей 0,72;
- для суглинков 0,57;
- для глин 0,43

$$\beta = 1 - 2\mu^2 / (1 - \mu)$$

# Сопротивление песчано-глинистых пород сдвигу.

Сопротивление сдвигу характеризует прочность  
песчаных и глинистых пород, т. е. их  
способность сопротивляться разрушению.

Последнее выражается в нарушении  
сплошности породы по одной или нескольким  
поверхностям скольжения или ослабления.

Разрушение породы наступает тогда, когда  
касательные напряжения превышают  
внутренние силы сопротивления.



# Сопротивление сдвигу песчаных и глинистых пород зависит от ряда факторов, но главным образом от нормального уплотняющего давления.

Для песчаных и вообще рыхлых несвязных пород эта зависимость была установлена Кулоном в 1773 году и имеет вид

$$\tau = \operatorname{tg}\varphi \times \sigma_n$$

В общем виде, в данном уравнении может появиться параметр  $C$ , характеризующий начальное сопротивление сдвигу и обусловленное явлениями зацепления зёрен и обломков друг за друга, с затратой сдвигающих усилий на опрокидывание, вращение и перемещение в зоне сдвига (дилатансия):

$$\tau = \operatorname{tg}\varphi \times \sigma_n + C$$

Это математическое выражение закона Кулона справедливо и для глинистых пород, только здесь параметр линейности  $C$  обусловлен всеми видами структурных связей.

Если обе части приведённого уравнения разделить на  $\sigma_n$ , а отношение  $\tau/\sigma_n$  обозначить через  $\operatorname{tg}\psi$ , то

$$\operatorname{tg}\psi = \tau/\sigma_n = f + C/\sigma_n,$$

где  $\operatorname{tg}\psi$  - коэффициент сдвига.

Для песчаных пород  $\operatorname{tg}\psi$  величина постоянная и равная коэффициенту внутреннего трения, для глинистых пород  $\operatorname{tg}\psi$  величина переменная: с увеличением нормального уплотняющего давления он уменьшается.

Существенное влияние на сопротивление сдвигу оказывает поровое давление, поэтому

$$\text{для песчаных пород } \tau = f(\sigma_n - u),$$

$$\text{для глинистых пород } \tau = C + f(\sigma_n - u),$$

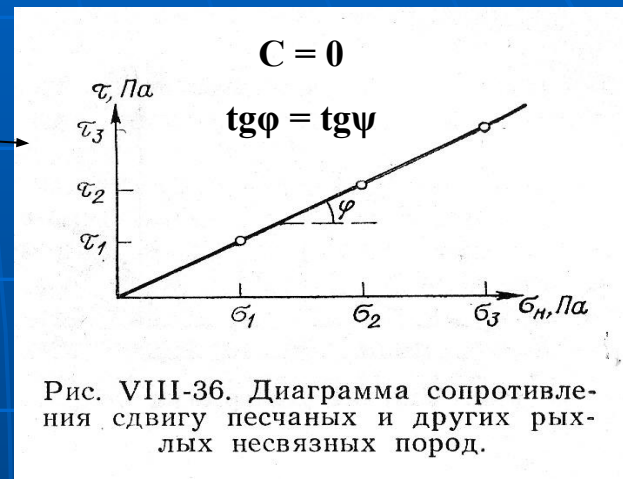


Рис. VIII-36. Диаграмма сопротивления сдвигу песчаных и других рыхлых несвязных пород.

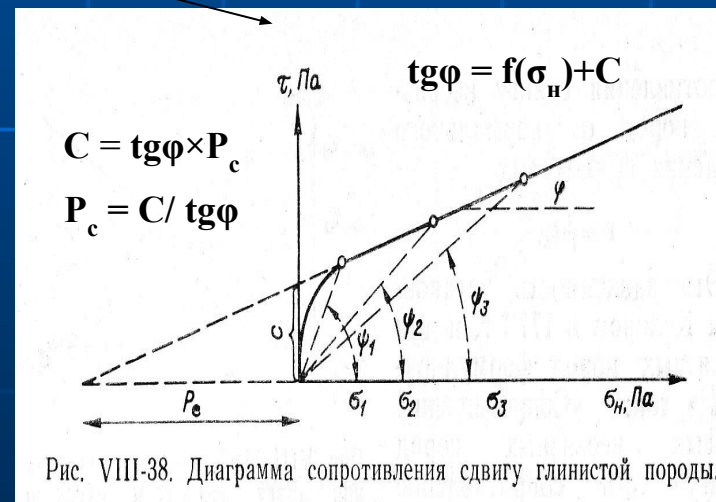
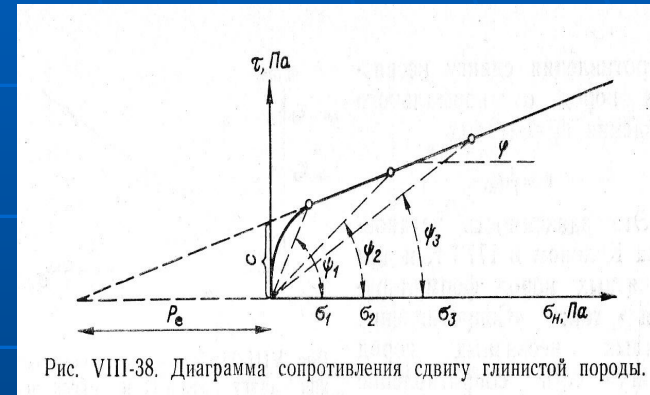


Рис. VIII-38. Диаграмма сопротивления сдвигу глинистой породы.

$P_c$  – прочность структурных связей<sup>25</sup>

# Основные уравнения прочности песчано – глинистых пород (по теории Кулона)



$$\tau = \operatorname{tg}\varphi \times \sigma_{\text{н}} \quad (\text{для песчаных пород})$$

$$\tau = \operatorname{tg}\varphi \times \sigma_{\text{н}} + C \quad (\text{для глинистых пород})$$

$$\operatorname{tg}\psi = \tau / \sigma_{\text{н}} = f + C / \sigma_{\text{н}}$$

(обобщённый параметр – коэффициент сдвига переменная величина для глинистых пород и постоянная для песчаных)

$$\tau = f(\sigma_{\text{н}} - u) \quad (\text{для песчаных пород с учётом порового давления})$$

$$\tau = C + f(\sigma_{\text{н}} - u) \quad (\text{для глинистых пород с учётом порового давления})$$

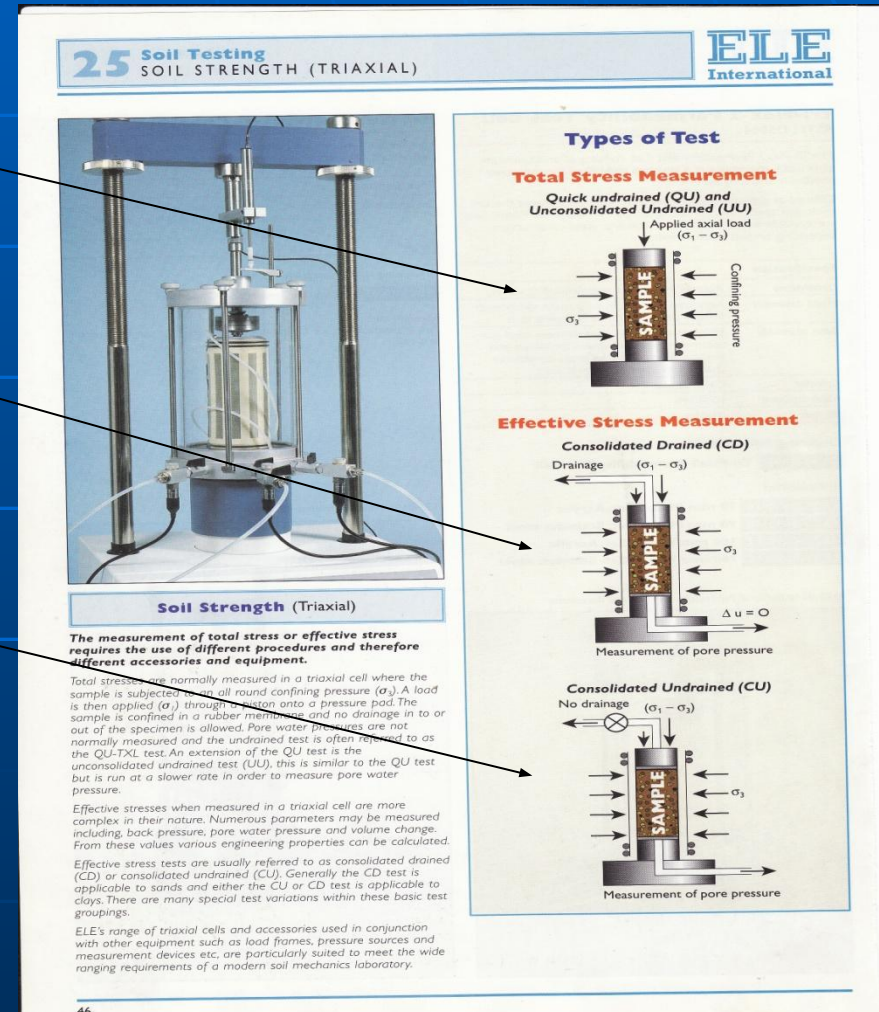
# Показатели сопротивления сдвигу существенно зависят от режима испытаний и прежде всего от способа подготовки, проведения и условий дренирования пород

Испытания по схеме быстрого сдвига без предварительного уплотнения, при уплотняющих нагрузках не превышающих структурной прочности пород, природного давления или веса сооружения.

Испытания по схеме медленного сдвига в условиях свободного оттока воды (открытая система) и завершённой консолидации, при уплотняющих давлениях, соизмеримых с весом сооружения.

Испытания в условиях невозможности оттока воды (закрытая система) с замером порового давления. Реализация уравнения  $\tau = C + f(\sigma_n - u)$

Существуют специальные схемы испытаний пород в срезных приборах, моделирующие различное состояние пород и условия их взаимодействия с сооружениями (схема Н. Н. Маслова, схема А. А. Ничипоровича).

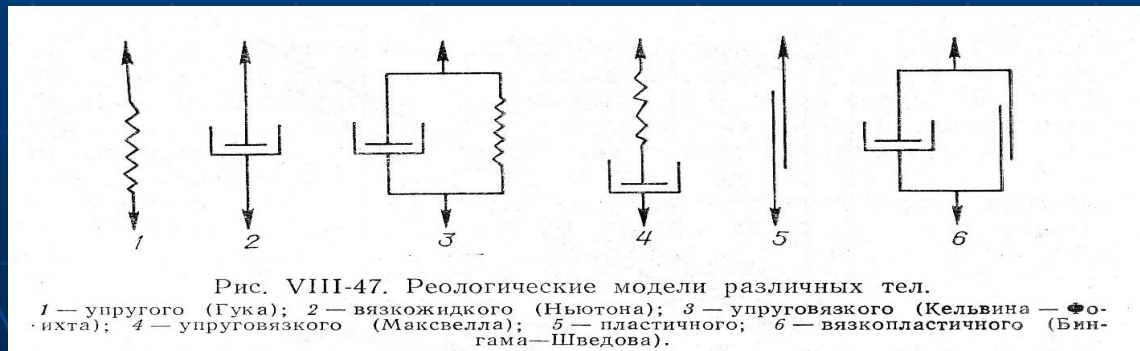


# Механические свойства глинистых пород, как и большинства полускальных пород, зависят от изменения напряжённо-деформируемого состояния во времени.

## Это реологические свойства!

- Способность медленно пластически деформироваться при неизменном напряжённом состоянии, часто при нагрузках, меньших, чем разрушающие (ползучесть).
- Уменьшение (расслабление) напряжения, необходимого для поддержания постоянной деформации породы (релаксация).
- Способность снижать прочность при увеличении времени воздействия нагрузки (длительная прочность).

Реологические свойства определяются тем обстоятельством, что глинистые породы занимают промежуточное положение между жидко-или вязкотекучими и твёрдыми телами, что может быть наглядно представлено в виде различных моделей!



Механические свойства песчано-глинистых пород тесно связаны со всей историей их формирования и развития в земной коре, где они переходят из одной зоны в другую, постепенно утрачивая одни признаки и приобретая новые.

Таким образом, показатели физико-механических свойств песчано-глинистых пород следует всегда рассматривать в тесной связи со степенью их литификации.

## Инженерно-геологическая классификация глинистых пород (по В. Д. Ломтадзе, 1984)

Степень литификации	W, %	$\rho_d$ 3 г/см	n, %	tg $\psi$	E <sub>0</sub> , МПа	Примечание
<b>I</b> Предельно малая	> 75...80	0.6...0.8	75...80	< 0.2	Доли МПа	Тиксотропия
<b>II</b> Малая	До 75...80	(0.6...0.8) – (1.35...1.4)	(40...45) – (75...80)	< 0.2	Единицы МПа	Ползучесть
<b>III</b> Умеренная	(12...14) – (25...30)	1.35...1.9	25...45	0.2...0.4	10...20	Ползучесть Замедленная консолидация
<b>IV</b> Высокая	(3...4) – (12...15)	1.9...2.5	(4...5) – (25...30)	> 0.4	Десятки МПа	Большой период релаксации напряжений

**Основы инженерно-геологической характеристики и оценки техногенных грунтов (см. лекция 3 «Инженерно-геологическая классификация горных пород», слайды 1 - 6)**

**Проработать самостоятельно указанную тему и представить в виде реферата, используя библиографические источники:**

- 1. А. Б. Фадеев. Инженерная геология и гидрогеология. Учебное пособие. СПб ГАСУ, СПб, 2004. Раздел 11.7, с. 94.**
- 2. В. Д. Ломтадзе. Инженерная геология. Инженерная петрология. Л: Недра, 1984, раздел IX-6, с.469 – 472.**

## При изучении указанной темы следует учитывать следующие основные определения (ГОСТ 25100 – 97)

**Техногенные грунты** — естественные грунты, измененные и перемещенные в результате производственной и хозяйственной деятельности человека, и антропогенные образования.

**Антропогенные образования** — твердые отходы производственной и хозяйственной деятельности человека, в результате которой произошло коренное изменение состава, структуры и текстуры природного минерального или органического сырья.

**Природные перемещенные образования** — природные грунты, перемещенные с мест их естественного залегания, подвергнутые частично производственной переработке в процессе их перемещения.

**Природные образования, измененные в условиях естественного залегания**, — природные грунты, для которых средние значения показателей химического состава изменены не менее чем на 15 %.

**Грунты, измененные физическим воздействием**, — природные грунты, в которых техногенное воздействие (уплотнение, замораживание, тепловое воздействие и т.д.) изменяет строение и фазовый состав.

**Грунты, измененные химико-физическим воздействием**, — природные грунты, в которых техногенное воздействие изменяет их вещественный состав, структуру и текстуру.

**Насыпные грунты** — техногенные грунты, перемещение и укладка которых осуществляются с использованием транспортных средств, взрыва.

**Намывные грунты** — техногенные грунты, перемещение и укладка которых осуществляются с помощью средств гидромеханизации.

**Бытовые отходы** — твердые отходы, образованные в результате бытовой деятельности человека.

**Промышленные отходы** — твердые отходы производства, полученные в результате химических и термических преобразований материалов природного происхождения.

**Шлаки** — продукты химических и термических преобразований горных пород, образующиеся при сжигании.

**Шламы** — высокодисперсные материалы, образующиеся в горнообогатительном, химическом и некоторых других видах производства.

**Золы** — продукты сжигания твердого топлива.

**Золошлаки** — продукты комплексного термического преобразования горных пород и сжигания твердого топлива.



**Основы инженерно-геологической характеристики и оценки мёрзлых пород (см. лекция 3 «Инженерно-геологическая классификация горных пород», слайды 1 - 6)**

**Проработать самостоятельно указанную тему и представить в виде реферата, используя библиографические источники:**

- 1. А. Б. Фадеев. Инженерная геология и гидрогеология. Учебное пособие. СПб ГАСУ, СПб, 2004. Раздел 15, с. 115 - 120.**
- 2. В. Д. Ломтадзе. Инженерная геология. Инженерная петрология. Л: Недра, 1984, раздел IX-5, с.457 – 469.**

# При изучении указанной темы следует учитывать следующие основные определения (ГОСТ 25100 – 97)

**Грунт мерзлый** — грунт, имеющий отрицательную или нулевую температуру, содержащий в своем составе видимые ледяные включения и (или) лед-цемент и характеризующийся криогенными структурными связями.

**Грунт многолетнемерзлый** (синоним — грунт вечномерзлый) — грунт, находящийся в мерзлом состоянии постоянно в течение трех лет и более.

**Грунт сезонномерзлый** — грунт, находящийся в мерзлом состоянии периодически в течение холодного сезона.

**Грунт морозный** — скальный грунт, имеющий отрицательную температуру и не содержащий в своем составе лед и незамерзшую воду.

**Грунт сыпучемерзлый** (синоним — «сухая мерзлота») — крупнообломочный и песчаный грунт, имеющий отрицательную температуру, но не сцементированный льдом и не обладающий силами сцепления.

**Грунт охлажденный** — засоленный крупнообломочный, песчаный и глинистый грунты, отрицательная температура которых выше температуры начала их замерзания.

**Грунт мерзлый распученный** — дисперсный грунт, который при оттаивании уменьшает свой объем.

**Грунт твердомерзлый** — дисперсный грунт, прочно сцементированный льдом, характеризуемый относительно хрупким разрушением и практически несжимаемый под внешней нагрузкой.

**Грунт пластичномерзлый** — дисперсный грунт, сцементированный льдом, но обладающий вязкими свойствами и сжимаемостью под внешней нагрузкой.

**Температура начала замерзания (оттаивания)  $T_{bf}(T_h)$**  — температура, °С, при которой в порах грунта появляется (исчезает) лед.

**Криогенные структурные связи грунта** — кристаллизационные связи, возникающие во влажных дисперсных и трещиноватых скаль-

ных грунтах при отрицательной температуре в результате сцементирования льдом.

**Криогенная текстура** — совокупность признаков сложения мерзлого грунта, обусловленная ориентировкой, относительным расположением и распределением различных по форме и размерам ледяных включений и льда-цемента.

**Лед** (синоним — грунт ледяной) — природное образование, состоящее из кристаллов льда с возможными примесями обломочного материала и органического вещества не более 10 % (по объему), характеризующееся криогенными структурными связями.

**Коэффициент сжимаемости мерзлого грунта  $\delta_f$ , кПа<sup>-1</sup>**, — относительная деформация мерзлого грунта под нагрузкой.

**Степень заполнения объема пор мерзлого грунта льдом и незамерзшей водой  $S_r$** , д.е., определяется по формуле

$$S_r = \frac{(1,1w_{ic} + w_w)\rho_s}{e_f\rho_w}, \quad (\text{A.9})$$

где  $w_{ic}$  — влажность мерзлого грунта за счет порового льда, цементирующего минеральные частицы (лед-цемент), д.е.;

$w_w$  — влажность мерзлого грунта за счет содержащейся в нем при данной отрицательной температуре незамерзшей воды, д.е.;

$\rho_s$  — плотность частиц грунта, г/см<sup>3</sup>;

$e_f$  — коэффициент пористости мерзлого грунта;

$\rho_w$  — плотность воды, принимаемая равной 1 г/см<sup>3</sup>.

**Суммарная льдистость мерзлого грунта  $i_{tot}$** , д.е., — отношение содержащегося в нем объема льда к объему мерзлого грунта. Определяется по формуле

$$i_{tot} = i_i + i_{ic} = \frac{\rho_f(w_{tot} - w_w)}{\rho_i(1 + w_{tot})}. \quad (\text{A.10})$$

**Льдистость грунта за счет видимых ледяных включений  $i_i$** , д.е., — отношение содержащегося в нем объема видимых ледяных включений к объему мерзлого грунта. Определяется по формуле

$$i_i = \frac{\rho_s(w_{tot} - w_w)}{\rho_i + \rho_s(w_{tot} - 0,1w_w)}. \quad (\text{A.11})$$

где  $i_{ic}$  — льдистость грунта за счет льда-цемента (порового льда), д.е.;

$w_{tot}$  — суммарная влажность мерзлого грунта, д.е.;

$\rho_i$  — плотность льда, принимаемая равной 0,9 г/см<sup>3</sup>;

$\rho_f$  — плотность мерзлого грунта, г/см<sup>3</sup>;

$w_w$  — влажность мерзлого грунта, расположенного между ледяными включениями, д.е.