

Санкт-Петербургский государственный университет

Геологический факультет

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА
И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ЗАСОЛЕННЫХ ГРУНТОВ**

Методические указания

**Санкт-Петербург
1997**

Утверждено на заседании кафедры
грунтоведения и инженерной геологии
в качестве методических указаний

Составитель канд. геол.-минер. наук Н. П. Иваникова
Рецензент канд. геол.-минер. наук Т. Г. Полищук

Содержание

Введение	1
I. Особенности методов определения физических свойств	4
1. Определение влажности	—
2. Определение плотности твердых частиц	—
II. Определение гранулометрического состава	8
1. Общие сведения	—
2. Микроагрегатная схема подготовки	10
3. Дисперсная схема подготовки	—
III. Определение физико-химических свойств	11
IV. Определение физико-механических свойств	12
V. Фильтрационные исследования	17
VI. Определение скрытой просадочности	22
Литература	23

Санкт-Петербургский государственный университет

Геологический факультет

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАСОЛЕННЫХ ГРУНТОВ

Методические указания

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на большой объем научных исследований, посвященных методам изучения засоленных грунтов, эти вопросы в настоящее время являются нерешенными. Существующие разработки и рекомендации по определению и расчету показателей свойств этих грунтов, во-первых, относятся преимущественно к грунтам с однородным засолением, а во-вторых, нередко являются противоречивыми и недостаточно объективными.

Особую сложность представляют исследования состава и свойств грунтов, в состав которых входят легко-, средне- и труднорастворимые соли, т.е. со смешанным засолением. Для отработки методов исследования последних необходимо учитывать свойства солей и, в первую очередь, их растворимость, оказывающую влияние как на величину показателей свойств грунтов, так и на методику их определения.

Известно, что легкорастворимые соли при значительной концентрации оказывают дегидратирующее и коагулирующее влияние на глинистые грунты, снижая значения их характерных влажностей: гигроскопической, максимальной молекулярной влагоемкости, пределов пластичности и других, и уменьшая показатели их физико-химических свойств. В то же время, механические свойства грунтов, особенно при содержании легкорастворимых солей в твердой фазе, могут существенно повыситься. При возможности выщелачивания этих солей физико-механические свойства грунтов будут изменяться в противоположном направлении. Выщелачивание солей обычно сопровождается значительным повышением водопроницаемости и дополнительной осадкой грунта.

При определении физико-механических свойств грунтов, содержащих **легкорастворимые соли**, надо учитывать:

- 1) возможность завышения плотности твердых частиц при определении ее стандартным методом за счет растворения солей;
- 2) коагуляцию суспензий при определении гранулометрического состава грунта, что требует при значительном содержании солей их отмычки, так как влияние даже такого сильного диспергатора, как пирофосфат натрия, в таких случаях может быть подавлено;
- 3) завышение пределов и числа пластичности при определении их с использованием дистиллированной воды в случае высокого содержания солей;
- 4) возможность изменения водопроницаемости и механических свойств при использовании различных растворов: дистиллированной воды, растворов солей различной концентрации.

Влияние **среднерастворимых солей** (гипса) на свойства грунтов проявляется при небольшом их содержании менее заметно, чем влияние легкорастворимых солей. Однако при высоком содержании этих солей (20–30%) роль их в формировании свойств грунтов значительно возрастает.

Так как гипс ввиду сравнительно низкой растворимости присутствует в грунте в основном в твердом виде, то он, с одной стороны, заметно уменьшает плотность твердых частиц грунта, так как плотность гипса ($2,32 \text{ г}/\text{см}^3$) значительно меньше, чем плотность аллюмосиликатов, а с другой стороны, повышает плотность скелета и снижает пористость, заполняя поры и дегидратируя грунт. Показатели физико-химических свойств грунта под влиянием гипса снижаются меньше, чем при содержании легкорастворимых солей, так как концентрация его в поровых растворах сравнительно небольшая. Механические свойства загипсованных грунтов существенно повышаются за счет формирования цементационных структурных связей.

Процессы выщелачивания в загипсованных грунтах идут значительно медленнее, чем в грунтах, засоленных легкорастворимыми солями. Однако в природе эти процессы развиты достаточно широко и при наличии растворов определенного состава и концентрации они могут сильно активизироваться, результатом чего будут существенные изменения физико-механических свойств грунтов, повышение их водопроницаемости и снижение прочности.

При определении физико-механических свойств загипсованных грунтов надо учитывать:

1) завышение естественной влажности грунтов благодаря дегидратации гипса при высушивании при $t = 105^\circ\text{C}$ (стандартный метод), так как гипс начинает терять кристаллизационную воду при $t = 65^\circ\text{C}$;

2) завышение всех характерных влажностей при стандартном методе определения влажности, включая пределы пластичности;

3) завышение плотности твердых частиц (ρ_s) грунтов при стандартном методе определения, но не за счет растворения гипса, а при подготовке грунта к анализу, т.е. из-за дегидратации гипса;

4) ошибки в величине всех расчетных показателей физических свойств, связанных с определением влажности грунта: плотности скелета (ρ_d), пористости (n), коэффициента пористости (e), степени водонасыщения (S_r);

5) возможность коагуляции грунтовых суспензий при определении гранулометрического состава грунта;

6) влияние состава и концентрации электролита при изучении водопроницаемости и механических свойств грунтов.

Труднорастворимые соли оказывают значительно меньшее влияние на свойства грунтов, чем среднерастворимые и особенно легкорастворимые. Это влияние в основном проявляется в улучшении механических свойств грунтов, снижении их пористости и водопроницаемости. Однако под влиянием соответствующих растворов (особенно при наличии CO_2) свойства карбонатных грунтов могут существенно ухудшаться, что и наблюдается в природных условиях при развитии карстовых процессов.

При определении показателей физико-механических свойств карбонатных грунтов следует учитывать возможность коагуляции суспензии при определении гранулометрического состава, которая будет возрастать при кипячении суспензии (т.е. при стандартном методе проведения микроагрегатного анализа).

Как видно, влияние состава солей на физико-механические свойства засоленных грунтов, а также на методы их определения, существенно различаются. Очевидно, что при смешанном засолении следует учитывать соответствующее влияние всех солей — от легкорастворимых до труднорастворимых, не забывая при этом, что совместное их влияние на свойства грунтов будет более сложным, чем влияние каждой соли в отдельности. Например, порог коагуляции при смешанном засолении всегда ниже, чем для любой из солей в отдельности.

I. ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

1. Определение влажности

Определение влажности (W) засоленных грунтов, содержащих соли-кристаллогидраты ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и др.) стандартным методом путем высушивания до постоянной массы при $t = 105^\circ\text{C}$ благодаря дегидратации последних приводит к существенным ошибкам. Исследования Л.И.Кульчицкого [1] показали, что при $t = 105^\circ\text{C}$ гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) теряет 20% воды, а эпсомит ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 39% воды. Коэффициент дегидратации гипса составляет 0,2, а эпсомита 0,3. Потерю кристаллизационной воды при $t = 105^\circ\text{C}$ за 6–8 ч можно рассчитать по формуле $W_{kp}=0,2 C$ — для гипса и $W_{kp}=0,39 C$ — для эпсомита, где C — содержание соли, в %. При содержании в грунте гипса 20–30% ошибка в определении влажности составляет 4–6%.

Гипс дегидратируется при $t = 65^\circ\text{C}$, мирабилит ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) при комнатной температуре. Поэтому определение влажности грунтов, содержащих соли-кристаллогидраты, следует проводить при температуре, не превышающей потерю кристаллизационной воды, например, для гипса она составляет 65°C .

2. Определение плотности твердых частиц

Исследования Л.И.Кульчицкого [1] показали, что при засолении до 2% в определении плотности твердых частиц ρ_s стандартным методом в воде для всех солей ошибок не наблюдается, за исключением Na_2SO_4 , при содержании которого 1% ошибка достигает $0,017 \text{ г}/\text{см}^3$. Соли-кристаллогидраты, содержащие по 7–10 молекул воды, при концентрации до 4–5% дают меньше ошибок, чем безводные. Присутствие в грунтах гипса и карбонатов фактически не приводит к ошибкам в определении ρ_s .

Несмотря на это, при определении ρ_s засоленных грунтов, особенно загипсованных, очень часто возникают весьма существенные ошибки, связанные с вышеописанными процессами дегидратации при стандартном определении гигроскопической влажности грунтов, используемой

для расчета. Причем ошибки могут достигать при высоком содержании гипса до $0,2 \text{ г}/\text{см}^3$ и более.

При стандартном методе определения плотности твердых частиц грунтов, содержащих значительное количество солей (более 2%), наблюдается существенное занижение этого показателя из-за перехода солей в раствор. Использование для этих грунтов специального метода с применением вместо воды керосина и вакуумирования вместо кипячения суспензии сопряжено с большими техническими трудностями. Проведенные нами исследования показали эффективность и надежность для определения засоленного грунта метод двух пикнометров (ГОСТ 5180-84, приложение), не требующего специального оборудования и использования вместо воды керосина или других неполярных жидкостей.

Поэтому для засоленных грунтов с содержанием легкорастворимых солей более 2% можно рекомендовать указанную методику, описание которой приводится ниже.

1. Из размельченного в фарфоровой ступке воздушно-сухого грунта отбирают методом квартования среднюю пробу массой 100–200 г и просеивают через сито с $d=2 \text{ мм}$, остаток на сите растирают в ступке и просеивают через то же сито.

2. Из перемешанной средней пробы берут навеску грунта из расчета 15 г на каждые 100 мл емкости пикнометра и высушивают до постоянной массы. Допускается использовать грунт в воздушно-сухом состоянии, определив его W . Высушивание загипсованных грунтов производится при $t < 65^\circ\text{C}$.

3. Пикнометр, наполненный до 1/3 дистиллированной водой, взвешивают. Затем через воронку высыпают в него высушенную пробу грунта и снова взвешивают.

4. Пикнометр с водой и грунтом взбалтывают и ставят кипятить на песчаную баню в течение 0,5 ч — пески и супеси и 1 ч — глины и суглинки.

5. После кипячения пикнометр следует охладить и долить дистиллированной водой до мерной риски. Пикнометр охлаждают до комнатной температуры в сосуде с водой. Температуру пикнометра определяют по температуре воды в сосуде, измеряемой с точностью до $0,5^\circ\text{C}$ термометром.

6. С помощью резиновой груши осторожно отсасывают осветленную жидкость из верхней части пикнометра в малый пикнометр, объем которого не должен превышать 60–80% объема основного пикнометра. Устанавливают положение мениска в малом пикнометре, добавляя в него по каплям осветленный солевой раствор из большого пикнометра, при

этом не допуская взмучивания осадка в большом пикнометре. Малый пикнометр с жидкостью следует вытереть насухо и взвесить.

7. Солевой раствор из малого пикнометра и суспензию из большого пикнометра выливают, промывают их дистиллированной водой; наливают дистиллированную воду и выдерживают в сосуде с водой*.

8. После охлаждения пикнометра следует поправить положение мениска воды в нем, добавляя по каплям дистиллированную воду. Возможные капли воды выше риски удаляют фильтровальной бумагой. Пикнометр с капилляром доливают примерно до середины шейки пикнометра, закрывают пробкой и удаляют выступившую из капилляра воду фильтровальной бумагой. Проверяют отсутствие пузырьков воздуха под пробкой и при их наличии вновь доливают воду. Пикнометр вытирают снаружи и взвешивают.

Обработку результатов производят следующим образом.

Плотность частиц засоленного грунта рассчитывают по формуле

$$\rho_s = \frac{M_0}{\rho_w} + \frac{(m_4 - m_3)(M_3 - M_1)}{\rho_c(m_3 - m_1)},$$

где M_0 — масса грунта в пикнометре, г; M_1 — масса большого пикнометра (пустого), г; M_2 — масса большого пикнометра с водой и грунтом, г; M_3 — масса большого пикнометра с водой, г; m_1 — масса малого пикнометра (пустого), г; m_3 — масса малого пикнометра с водой, г; m_4 — масса малого пикнометра с солевым раствором, г; ρ_c — плотность растворимых солей (допускается принимать равной 2,20 г/см³); ρ_w — плотность воды при температуре испытания, г/см³.

Следует еще раз отметить, что высушивание грунтов, содержащих соли-кристаллогидраты, до постоянной массы при использовании абсолютно сухого грунта для определения или для расчета гигроскопической влажности W_g при использовании воздушно-сухого грунта следует проводить при температуре, не допускающей дегидратацию солей, т.е. значительно ниже 105°C (для гипса меньше 65°C).

Проведенные нами исследования показали, что ошибки, связанные с применением стандартного метода определения влажности и плотности твердых частиц засоленных грунтов, влекут за собой соответствующие ошибки в расчетных показателях: плотности скелета (ρ_d), пористости (n), коэффициента пористости (e) и степени водонасыщения (S_r). Так, ошибки в определении ρ_d за счет завышения влажности загипсованных

* Взвешивание пикнометров с суспензией, а также с дистиллированной водой во избежание ошибок, связанных с подгонкой температуры, удобнее проводить на другой день после кипячения с водой комнатной температуры.

грунтов могут составлять 5–8%, при расчете пористости 5–11%, коэффициента пористости — 10–18%. С учетом же ошибок в значениях ρ_s и ρ_d для n они возрастают до 8–23% и для e до 13–36%, повышаясь с увеличением содержания гипса от 10 до 30%.

При определении влажности и плотности скелета грунтов с высоким содержанием легкорастворимых солей (>5%) не соблюдаются условия постоянства массы и объема скелета грунта, поскольку их поровые растворы представляют собой рассолы с концентрацией солей более 250 г/л. Поэтому для расчета этих характеристик необходимо учитывать массу и объем солей, выпадающих из рассола при высушивании грунта. Согласно И.П.Иванову [2], влажность рассолосодержащих грунтов определяется следующим выражением:

$$W = \frac{Q_b}{Q_{sk}} = \frac{Q_b}{Q_{sk_1} + Q_{sk_2}},$$

где Q_b — масса воды, Q_{sk_1} — масса нерастворимой части скелета; Q_{sk_2} — масса солей.

В связи с увеличением массы скелета за счет выпавших из рассола солей влажность грунта оказывается заниженной. Рассолосодержание можно рассчитать по формуле

$$W' = \frac{Q_p}{Q_{sk_1}} = \frac{Q_b + Q_{sk_2}}{Q_{sk} - Q_{sk_2}},$$

но $Q_{sk_2} = m Q_b$, где m — показатель минерализации порового раствора.

Тогда

$$W' = \frac{Q_b(1+m)}{Q_{sk}(1-m\frac{Q_b}{Q_{sk}})} = W \frac{1+m}{1-mW}.$$

Плотность скелета рассолосодержащих грунтов в зависимости от методики расчета будет иметь два значения. Обычная формула

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+W} = \frac{Q_{sk}}{V_o},$$

где V_o — объем грунта, соответствующий плотности ρ .

Тогда полученное значение ρ_d характеризует грунт после выпадения солей из порового раствора, а следовательно, отвечает плотности с некоторым заполнением порового пространства выпавшими солями при высушивании. В действительности ρ_d следует рассматривать как отношение массы скелета грунта, в порах которого содержится рассол, к его объему, т.е.

$$\rho_d' = \frac{\rho_{\text{ск}} - \rho_{\text{ск}2}}{V_0} = \frac{\rho_{\text{ск}} - m \rho_b}{V_0} = \frac{\rho_{\text{ск}} (1 - \frac{m \rho_b}{\rho_{\text{ск}}})}{V_0} = \rho_d (1 - m W).$$

Выраженная через рассолосодержание W' , плотность скелета будет равна: $\rho_d' = \rho/(1 + W')$.

При $m=0$ или при $W=0$, т.е. при отсутствии в поровом растворе солей или в сухом грунте, $\rho_d = \rho_d'$. Зная концентрацию порового раствора и его плотность, значение m можно рассчитать по формуле

$$m = \frac{V_c \rho_c}{V_b \rho_b},$$

где V_c и V_b — объем соли и объем воды в 1 л рассола, а ρ_c и ρ_b — плотность соли и воды. Объем соли $V_c = C/\rho_c$, где C — концентрация соли в рассоле, ρ_c — плотность соли. Объем воды $V_b = 1000 - V_c$.

Расчет пористости и степени водонасыщения также следует проводить не по влажности W , а по рассолосодержанию W' . Поскольку $\rho_d' = \rho/(1 + W')$, то пористость с учетом рассолосодержания рассчитывается по формулам

$$n' = \frac{\rho_s - \rho_d'}{\rho_s} \text{ или } n' = n + \frac{\rho_d}{\rho_s} m W.$$

Степень водонасыщения $S_r' = \frac{W' \rho_d'}{n' \rho_{\text{рас}}}$, где $\rho_{\text{рас}}$ — плотность рассола при данной его концентрации.

При полном рассолонасыщении $S_r' = 1$ и $S_r = 1$. Следует отметить, что пористость и степень водонасыщения, рассчитанные по влажности, меньше этих же показателей, рассчитанных по рассолосодержанию.

II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА

1. Общие сведения

При проведении гранулометрического анализа наибольшие трудности возникают при смешанном засолении грунтов, так как соли различной

растворимости по-разному влияют на коагуляцию суспензий. Большой объем исследований, проведенных нами на различных типах засоленных грунтов при отработке методики проведения гранулометрического анализа, выявил следующие закономерности.

1. Для сильно засоленных грунтов абсолютно обязательным является значительное снижение концентрации суспензии (до 0,5%). В противном случае предотвратить коагуляцию суспензии становится очень трудно.

2. Проведение микроагрегатного анализа путем кипячения суспензии с добавкой стабилизаторов (в том числе и $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) даже после отмычки легкорастворимых солей для грунтов со смешанным засолением является неприемлемым из-за частичной или полной коагуляции суспензии. Это подтверждает выводы А.П.Нифантова [3] о том, что кипячение карбонатных грунтов и даже их нагревание усиливает процессы коагуляции.

3. Метод растирания грунтов с пирофосфатом натрия $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, являющийся, по мнению П.Ф.Мельникова [4], универсальным и обеспечивающим диспергацию сильно засоленных грунтов, не дает для грунтов со смешанным и значительным засолением положительных результатов. Для таких грунтов требуется предварительная отмычка легкорастворимых солей и высокая дозировка $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ в качестве диспергатора (20 мл на 1 л суспензии).

4. Наиболее близкое соответствие гранулометрического состава грунтов их числу пластичности достигается в результате отмычки солей и добавки (5 мл на 1 л суспензии) стабилизатора ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) без кипячения.

Как видно, стандартные схемы подготовки грунтов к микроагрегатному и дисперльному анализам для сильно засоленных грунтов со смешанным засолением не пригодны. Для подобных грунтов проведение микроагрегатного анализа является не только технически не осуществимым, но и теоретически не оправданным, так как для предотвращения коагуляции суспензии здесь требуется отмычка солей, являющаяся, по-существу, химической обработкой грунта, в то время как при микроагрегатном анализе допускается лишь физическое воздействие на грунт (кипячение). Более того, кипячение сильно карбонатных грунтов вообще не допустимо, поскольку ведет к усилению их коагуляции. Таким образом, для указанных грунтов можно предложить в качестве микроагрегатной схемы подготовки к анализу следующую схему, обеспечивающую достаточно близкое соответствие результатов анализа числу пластичности грунта.

2. Микроагрегатная схема подготовки

1. Берут навеску грунта с естественной или близкой к ней влажностью массой около 5 г, помещают ее на фильтр и отмывают соли горячей дистиллированной водой до прекращения реакции на Cl^- и SO_4^{2-} .

2. Собирают фильтрат, измеряют его объем, берут из него пробу 100 мл, выпаривают, определяют сухой остаток и рассчитывают количество вымытых солей.

3. Навеску грунта переносят с фильтра в фарфоровую чашку и затем, как обычно доливая воду и растирая, переносят ее в литровый цилиндр.

4. Добавляют в цилиндр 5 мл $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ для стабилизации суспензии.

Использование классификации В.В.Охотина для определения номенклатуры засоленного грунта при вышеописанной схеме его подготовки к анализу можно считать допустимым, так как она соответствует классификации по числу пластичности.

3. Дисперсная схема подготовки

1. Отбирают навеску грунта с естественной влажностью массой около 5 г. При содержании легкорастворимых солей более 3% необходимо проводить отмытку солей горячей дистиллированной водой до прекращения реакции на Cl^- и SO_4^{2-} .

2. Измеряют объем фильтрата, берут пробу 100 мл, выпаривают, определяют сухой остаток и рассчитывают массу вымытых солей.

3. Переносят навеску грунта с фильтра в фарфоровую чашку и затем в литровый цилиндр.

4. Добавляют в цилиндр пептизатор $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ в количестве 20 мл на 1 л суспензии.

5. Содержание фракций рассчитывают с учетом уменьшения навески грунта за счет вымытых солей и увеличения массы фракций в результате их засорения пирофосфатом натрия.

Для определения номенклатуры грунта по результатам дисперсного анализа рекомендуется использовать гранулометрическую классификацию Н.А.Качинского.

Учитывая положение А.К.Ларионова [5] о том, что гранулометрический состав грунта следует считать лишь характеристикой, изменяющейся в зависимости от вида воздействия (механическое, физическое,

физико-химическое и химическое) на грунт, а также полную агрегированность сильно засоленных грунтов в их естественном залегании, обусловливающую все их физико-механические свойства, проведение гранулометрического анализа подобных грунтов, по-видимому, является нецелесообразным. Исключение может быть сделано для случаев, когда в результате строительства ожидаются значительные изменения водного режима и выщелачивание солей из грунта. Поэтому более объективной следует считать классификацию сильно засоленных грунтов по величине числа пластичности, что отражает степень гидрофильтруемости грунта в условиях высокой концентрации электролита и соответственно может характеризовать поведение грунта в основании сооружения.

III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

При значительной засоленности особенно легкорастворимыми солями и сравнительно небольшой влажности для грунтов характерна высокая концентрация поровых растворов. Поэтому на величину показателей физико-химических свойств, таких, как пластичность, набухание, липкость и другие, существенное влияние может оказывать концентрация раствора, используемого при определении последних [6-8].

Для изучения влияния концентрации растворов на пластичность и набухание засоленных грунтов нами были проведены эксперименты с использованием дистиллированной воды, водной вытяжки из грунта и хлоридно-натриевых рассолов разной концентрации. Как показали проведенные исследования, в большинстве случаев максимальные показатели пластичности отмечались при использовании концентрированных рассолов и минимальные — при использовании водной вытяжки. При этом наибольшие изменения характерны для верхнего предела и числа пластичности и наименьшие — для нижнего предела пластичности, что указывает на гораздо большую чувствительность верхнего предела пластичности к концентрации порового раствора.

Набухание засоленных грунтов наиболее интенсивно проявляется в дистиллированной воде, однако при сильной загипсованности грунты сильнее набухали в рассолах, чем в воде, что связано с частичным растворением и размягчением кристаллизационных связей за счет гипса

в этих грунтах, которые препятствовали развитию набухания в дистиллированной воде.

Проведенные нами исследования показали, что на физико-химические свойства засоленных грунтов значительное влияние оказывает концентрация используемых растворов. Учитывая, что поровые растворы засоленных грунтов в естественном залегании отличаются высокой концентрацией солей, то для характеристики физико-химических свойств грунтов, залегающих выше уровня грунтовых вод, наиболее рационально использовать водные вытяжки из этих грунтов. Если же грунты находятся ниже уровня грунтовых вод, то целесообразно использовать в экспериментах растворы, близкие по составу к природным водам.

IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

При определении физико-механических свойств засоленных грунтов также необходимо использовать либо водные вытяжки, либо растворы, близкие по составу к природным, поскольку концентрация растворов тоже оказывает существенное влияние на деформируемость и прочность засоленных грунтов. Использование дистиллированной воды при определении физико-механических свойств, как правило, способствует диспергации грунта и повышению его гидрофильтрости, что обуславливает завышение показателей физико-химических свойств и снижение физико-механических по сравнению с таковыми при использовании водной вытяжки. Поэтому наиболее целесообразно для получения показателей свойств грунтов в их природном состоянии использовать водные вытяжки.

Наиболее оптимальными и научно обоснованными методами определения показателей прочности грунтов являются сдвиговые и стабилометрические испытания по методу определения естественной прочности грунтов, разработанному И.П.Ивановым [9]. Указанный метод позволяет получить характеристики прочности для данного физического состояния грунта, как природного, так и любого другого, связанного, например, с уплотнением или разуплотнением последнего. Сущность этого метода заключается в научно обоснованных принципах выбора нормальных давлений при сдвиге, значения которых должны находиться в опреде-

ленном для данного грунта интервале и не вызывать, с одной стороны, растягивающих напряжений, а с другой стороны, доуплотнения грунта или появления порового давления. Величина нормальных давлений при сдвиге, по И.П.Иванову, должна находиться в следующих пределах: $\sigma_{n''} \leq \sigma_n \leq \sigma_n'$. Минимальное давление $\sigma_{n''}$ соответствует нормальному давлению в круге предельных напряжений Мора с диаметром, равным пределу прочности грунта на сжатие $\sigma_{cж}$ (рис.1). Все нормальные давление менее

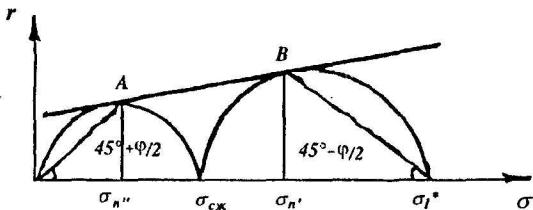


Рис. 1.

$\sigma_{n''}$ будут вызывать при сдвиге как деформацию сжатия, так и деформацию растяжения, что обусловливает снижение сопротивления сдвигу.

Максимальное давление σ_n' соответствуетциальному давлению в круге предельных напряжений Мора с наибольшим главным напряжением σ_1^* , равным либо природному давлению, либо прочности структурных связей ($\sigma_{стр}$), либо уплотняющему давлению (σ_u). При $\sigma_n > \sigma_n'$ грунт в сдвиговом приборе будет доуплотняться, что приведет неводонасыщенные грунты к изменению их физического состояния и соответствующему увеличению прочности, а водонасыщенные — к снижению прочности за счет появления порового давления. Таким образом, в пределах $\sigma_{n''} < \sigma_n < \sigma_n'$, т.е. на участке АВ, будет сохраняться исходное физическое состояние грунта, а соответственно значения сцепления и угла внутреннего трения будут постоянными. Интервал указанных давлений можно получить, проведя из начала координат прямую под углом $45^\circ + \varphi/2$ к оси абсцисс и из σ_1^* прямую под углом $45^\circ - \varphi/2$, которые соответствуют направлению площадок сдвига, к $\sigma_{cж}$ и σ_1^* (см. рис.1).

Диапазон изменения σ_n , в пределах которого будет сохраняться исходное физическое состояние грунта, наиболее надежно можно определить с помощью nomogramмы, предложенной Е.Н.Богдановым [10] по величине удельного сопротивления пенетрации R ; $R = P/h^2$, где P — нагрузка, передаваемая на грунт, h — глубина погружения конуса.

Предложение Е.Н.Богданова по определению диапазона нормальных давлений при сдвиговых испытаниях базируется на преобразовании уравнения Кулона путем деления его правой и левой частей на R : в координатах τ/R и σ_n/R уравнение Кулона представляет собой прямую с наклоном к оси абсцисс под углом φ , отсекающую на оси ординат отрезок $\kappa_\varphi = C/R$. По значениям κ_φ для различных углов внутреннего трения строится помограмма (рис.2).

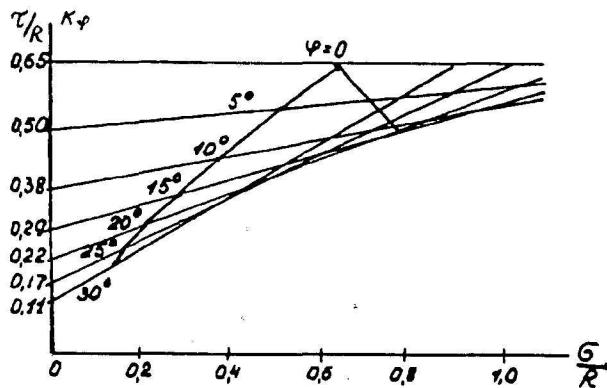


Рис. 2.

Так как каждая прямая помограммы является выражением уравнения Кулона в относительных координатах, то все положения методики определения естественной прочности здесь сохраняются. Соблюдение условия $\sigma_n \geq \sigma_n'$ достигается отделением рабочей области помограммы слева по оси ординат ломаной линией, проведенной к оси абсцисс для каждой прямой под углом $45^\circ + \varphi/2$ и для условия $\sigma_n \leq \sigma_n'$ ограничением рабочей области справа по оси абсцисс под углом $45^\circ - \varphi/2$ к каждой прямой.

Для определения диапазона нормальных давлений следует определить R , затем приближенно, с точностью до 5° , оценить φ грунта, выбрать для него на диаграмме диапазон σ_n/R и посчитать $\sigma_n = \sigma_n/R \cdot R$. Как видно, с увеличением φ диапазон σ_n значительно расширяется.

Определив диапазон изменения значений σ_n , в пределах которого при сдвиге будет поддерживаться однородное напряженное состояние сжатия (без растяжения) и сохраняться исходное состояние грунта без

доуплотнения и появления порового давления, проводят быстрый сдвиг без предварительного уплотнения при трех значениях σ_n . Полученные показатели C и φ , характеризующие прочность грунта в заданном исходном состоянии, можно считать константами, имеющими определенный физический смысл.

С помощью номограммы Е.Н.Богданова можно определить также сцепление и угол внутреннего трения по пенетрации и одному сдвигу, что весьма целесообразно при недостатке опытных образцов грунта для полного объема сдвиговых испытаний и для контроля последних. Для этого надо определить R , оценить приближенно значение φ , выбрать для него среднее значение σ_n/R и определить $\sigma_n = R \cdot \sigma_n/R$. Затем провести сдвиг при данном σ_n и определить сопротивление сдвигу τ ; затем определить t/R и σ_n/R и наложить точку на монограмму. Через эту точку провести луч в соответствии с направлением соседних лучей до пересечения с осью ординат, где отсекается отрезок, равный κ_φ , по величине которого можно определить $C = \kappa_\varphi R$. Для более точного определения угла внутреннего трения можно использовать метод сдвига по готовой поверхности (плашка по плашке), когда сцепление в грунте отсутствует, т.е. сопротивление сдвигу определяется только величиной φ . Определив таким образом значение φ и получив по нему величину κ_φ (см. рис.2), можно по той же формуле рассчитать $C = \kappa_\varphi R$.

Проведение нами испытаний по вышеуказанным схемам показало, что наименее трудоемкой и в то же время достаточно надежной является последняя, т.е. пенетрация + сдвиг с использованием номограммы [10].

Эти испытания можно проводить на одном образце: сначала провести пенетрационные испытания, затем по номограмме определить диапазон нормальных давлений σ_n , провести один или два сдвига, а после каждого сдвига провести испытание «плашка на плашке» — сдвиг по готовой поверхности при тех же значениях σ_n . По результатам последних определяется значение угла внутреннего трения и рассчитывается сцепление. При этом полученные значения C и φ можно выборочно контролировать сдвиговыми испытаниями по методу определения естественной прочности грунтов И.П.Иванова.

Для определения прочности грунтов, уплотненных проектными нагрузками, превышающими их структурную прочность или природное давление, необходимо проведение консолидированного сдвига. Поскольку методика консолидированного сдвига, рекомендуемая ГОСТ 12248-78 и широко используемая в проектных организациях, имеет целый ряд серьезных недостатков, следует рассмотреть ее более подробно. Согласно указанной методике, консолидированный сдвиг проводится на образ-

цах, предварительно уплотненных под водой различными нагрузками (σ_y). Обычно σ_n равно 0,1; 0,2 и 0,3 МПа. Затем производят медленный сдвиг при $\sigma_n = \sigma_y$. Указанный схема испытаний, как показали многочисленные исследования различных авторов, не позволяет получить значение C и ϕ по зависимости сопротивления сдвигу τ от нормального давления σ_n , так как все образцы имеют различное W и ρ , т.е. в этом случае получают лишь зависимость сопротивления сдвигу от уплотняющего давления.

Кроме того, согласно принципу гидроемкости Герсеванова, пористость грунта при сдвиге определяется не нормальным давлением, а величиной наибольшего главного напряжения, т.е. при $\sigma_n = \sigma_y$ происходит доуплотнение образца в зоне сдвига и соответствующее изменение его физического состояния и прочности.

Учитывая перечисленные недостатки этого метода, можно предложить другую схему проведения консолидированного сдвига, а именно, проводить уплотнение образцов под одной и той же нагрузкой, равной нагрузке от сооружения. Вместо медленного сдвига можно использовать быстрый сдвиг при $\sigma_n'' < \sigma_n < \sigma_n'$, так как показатели прочности при этом будут одинаковы. Подобная схема позволяет получить объективные прочностные характеристики грунта, уплотненного давлением от сооружения.

Основными методами изучения деформативных свойств грунтов являются штамповочные испытания (полевые методы) и компрессионные испытания (лабораторные). Последние отличаются значительно меньшей точностью в связи с малым размером образцов и с большими ошибками в определении показателей сжимаемости и модулей деформации, особенно для грунтов твердой и полутвердой консистенции. В связи с последним ГОСТ 12248-78 рекомендует проводить компрессионные испытания только для грунтов с коэффициентом консистенции $J_L > 0,5$, т.е. для грунтов пластичной консистенции.

Поскольку сильно засоленные грунты залегают обычно в зоне аэрации и характеризуются в естественных условиях твердой и полутвердой консистенцией, то проведение компрессионных испытаний для определения модулей деформации является нецелесообразным. Надежные значения этих показателей можно получить только путем штамповочных испытаний в полевых условиях.

При выщелачивании засоленные грунты дают дополнительную осадку, увеличивающуюся при фильтрации агрессивных вод (например, NaCl по отношению к гипсу и карбонатам). Как свидетельствуют исследования различных авторов, выщелачивание гипса нередко сопровождается процессами механической суффозии. Изучение этих процессов можно

проводить в компрессионно-фильтрационных приборах или в трубках Каменского.

Широкое распространение засоленных грунтов в южных областях и необходимость строительства в этих районах различных гидroteхнических сооружений делают весьма актуальными и важными вопросы изменения их водопроницаемости в ходе выщелачивания. Изучению последних посвящены работы Л.Н.Ломизе и Н.А.Клапатовской [11], А.Е.Орадовской [12], А.И.Грот и В.П.Шульгиной [13], Н.П.Ивановой [11].

V. ФИЛЬРАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Фильтрационные исследования засоленных грунтов проводились нами на образцах пород гипсово-глинистой шляпки калийных месторождений Предкарпатья (1971), а также на образцах, отобранных с промплощадки садковых бассейнов Среднеазиатского калийного завода (1989). Для всех изученных пород было характерно значительное смешанное засоление. В породах гипсово-глинистой шляпки содержание легкорасторвимых солей изменялось от 0,2 до 13%, гипса — от 2 до 70%, карбонатов — от 0,5 до 20%.

Среднеазиатские грунты содержали, соответственно, легкорасторвимых солей 2–4%, гипса 10–25% и карбонатов 15–30%. Выщелачивание образцов проводилось в трубках Каменского при постоянных напорах, устанавливаемых для каждого образца в зависимости от его водопроницаемости. Образцы пород нарушенного сложения диаметром 7 см и высотой 3 см закреплялись в трубках при помощи расплавленного парафина, что полностью исключало пристенную фильтрацию. Выщелачивание образцов производилось с возможностью набухания, без нагрузки, в условиях, наиболее благоприятных для развития фильтрации. Изменение водопроницаемости грунтов изучалось при фильтрации через образцы дистиллированной воды. В процессе выщелачивания велись каждодневные наблюдения за изменением коэффициента фильтрации (K_ϕ) во времени и через определенные промежутки времени (7–10 дней), в зависимости от скорости фильтрации, отбирались пробы фильтрата для химического анализа. В результате проведенных исследований было

установлено, что фильтрационный процесс грунтов гипсово-глинистой шляпы характеризуется ярко выраженной динамичностью, заключающейся в изменении коэффициента фильтрации во времени. Динамичность фильтрационного процесса для засоленных грунтов связана, по-видимому, с изменением структуры грунта в ходе солевой суффозии. В процессе исследований были установлены четыре наиболее характерных типа динамичности фильтрационного процесса: I — прогрессирующий, II — переменный по этапам, III — циклический и IV — затухающей фильтрации. Аналогичные типы динамики фильтрации засоленных пород были установлены и в экспериментах Л.Н.Ломизе и Н.А.Клапатовской [11].

Первый тип характеризуется непрерывным повышением водопроницаемости в процессе фильтрации и стабилизацией коэффициента фильтрации после выноса всех солей на уровне, превышающем его начальные значения во много раз.

Второй тип характеризуется поэтапным изменением коэффициента фильтрации. На первом этапе происходит смачивание образца и незначительное увеличение K_f (длительность первого этапа 1–15 сут.). На втором этапе коэффициент фильтрации увеличивается резко (в 100–1000 раз) для одних образцов и менее резко (в 2–10 раз) — для других. Протяженность этого этапа 3–5 сут. На третьем этапе идет более или менее постепенное уменьшение коэффициента фильтрации. На четвертом происходит его стабилизация, которая наступает обычно через 30–100 суток.

Третий тип фильтрационного процесса отличается весьма неустойчивой фильтрацией, выражющейся в чередовании ряда циклов более или менее резкого увеличения и падения коэффициента фильтрации.

Четвертый тип характеризуется постепенным уменьшением коэффициента фильтрации по сравнению с первоначальным.

Для изученных грунтов наиболее характерными являются II и III типы фильтрационного процесса. В зависимости от степени динамичности коэффициента фильтрации в пределах отдельных типов выделяются подтипы. Степень динамичности коэффициента фильтрации сильно зависит от режима фильтрации. При относительно небольших градиентах напора ($I=1–3$) изменение его растянуто во времени, при больших ($I=5–25$) оно происходит более резко и быстро.

На степень динамичности коэффициента фильтрации большое влияние оказывают также структурные характеристики грунта, такие, как плотность и пористость. Чем меньше плотность и больше пористость, тем более резко изменяется коэффициент фильтрации. При близких значениях пористости, что имело место в исследуемых образцах, степень

динамичности коэффициента фильтрации больше зависит от характера и интенсивности солевой суффозии.

Характер солевой суффозии благодаря смешанному засолению пород изменяется в процессе фильтрации следующим образом. Вначале наблюдается интенсивный вынос легкорастворимых солей. За первые 5–10 сут. выносится 50–90% от первоначального содержания. Затем количество выносимых солей резко сокращается и выпещаиваются главным образом гипс и бикарбонаты. Количество гипса и бикарбонатов, выносимых из грунта, находится в прямой зависимости от скорости фильтрации, причем количество выпещиваемых бикарбонатов очень невелико. Плотный остаток в фильтрате в начале фильтрационного процесса является максимальным, затем быстро снижается и становится постоянным, близким к предельному растворению гипса и бикарбонатов.

Интенсивность солевой суффозии оказывает значительное влияние на степень динамичности коэффициента фильтрации. Максимальные коэффициенты фильтрации наблюдаются обычно при выносе от 40 до 90% легкорастворимых солей и 1–3% гипса. Но было замечено, что для различных образцов при одинаковой интенсивности солевой суффозии наблюдается различная картина как динамики фильтрационного процесса, так и степени динамичности коэффициента фильтрации. По-видимому, и тип динамики фильтрационного процесса, и степень его динамичности нельзя объяснить одной лишь интенсивностью солевой суффозии, как это обычно принято.

В процессе исследования структурно-текстурных особенностей выпещиваемых образцов оказалось, что различие в характере и степени динамичности коэффициента фильтрации для этих образцов соответствует различию их структурно-текстурных особенностей. Структурные исследования пород гипсово-глинистой шляпы изучались по методике А.К.Ларионова [5] на образцах с ненарушенной структурой под бинокулярным микроскопом и в шлифах. В результате этих исследований было установлено, что для изученных грунтов наиболее характерными являются пять следующих структурно-текстурных типов (рис.3):

тип А — преимущественно слитная структура с солями, равномерно распределенными в глинистой массе;

Типы пород	Схематический разрез	Подтипы по засолен.	
		>10%	<10%
А		А'	А''
Б		Б'	Б''
В		В'	В''
Г		Г'	Г''
Д		Д'	Д''

Рис. 3.

тип Б — слитная структура с трещинами, заполненными солями (главным образом гипсом);

тип В — слитная структура с трещинами, заполненными зернисто-агрегативной и агрегативной массой;

тип Г — слитная структура с зонами зернисто-агрегативной и агрегативной массы;

тип Д — преимущественно агрегативная и зернисто-агрегативная структура.

В пределах отдельных структурно-текстурных типов можно выделить грунты с содержанием легкорастворимых солей более 3 и менее 3% и гипса — более 7 и менее 7%.

Вышеописанные структурно-текстурные типы грунтов с учетом их засоленности хорошо увязываются с выделенными ранее типами динамики фильтрационного процесса. Основные структурно-текстурные типы пород и характерные для них типы динамики коэффициента фильтрации в процессе выщелачивания показаны на рис.4.

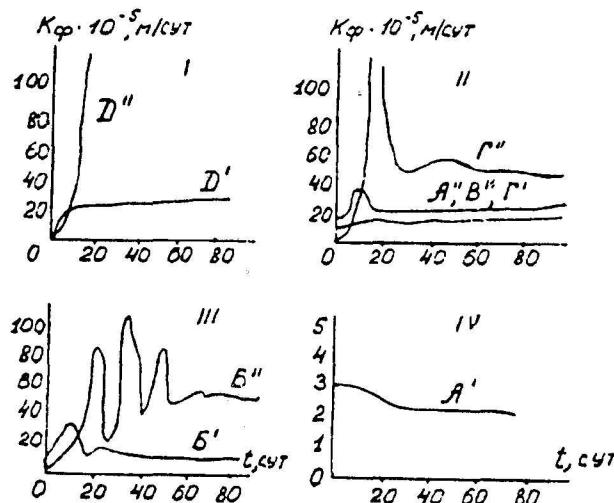


Рис. 4.

Прогрессирующая фильтрация (тип I) является характерной для структурно-текстурного типа Д. В результате выщелачивания солей и связанного с этим роста пористости в грунтах с агрегативной и зернисто-агрегативной структурой идет непрерывное увеличение коэффициен-

та фильтрации, причем для сильнозасоленных грунтов очень резкое, более чем в 100 раз, а для малозасоленных грунтов — более слабое. Заметного уменьшения коэффициента фильтрации в процессе рассоления не наблюдается, так как песчано-пылеватый материал почти не набухает. Стабилизация коэффициента фильтрации после выноса всех солей наступает на уровне, более чем в 100 раз превышающем первоначальный.

Изменяющаяся поэтапно фильтрация (тип II) наблюдается для структурно-текстурных типов В и Г, а также А, но для сильнозасоленных грунтов, причем для типа Г характерна более высокая степень динамики коэффициента фильтрации, чем для В, и она тем выше, чем большая степень засоления грунта. (Коэффициент фильтрации в некоторых случаях увеличивается в 100–1000 раз). Для типа В наблюдается сравнительно небольшое увеличение коэффициента фильтрации при выщелачивании (примерно в 2–5 раз). Более или менее резкое увеличение коэффициента фильтрации на первых стадиях выщелачивания для этих пород объясняется тем, что при фильтрации через грунты слитной структуры с зонами и трещинами, заполненными зернисто-агрегативной массой, вынос солей приводит к увеличению водопроницаемости зон и трещин, а это может резко увеличить коэффициент фильтрации всей породы. Чем больше площадь зон, занятых зернисто-агрегативной массой, и чем большая их засоленность, тем сильнее увеличивается коэффициент фильтрации при выносе солей из этих зон. Последующее снижение водопроницаемости можно объяснить уменьшением концентрации почвого раствора при рассолении, которое приводит к гидратации и дезагрегации глинистых частиц, что способствует росту сил набухания и уменьшению активной пористости.

Циклическая фильтрация (тип III) наблюдается для грунтов структурно-текстурного типа Б. Циклическое изменение коэффициента фильтрации с более или менее резкими подъемами и падениями можно объяснить неравномерным выносом солей из трещин, пронизывающих глинистую массу. В результате этого образуются сосредоточенные пути фильтрации, ведущие к значительному повышению водопроницаемости всей породы. Затем набухание и перераспределение глинистых частиц в промытой зоне кальматорирует трещину и приводит к временному снижению величины коэффициента фильтрации. Таких циклов может быть несколько, в зависимости от числа и расположения трещин, причем пики скачков и падений коэффициента фильтрации могут быть различной величины, но при значительном рассолении наблюдается его уменьшение и стабилизация.

И, наконец, затухающая фильтрация (тип IV) является характерной для грунтов структурно-текстурного типа А при незначительном содержании водорастворимых солей. Постепенное уменьшение коэффициента фильтрации в процессе выщелачивания для этих грунтов связано с тем, что вынос солей из слабо засоленного глинистого грунта сразу же сопровождается активизацией сил набухания, которые ранее сдерживались повышенной концентрацией ионного раствора. Это приводит к уменьшению активной пористости и соответствующему снижению водопроницаемости.

VI. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКРЫТОЙ ПРОСАДОЧНОСТИ

Рассмотренные выше типы динамики фильтрации засоленных грунтов по-разному проявляются в просадочности в ходе выщелачивания солей. Затухающий тип фильтрации препятствует проявлению дополнительной осадки, а прогрессирующий и неустойчивый типы указывают на рост пористости, превалирующей над набуханием, что ведет к дополнительной осадке.

Исследования Л.Н.Ломизе и Н.А.Клапатовской [11] показали, что методика определения просадочности, вернее, скрытой просадочности засоленных грунтов, должна отличаться от определения просадочности лессов. Здесь необходимо проводить весь процесс — и выщелачивание и деформирование с самого начала под нагрузкой. Испытания следует проводить в компрессионных приборах по следующей методике.

1. Загрузить в прибор образец с непарашитной структурой и естественной влажностью.

2. Приложить нагрузку и произвести замачивание образца дистиллированной водой или рассолом, аналогичным по составу природным водам. Сразу же замерить осадку. Это будет так называемая быстрая осадка.

3. Проводить выщелачивание образца, т.е. фильтровать в течение заданного периода времени через него воду или рассол. Отбирать пробы фильтрата на химический анализ, замерять осадку вплоть до ее условной стабилизации.

4. Показателем скрытой просадочности является разность между конечной осадкой и осадкой при быстром замачивании.

Как показали исследования различных авторов [11–13], объем выщелоченных солей, как правило, превышает уменьшение объема грунта за счет дополнительной осадки. Для глинистых грунтов, в отличие от лесовых и других более легких разностей грунтов, отмечается небольшая дополнительная осадка, так как в результате выщелачивания происходит их диспергация (катион Na^+ входит в обменный комплекс и развивается набухание).

Для грунтов легкого и среднего состава с прогрессирующими, переменными по этапам и циклическими типами фильтрации даже при небольших давлениях наблюдается существенная скрытая просадка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кульчицкий Л.И. Анализ ошибок в определении удельного веса засоленных грунтов // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии: Труды ВСЕГИНГЕО. Сб.20. 1962.
2. Иванов И.П., Головин Н.М. Физико-механические свойства солеотвалов калийных рудников в связи с проблемой их устойчивости // Вестн. Ленингр. ун-та. 1976. № 6.
3. Нифантов А.П. Подготовка глинистых грунтов к гранулометрическому анализу // Вопросы геологии и инженерной геологии: Труды ВСЕГИНГЕО. Сб.18. 1959.
4. Мельников П.Ф. Исследования по разработке метода подготовки засоленных и карбонатных грунтов к гранулометрическому анализу // Учен. зап. МГУ. Вып.177. 1956.
5. Ларионов А.К. Инженерно-геологическое изучение структуры рыхлых осадочных пород. М., 1966.
6. Бакенов Б.Б., Джумашев У.Р. Инженерно-геологические исследования засоленных грунтов. М., 1986.
7. Петрухин В.П. Строительные свойства засоленных и загипсованных грунтов. М., 1980.
8. Джумашев У.Р. Особенности определения физико-механических свойств засоленных грунтов // Сборник ЦТИСИЗ. 1978. № 2.
9. Иванов И.П. Определение показателей сопротивления сдвигу грунтов, характеризующих их естественную прочность // Вестн. Ленингр. ун-та. 1975. № 6.

10. Иванов И.П., Руднева И.Е., Богданов Е.Н. Применение пенетрации при сдвиговых испытаниях грунтов естественной прочности // Современные методы определения механических характеристик слабых грунтов. Л., 1978.
11. Ломизе Л.Н., Клапатовская Н.А. Проявление скрытой просадочности засоленных грунтов в процессе выщелачивания // Растворение и выщелачивание горных пород. М., 1957.
12. Орадовская А.Е. Изменение фильтрационных свойств засоленных пород при длительной фильтрации // Там же.
13. Гром А.И., Шульгина В.П. Строительные свойства засоленных грунтов. М., 1956.
14. Иванникова Н.П. Динамика коэффициента фильтрации засоленных грунтов в процессе выщелачивания: Матер. по гидрогеологии и гидрогеологической роли подземных вод. Л., 1971.

Лицензия № 040050 от 15.08.96 г.

Подписано в печать с оригинала-макета 22.05.97. Формат 60×84 1/16.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,51.
Тираж 25 экз. Заказ № 350

РОПИ Издательства СПбГУ.
199034, С.-Петербург, Университетская наб., 7/9.
ЦОП СПбГУ. 199034, С.-Петербург, наб. Макарова, 6.