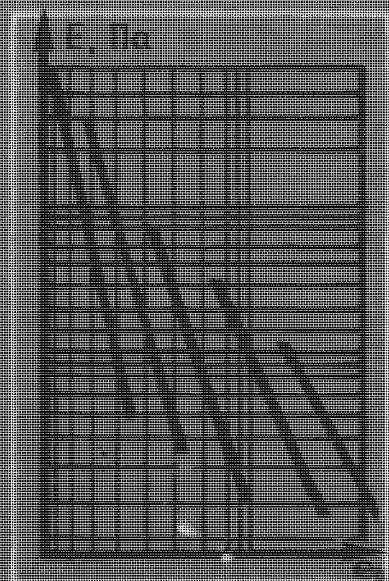


А. Я. Рубинштейн, Ф. С. Канаев

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ



МОСКВА
СТРОИИЗДАТ
1984

А. Я. Рубинштейн, Ф. С. Канаев

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ
ИЗЫСКАНИЯ
ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА
НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ**

МОСКВА
СТРОЙИЗДАТ
1984

ББК 38.2
Р 82
УДК 624.131.1

*Печатается по решению секции литературы по инженерному
оборудованию редакционного совета Стройиздата.*

Р е ц е н з е н т — лауреат Ленинской премии, д-р геол.-минерал.
наук, проф. И.С. Комаров (Московский геолого-разведочный
институт).

- Р 82** Рубинштейн А.Я., Канаев Ф.С.
Инженерно-геологические изыскания для строительст-
ва на слабых грунтах. — М.: Стройиздат, 1984. — 108 с.,
ил.

Рассмотрены особенности образования, распространения и за-
легания слабых грунтов на территории СССР. Описана методика
полевых исследований и испытаний слабых грунтов в условиях
их естественного залегания. Даны указания по проведению лабо-
раторных испытаний в зависимости от состава и состояния грун-
тов и конкретных задач инженерно-геологических испытаний.
Для инженерно-технических и научных работников проектных,
строительных и научно-исследовательских организаций.

Р — 3202000000 — 364
047(01) — 84 — Свод. пл. подписн. изд. 1984 ББК 38.2
6С1

Предисловие

В решениях XXV съезда КПСС, а также на ноябрьском (1982 г.) и июньском (1983 г.) Пленумах ЦК КПСС указано на необходимость усиления охраны природы, сохранности сельскохозяйственных угодий, обеспечения рационального использования и воспроизводства природных ресурсов. В соответствии с этим при отводе земель для строительства требуется соблюдение строжайшей их экономии путем использования в основном "неудобных земель", которые, как правило, сложены слабыми грунтами.

Проблема строительства на слабых грунтах за последние годы стала особенно актуальной в связи с широким освоением для промышленного, гражданского, гидротехнического, линейного и мелиоративного строительства площадок, расположенных в сложных инженерно-геологических условиях, и необходимостью сохранения ценных земель для сельского хозяйства. Все чаще приходится строить на так называемых "неудобных землях" — на болотах и заболоченных участках, в поймах рек, на низких морских террасах и других территориях, занятых слабыми грунтами.

Конституция СССР обязывает колхозы и других землепользователей, а также граждан страны эффективно, рационально и бережно использовать земельные угодья, обеспечить дальнейшее развитие мелнорации земель, в том числе осушение заболоченных территорий, сложенных слабыми грунтами.

Некоторые исследователи [12] считают, что площади слабых грунтов за десять лет (с 1980 по 1990 г.) значительно возрастут. Общая площадь слабых грунтов в 1985 г. составит около 13 тыс. км², из них 27% — для городского строительства, 18% — для линейного, 40% — для мелноративного и 15% — для других видов строительства.

При строительстве на слабых грунтах требуется осуществление специальных инженерных мероприятий по обеспечению устойчивости сооружений, поэтому капитальные затраты в этих условиях по сравнению с капитальными затратами при строительстве в обычных условиях возрастают на 3–5% (иногда на 10–20%).

Особенность инженерно-геологических исследований слабых грунтов заключается в необходимости детальной инженерно-геологической съемки строительных площадок, применения особых методик полевых и лабораторных исследований грунтов, использования для производства разведочных работ приборов и бурового оборудования специальной конструкции, в результате чего стоимость их проведения увеличивается на 15–20%.

Авторы выражают глубокую признательность д-ру геол.-минерал. наук, проф. *И.С. Комарову* за ценные замечания, сделанные им при рецензировании рукописи. Авторы также приносят благодарность сотрудникам ПНИИИСа за помощь, оказанную ими в проведении полевых и лабораторных исследований.

Глава 1. СЛАБЫЕ ГРУНТЫ КАК ОСНОВАНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

1.1. НОМЕНКЛАТУРА И КЛАССИФИКАЦИЯ СЛАБЫХ ГРУНТОВ

Общепринятого определения термина "слабые грунты" в настоящее время нет, хотя им пользуются строители, геологи, инженеры-геологи и научные работники уже более 100 лет. Пока этот термин еще не нашел своего отражения в номенклатуре грунтов СНиП П-15-74. Правда, такие разновидности слабых грунтов, как торф, заторфованный грунт, ил, насыпные и намывные грунты, получили довольно четкое определение в различных нормативных документах и понимаются всеми специалистами однозначно, что имеет большое значение для унификации инженерно-геологических терминов.

Л.С. Амарян (1972 г.) к слабым грунтам относит горные породы слабой степени литификации, образовавшиеся в водной среде в процессе осадконакопления и микробиологического распада гидрофильных частиц и обладающие в естественном залегании избыточной увлажненностью и отсутствием прочных межчастичных связей.

В.Д. Ломтадзе указывает, что все слабые водонасыщенные сильносжимаемые грунты образуются главным образом в результате аккумуляции тонкодисперсного материала механическим или химическим путем на дне морей, лагун, озер, болот, или на поймах рек, поэтому необходимо различать среди слабых грунтов отложения морские, лагунные, озерные, болотные и аллювиальные [11].

Некоторые авторы считают, что термин "слабые грунты" характеризует состав, состояние грунтов и процесс взаимодействия их с сооружениями. Например, А.К. Ларионов (1977 г.) слабыми грунтами называет различные глинистые, глинисто-пылеватые и органоминеральные образования, находящиеся в водонасыщенном состоянии ($\sigma = 0,8 \div 1$), обладающие текучей или текучепластичной консистенцией, структурной неустойчивостью, малой прочностью и высокой деформативностью.

Н.Я. Денисов и А. Вило (1965 г.) предлагают называть слабыми грунты, модуль общей деформации которых менее $(20 \div 30)10^5$ Па.

Н.А. Цытович (1965 г.) относит к категории слабых грунты с незначительной несущей способностью сильносжимаемые [$E < (0,5 \div 1) 10^5$ Па], структурные, на которых возводить сооружения без проведения специальных мероприятий затруднительно, а иногда и невозможно.

Унифицированной классификации слабых грунтов, приемлемой для всех видов строительства, пока не имеется. Так, В. Д. Казарновский* разработана частная классификация слабых грунтов для автодорожного строительства, учитывающая содержание органических веществ в грунтах, их генетико-фациальные и петрографические особенности. П.А. Дроздом (1971 г.) классификация слабых грунтов разработана применительно к мелиоративному строительству. Ее определяющим признаком является устойчивость сооружений в период эксплуатации. А.К. Деркацян и Н.П. Васильевым [7] для трубопроводного строительства создана классификация болот по проходимости транспорта.

* Казарновский В.Д. Принципы общей классификации слабых грунтов для дорожного строительства. — Тр. ин-та / СоюздорНИИ, 1973. вып. 64, с. 4–8.

Учитывая прикладной характер изучения грунтов и требования СНиП II-15-74, мы предлагаем следующее определение слабых грунтов: "Слабыми грунтами называются легкодеформирующиеся сильно сжимаемые грунты с низкой несущей способностью ($< 0,1$ МПа), требующие проведения при строительстве специальных инженерных мероприятий по увеличению несущей способности основания, усилению конструкции зданий и сооружений и уменьшению чувствительности их к повышенным неравномерным осадкам". В соответствии с этим определением в группу слабых грунтов попадают преимущественно субаквальные отложения слабой степени литификации, находящиеся в недоуплотненном водонасыщенном состоянии, обладающие высокой чувствительностью и свойствами тиксотропии. К таким грунтам относятся морские илы, пресноводные органические илы (сапропели), озерные глины, органогенные лагунные (лиманские) минеральные грязи, торфы, заторфованные и заиленные аллювиальные (старичные) отложения и другие сходные по генезису, составу и состоянию образования, включая различные насыпные и намывные грунты антропогенного происхождения, постепенно уплотняющиеся и упрочняющиеся во времени.

Номенклатура торфяных грунтов подробно разработана Л.С. Амаряном (1977 г.). Номенклатура иловатых грунтов и илов, предложенная М.И. Хазановым и А.Я. Рубинштейном (1975 г.), приведена в табл. 1. Общая классификация слабых грунтов дана в табл. 2.

Т а б л и ц а 1. Номенклатура иловатых грунтов и илов

Вид грунта	Относительное содержание органического вещества $q, \%$	Коэффициент пористости e	Число пластичности I_p	Показатель консистенции I_L
Иловатые грунты (морские, озерные, речные)				
Заиленные пески	0,03–0,1	$< 0,8$	$< 0,01$	< 1
Иловатые супеси	0,05–0,1	$< 0,9$	0,01–0,07	< 1
Иловатые суглинки	0,05–0,1	< 1	0,07–0,17	< 1
Иловатые глины	0,05–0,1	$< 1,5$	$> 0,17$	< 1
Минеральные илы (морские, озерные, речные)				
Песчанистые	0,03–0,1	$\geq 0,8$	$< 0,01$	≥ 1
Супесчаные	0,05–0,1	$\geq 0,9$	0,01–0,07	≥ 1
Суглинистые	0,05–0,1	≥ 1	0,07–0,17	≥ 1
Глинистые	0,05–0,1	$\geq 1,5$	$> 0,17$	≥ 1
Органические илы				
Илы органические (морские лиманные)	$> 0,1$	$> 1,5$	$> 0,17$	≥ 1
Сапропели (илы органические озерные, старичные)	$> 0,1$	$> 1,5$	$> 0,17$	≥ 1

П р и м е ч а н и я: 1. Относительное содержание органического вещества определяется по ГОСТ 23740–79. 2. Число пластичности I_p иловатых грунтов и минеральных илов определяют после удаления растительных остатков прокаливанием.

Т а б л и ц а 2. Общая классификация слабых грунтов

Усло- вия обра- зова- ния	Характерные типы отло- жений	Проч- ност- ные ха- ракте- ристики грунтов	Значения прочностных характеристик грунтов при коэффициенте пористости e , равном									
			40-30	30-22	22-15	15-9	9-3	3-2	2,0-1,6	1,6-1,2	1,2-0,9	0,9-0,7
			чрезвычайно слабых			слабых				слабых		

Торфа:

а) низко- с 0,08-0,1 0,10-0,12

зольные

волокнистые φ 25-4 25-4 - - - - -

слаборазло- E 0,1-0,3 0,2-0,5

жившиеся

($W_L =$

$\div 1400 \div$

$\div 2500)$

б) нормаль- с 0,12-0,15

Бо- но-зольные

лот- средней и φ - - 25-35 - - - - -

ные высокой сте- E 0,3-0,9

пени разло-

жения

($W_L = 900 \div$

$\div 1400)$

в) высоко- с 0,15-0,18 - - - - -

зольные φ - - 25-35 - - - - -

($W_L = 500 \div$ E 0,5-1,3

$\div 900)$

Заторфован- с 0,18-0,3

ные грунты φ - - - 20-30 - - - - -

($W_L = 200 \div$ E 1,3-5

$\div 500)$

Оцен-Самолет:

Экспериментальные данные	Экспериментальные данные	Экспериментальные данные
0,002-0,003	15-20	0,1-0,2

3. **Назначение** (9)

б) организм с ныи ($Q = 50 \pm$ -70)	-	0.003- 0.004 20-25 0.3-0.5
---	---	-------------------------------------

[illegible]

в) органические	0,004
неразрывные	0,015
$(Q = 30 \div 50)$	25-28
$\pm 50)$	0,5-0,9

Г) МНЕНА (

[illegible]

МОСКВЫ

а) стержень	-	-	-	-	-	-	-
$(M = 31 + 1) \cdot 10^3$	0.03	0.02 -	0.03 - 0.12	0.12 - 0.2	0.2 - 0.3		
F	1.4	4-8	8-15	15-23			

Mon-

сис. брусниче	-	-	-	0,08-	0,3-0,2	0,2-0,3
(п. ты $M_{II} =$				0,13		
гун. $= 12,5 \pm 0,8$) F				8-12	12-18	18-30

Сын

λ_{max}	band is	λ	T_{eff}	$\frac{M}{M_{\odot}}$	$\frac{R}{R_{\odot}}$
0.15-0.20					
0.20-0.25					
0.25-0.30					
0.30-0.35					
0.35-0.40					
0.40-0.45					
0.45-0.50					
0.50-0.55					
0.55-0.60					
0.60-0.65					
0.65-0.70					
0.70-0.75					
0.75-0.80					
0.80-0.85					
0.85-0.90					
0.90-0.95					
0.95-1.00					
1.00-1.05					
1.05-1.10					
1.10-1.15					
1.15-1.20					
1.20-1.25					
1.25-1.30					
1.30-1.35					
1.35-1.40					
1.40-1.45					
1.45-1.50					
1.50-1.55					
1.55-1.60					
1.60-1.65					
1.65-1.70					
1.70-1.75					
1.75-1.80					
1.80-1.85					
1.85-1.90					
1.90-1.95					
1.95-2.00					
2.00-2.05					
2.05-2.10					
2.10-2.15					
2.15-2.20					
2.20-2.25					
2.25-2.30					
2.30-2.35					
2.35-2.40					
2.40-2.45					
2.45-2.50					
2.50-2.55					
2.55-2.60					
2.60-2.65					
2.65-2.70					
2.70-2.75					
2.75-2.80					
2.80-2.85					
2.85-2.90					
2.90-2.95					
2.95-3.00					
3.00-3.05					
3.05-3.10					
3.10-3.15					
3.15-3.20					
3.20-3.25					
3.25-3.30					
3.30-3.35					
3.35-3.40					
3.40-3.45					
3.45-3.50					
3.50-3.55					
3.55-3.60					
3.60-3.65					
3.65-3.70					
3.70-3.75					
3.75-3.80					
3.80-3.85					
3.85-3.90					
3.90-3.95					
3.95-4.00					
4.00-4.05					
4.05-4.10					
4.10-4.15					
4.15-4.20					
4.20-4.25					
4.25-4.30					
4.30-4.35					
4.35-4.40					

б) суплики ($e > 1$)		c	0,02- 0,08	0,04-0,1	0,1-0,2	
	φ	-	3-8	8-12	12-18	-
	E		2-7	6-13	9-15	
в) супеси ($e > 0,7$)		c			0,08- 0,15	0,15- 0,25
	φ	-			15-25	25-35
	E				12-20	20-30
Кон- Рыхлые ти- пески		c				0,03- 0,10
нес-	φ	-				29-35
тал-	E					10-60
ые (эоло- вые) мор- ские и озер- ные						

Примечания. 1. В таблице приняты следующие обозначения: c – сцепление, 10^5 Па; φ – угол внутреннего трения, град; E – модуль деформаций, 10^5 Па; W_n – влажность полной влагоемкости, %; Q – содержание органического вещества, %; M_n – пластичность глинистых грунтов, %; τ – сопротивление сдвигу, 10^5 Па. 2. Значения прочностных и деформационных характеристик искусственных грунтов (намывных, насыпных, отвалов грунтов, отходов производства и т.п.) ввиду их большого разнообразия в данной таблице не приведены (см. п. 2.6).

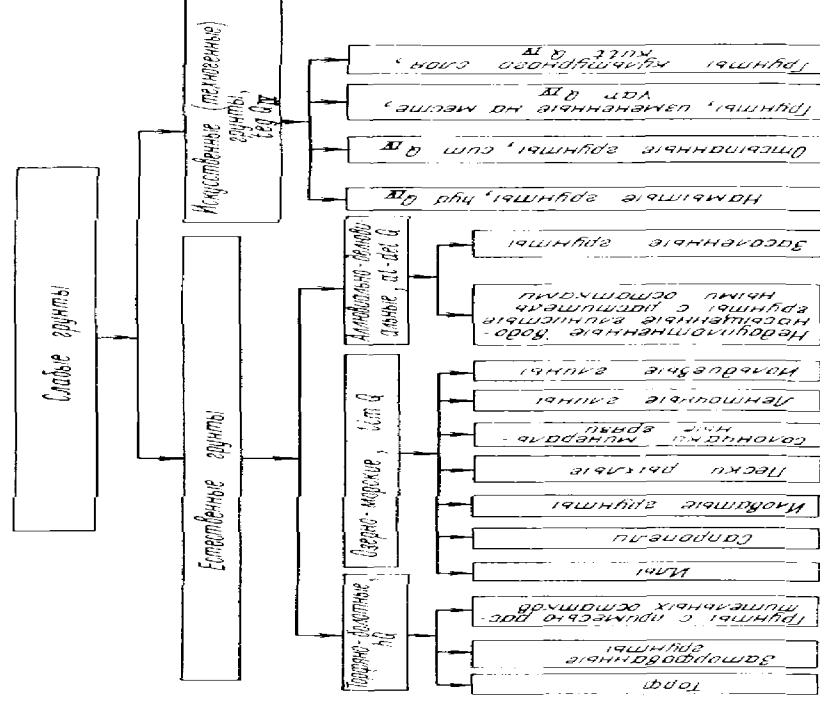


Рис. 1. Геодегистическая схема основных видов слабых грунтов (по Ф.С. Кабану)

Сводная геолого-генетическая схема основных видов слабых грунтов, используемых в качестве оснований зданий и сооружений при различных видах строительства, разработанная Ф.С. Канаевым, показана на рис. 1.

1.2. ОПЫТ СООРУЖЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ В СССР И ЗА РУБЕЖОМ

Строительство на слабых грунтах имеет древнюю историю. Например, в Швейцарии и Северной Италии в торфах обнаружены остатки свай, датированных бронзовым веком. Во Франции найдены разрушенные постройки на болотах периода железного века. В Римской империи, Франции и Германии во II в. н.э. на болотистых грунтах строили дамбы, дороги с деревянным настилом, прокладывали каналы и водопроводные трубы [4]. Много поселков, крепостей и городов построено на затопляемых поймах рек, на низких берегах озер и морей, сложенных торфом, илами, сапропелями (например, Таллин, Архангельск, Ленинград, Венеция, Антверпен и др.).

Строительство сооружений на слабых грунтах связано с определенными трудностями и требует больших затрат средств и времени. Это обусловлено их низкой несущей способностью, высокой сжимаемостью и водопроницаемостью. Сооружения, построенные на слабых грунтах, как правило, испытывают значительные неравномерные и длительные осадки. Котлованы фундаментов нередко заполняются водой, грунты приобретают высокую влажность, и требуется проведение мероприятий по их осушению (водоотлив, дренаж и пр.). При устройстве фундаментов применяют кессонный способ проходки, искусственное замораживание грунтов и специальные мелиоративные работы.

На слабых грунтах затрудняется широкое использование средств механизации и обычных транспортных средств как из-за их небольшой несущей способности, так и из-за низкой проходимости колесного транспорта. В этих условиях применяют гусеничный транспорт, а подчас понтоны, земснаряды и даже вертолеты (например, при устройстве буровых вышек, мачт ЛЭП и дорог в Западной Сибири).

С целью снижения удельной нагрузки на слабый грунт от массы сооружения и повышения его устойчивости дамбы и каменно-набросные плотины строят распластанного профиля, а откосы каналов и выемок делают пологими. Как правило, на слабых грунтах сооружаются преимущественно низконапорные, реже средненапорные плотины из местных материалов — земляные, реже — каменно-набросные.

В процессе строительства на слабых грунтах необходимо строго выдерживать определенный темп загрузки фундаментов с учетом скорости их консолидации, иначе может произойти выдавливание слабых грунтов из-под основания сооружения.

При строительстве и эксплуатации крупных промышленных сооружений, построенных на слабых грунтах, должна быть организована служба наблюдений за их осадками и режимом грунтовых вод с помощью сети геодезических реперов и наблюдательных гидрогеологических скважин. Это позволит судить о величине осадок фундаментов и отдельных частей сооружений и об изменении гидрогеологических условий на площадке, а также осуществлять прогноз подтопления. Ускоренное, по

сравнению с намеченным графиком, опускание марок, заложенных, например, в основании плотины, указывает на повышенный темп загрузки. В этом случае необходимо остановить строительство на данном участке или обеспечить быструю консолидацию грунтов путем закладки дополнительных дренажных скважин. Поднятие марок (по данным нивелировки), заложенных в основании насыпи, отсыпаемой, например, на торфах, указывает на выпирание слабых грунтов из-под ее основания. Для предотвращения аварии здесь следует производить отсыпку банкета.

Повышение уровня воды в наблюдательных скважинах и ее помутнение служат предупреждением о нарушении нормальной работы дренажных устройств. В этом случае рекомендуется уменьшить напор воды за плотиной и восстановить эффективную работу дренажей или заложить дополнительные дренажные скважины и прорези.

Как в СССР, так и за рубежом накоплен достаточно большой опыт строительства и эксплуатации различных зданий и сооружений, построенных на слабых грунтах. Приведем наиболее интересные и характерные примеры.

В СССР впервые на торфяных грунтах в 1932 г. была сооружена Софринская земляная плотина высотой 5 м [4].

При строительстве Беломорско-Балтийского канала (1929–1931 гг.) и канала имени Москвы (1932–1937 гг.) был накоплен опыт устройства противифльтрационных экранов в откосах каналов и днищах, дренажей и различных гидротехнических сооружений.

По плану ГОЭЛРО в 1933 г. была построена Нижне-Свирская ГЭС. В основании плотины залегают девонские глины с прослойками водонасыщенных песков и очень мягких глицистых грунтов мощностью до 1,5–2 м, крайне неоднородных по плотности. Возведение ГЭС с массивными бетонными сооружениями в подобных условиях было осуществлено впервые в мировой практике гидротехнического строительства. Постройкой Нижне-Свирской ГЭС была заложена основа строительства в нашей стране крупных гидроэлектростанций на многоводных равнинных реках на нескальном основании и дан толчок к развитию строительства гидроузлов на мягких основаниях.

В 1964 г. на слабых аллювиальных суглинках с прослойками торфа и ила мощностью 5–18 м была построена земляная плотина Камской ГЭС. В основании плотины оставлен слой торфа мощностью 3 м. По наблюдениям за 15 лет осадка плотины достигла 165 см, что больше в 2–2,5 раза расчетной. Через 7 лет после постройки осадка плотины прекратилась.

В 1956 г. введена в эксплуатацию Каховская ГЭС. Плотина высотой 30 м создает напор 16 м. В основании земляной плотины, в русле реки, под небольшим слоем песчаных отложений залегает толща лиманно-морских и пресноводных илов, которые в отдельных местах выходят на поверхность. На этих илах мощностью 2,5–7 м впервые в практике гидротехнического строительства возведена земляная плотина распластанного профиля из мелкозернистых песков насыпным и намывным способами. Земляную плотину предполагалось возвести за 2 года, чтобы уплотнение илов произошло в процессе строительства. Однако этот срок был сокращен до 6 мес, поэтому возникли опасения (которые не оправдались) относительно возможности выпора илов из-под плотины. Специальными наблюдениями за осадкой плотины была выяв-

лена максимальная величина осадки основания — 1,12 м, близкая к расчетной (около 1 м). Через 3,5 года после возведения плотины степень консолидации илов составила 76—85%. Через 15 лет осадка илов в основном закончилась. Влажность илов снизилась с 87 до 61%, а коэффициент пористости — с 2,3 до 1,7. Деформации плотины не наблюдалось.

Автодорожный переход через долину Эйвона (Англия) проходит по насыпи высотой до 8 м. В основании насыпи залегают иловые глины мощностью до 1,5 м, подстилаемые слабыми органическими алевроитопесчаными глинами мощностью до 1,2 м. Для обеспечения устойчивости насыпи и ускорения консолидации глин в основании насыпи были устроены дренажные прорезы, заполненные камнем и песком. Эти меры оказались эффективными и консолидация основания завершилась почти одновременно с окончанием строительства [3].

За Полярным кругом в СССР в 1973 г. построена Усть-Хантайская ГЭС на правом берегу р. Хантайки и земляная плотина высотой до 33 м и длиной 2,5 км. В основании плотины оставлен мощный слой слабых водонасыщенных глинистых грунтов мощностью 3—5 м, которые местами находились в мерзлом состоянии. Это оказалось технически оправданным, так как осадки были вполне допустимыми. Для защиты плотины от размыва фильтрационными водами из водохранилища сделан заглубленный горизонтальный дренаж с двухслойным обратным фильтром, наличие которого способствовало консолидации слабых грунтов и предохранило основание от суффозионного разрушения.

В Швеции, на р. Стора-Люль за Полярным кругом построена плотина Мессауре*. В основании плотины высотой 101 м находятся граниты, перекрытые толщей аллювиальных и моренных отложений мощностью до 60 м, представленных слабоуплотненными гравелистыми и мелкозернистыми песками с глинистыми и иловатыми прослойками переменной мощности. Для надежного сопряжения плотины с основанием слабые грунты вследствие их малой уплотненности были удалены из под основания ядра и низовой призмы. Во избежание больших выемок под верховой призмой аллювий оставлен, поэтому часть плотины находилась на слабых грунтах. В основании плотины на глубину 20—30 м устроена двухрядная цементационная завеса. Осадки основания плотины составляли 1—7% ее высоты.

В Канаде на р. Бридж в 1955—1959 гг. построена каменно-набросная плотина Терцаги. Плотина высотой 61 м возведена на сильно сжимаемом основании, состоящем из аллювиальных гравийно-песчаных отложений с прослойками мягких глин мощностью до 8—10 м. Цементационная противofильтрационная завеса под плотинной пространяется до глубины 100 м и сопрягается со скалой. По данным наблюдений контрольно-измерительной аппаратуры, установленной в основании и в теле плотины, за период с 1957 по 1963 г. зафиксированы осадки основания до 3 м, которые, однако, не отразились на нормальной эксплуатации плотины [13].

В Румынии в долине р. Дунай в 1967 г. построены земляные плотины и дамбы обвалования высотой от 4 до 20 м. В основаниях сооружений

* Айрапетян Р.А. Проектирование каменно-набросных и каменно-земляных плотин. — М.: Энергия, 1968, 125 с.

залегали прослойки слабых грунтов с низкими прочностными характеристиками и высокой сжимаемостью. Одна из плотин [18] построена на толще иловатых грунтов мощностью 5–7,5 м с консистенцией от мягкопластичной до текучепластичной, пористостью 40–50% и модулем деформации $(50 \div 80) \cdot 10^5$ Па. Для обеспечения устойчивости основания было предусмотрено уплотнение откосов и устройство дренирующих песчаных прослоек на уровне подошвы сооружения. Для ускорения процесса консолидации слабых грунтов сооружен дренаж по всей длине плотины. Плотина эксплуатируется нормально.

В Японии на слабых аллювиальных глинах мощностью до 8 м в 1965 г. была построена земляная плотина Саури высотой 21 м. Для ускорения осадки плотины в толще глин устроены песчаные дрены. Деформаций плотины не наблюдается [20].

Рассмотрим наиболее интересные примеры из опыта строительства промышленных и гражданских зданий и сооружений на слабых грунтах. В 50-х годах в Мехико в сложных условиях на озерно-вулканических слабых водонасыщенных грунтах построена башня "Латино Американа". При бурении были вскрыты слои насыпного грунта толщиной 5,5 м, вулканического пепла толщиной 3,6 м и озерных глин толщиной 24,4 м с прослоями вулканического пепла. Влажность озерных глин на глубине 10–33 м составляла 100–350%, сопротивление одноосному сжатию соответствовало $(0,7 \div 1,4) \cdot 10^5$ Па [3]. Многие соседние с башней здания, построенные в аналогичных грунтовых условиях в первой половине XX в., дали аварийную осадку. Например, осадка Национального театра составляла: к 1910 г. — 25 см, к 1912 г. — 76 см, к 1916 г. — 127 см и к 1921 г. — 178 см. С учетом предыдущего опыта строительства башня "Латино Американа" высотой 140 м (43 этажа) построена на сваях с фундаментом "плавающего типа", опущенным на глубину 13 м. Это позволило снизить нагрузку на основание за счет взвешивающего влияния грунтовых вод. Благодаря частичной плавучести фундамента появилась возможность уменьшить нагрузки на сваи, опущенные в переслаивающие пески и глины, в результате чего осадки основания существенно уменьшились и оказались вполне приемлемыми.

Телефонная станция Альбани в Нью-Йорке (США), выстроенная в 1928 г. на ленточных глинах мощностью 29 м, имеет плавающий фундамент в виде толстой плиты. При заглублении фундамента на 7,2 м существенно уменьшилась нагрузка от 12-этажного здания. Осадка составила 25 м. Здание эксплуатируется нормально.

По данным наблюдений [10] за деформациями 23 жилых зданий высотой 5–12 этажей, возведенных на слабых грунтах, за 3–13 лет их эксплуатации осадки достигли 23–75 см. При этом отмечены три фазы: 1) начальная, 2) максимальных скоростей $(12–19 \text{ см/г})$ и 3) конечная — стабилизации, которая длится многие годы и при нормальной эксплуатации зданий. Например, 10-этажный корпус в Чикаго (США), построенный в 1890 г., имеет в основании толщу мягких чикагских глин мощностью до 5,8 м. Осадка основания продолжается в течение более 80 лет. К концу строительного периода осадка фундамента составила 22,9 см, через 5 лет она возросла до 45,8 см, а через 50 лет достигла 61 см [3]. Деформаций здания не наблюдается, однако неравномерные осадки весьма опасны.

По данным Г.Н. Косаренко и Г.Д. Яроцкого (1977 г.), неравномерные уплотнения грунта под железобетонной плитой вызвали крен зда-

иния в г. Ростове-на-Дону, в 4–5 раза превышающий допустимый. Отклонения стены от вертикали за год составили 76–90 см вместо 15 см по нормам.

Вследствие неравномерных осадок основания наклонилась знаменитая "падающая" Пизанская башня в Италии и креи ее продолжает возрастать год от года.

Поучительным примером является строительство в 1913 г. Транскоисского элеватора (Канада), который опрокинулся, но не был разрушен и остался в наклонном положении под углом 63° к горизонту. В основании залегаги мягкие озерно-ледниковые глины мощностью до 10,7 м с несущей способностью около 0,25 МПа в верхних уплотненных слоях и 0,19 МПа — в нижних. Испытания проводились лишь в верхних уплотненных слоях, и уменьшение несущей способности грунтов с глубиной не было учтено.

На аллювиально-лиманных илах, залегающих под водой, мощностью 1–5 м в 1973 г. построен доковый цех высотой 13,2 м и площадью 18х8 м Ильичевского судоремонтного завода. Фундамент цеха возведен на рефулированных песках до отметки +1,5 м с забивкой в них свай. Консолидация ила под насыпью закончилась за 5 лет*.

На морских илах мощностью 14–18 м построен Одесский портовый элеватор. Фундамент его основан на песчано-гравелистой подушке толщиной 3 м. Осадки за 10 лет (1958–1968 гг.) достигли 127–129 см и близки к расчетным. Деформаций элеватор не испытывал, так как осадки были равномерными.

Одним из эффективных способов строительства на слабых грунтах является их предпостроечное уплотнение пригрузкой песчаным слоем. Для ускорения процесса уплотнения используют вертикальные дренаы. Так, при строительстве восточной стенки дока в порту Антверпена встречены мягкопластичные синевато-черные илы мощностью до 6 м. Для их уплотнения пришлось применить дренаж из картонных дрена в сочетании с электроосмосом. В процессе работ было заложено 25 750 картонных дрена, забито 500 стальных анодов и 88 водоотводящих грубок-катодов, по которым пропускался постоянный ток напряжением 30 В. В результате илы были осушены и достаточно уплотнены, что позволило избежать долговременных осадок сооружения и обеспечило надежную устойчивость основания.

Б.Н. Солодовников (1973 г.) исследовал сооружение на мощных морских илах на Дальнем Востоке плавающих насыпей из песка с частичным боковым выдавливанием илов в стороны. Если илы залегают под слоем песка, торфа или воды, то они уплотняются хорошо, примерно на 50% их мощности. При этом влажность со 100% понижается до 40–50%, а коэффициент пористости — с 2 до 1.

В прибрежной лиманной зоне Азовского моря в 1969 г. построена защитная дамба методом отжатия илов из-под основания. Мощность морских илов составляла 6 м, а ниже залегаги плотные глины мощностью до 3 м. При высоте насыпи 5 м (давление $0,67 \cdot 10^5$ Па) происходило плавное уплотнение ила, а при ее высоте 6,5 м (давление в по-

* Марченко А.С. Отжатие илов в основании докового цеха Ильичевского. СРЗ. — Транспортное строительство, 1974, № 5, с. 19–20.

дошве $0,8 \cdot 10^5$) шел интенсивный процесс выдавливания ила из-под основания дамбы. В результате подошва насыпи просела на 1,6–2,3 м, а в основании остался более плотный ил с большим содержанием обломков ракушек. Деформации основания практически затухали через 4 мес. Возведение дамбы методом отжатия илов из-под основания позволило отказаться от варианта строительства с двойным шпунтовым рядом и дало экономию при строительстве около 2,5 млн. руб.

В практике строительства на слабых грунтах в СССР применяют песчаные сваи, особенно в условиях агрессивности грунтовой воды к бетону или для экономии цемента и металла, а также известковые сваи — в грунтах с большим коэффициентом пористости.

В США предложен патент на устройство на слабых грунтах дорожного основания с использованием пенистых материалов [19]. Метод основан на сооружении легко плавучего основания из пенопласта, пенополистирола и пенополиуретана с прочностью на сжатие 0,5–7 кПа и плотностью 60–320 кг/м³. При плотности такого материала 96 кг/м³ толщина его слоя должна быть не более 35 см.

С целью сокращения объема земляных дорожных работ и потребности в привозных песчаных материалах в СССР и за рубежом применяют материал, изготавливаемый из полиэфирного или пропиленового волокна: в СССР — "дорнит", в США — "типар", во Франции — "бидим". Эти материалы водонепроницаемы с коэффициентом фильтрации 30–70 м/сут, который при давлении $(0,5–2) \cdot 10^5$ Па снижается до 23–60 м/сут. Под нагрузкой материалы сжимаются до 40–50%. При использовании этих материалов уменьшается осадка насыпи на болоте на 20–30% и появляется возможность движения по насыпи транспорту.

Э.Г. Годес (1979 г.) приводит описание насосной станции, построенной на илистых текучих суглинках и глинах с прослойками илов. Грунты основания под круглым днищем станции диаметром 14,1 м укрепляли с помощью вибропесчаных свай вместо запроектированных деревянных. Вибропесчаные сваи длиной по 12,5 м и диаметром 350 мм располагали в шахматном порядке с шагом 100 см в четыре ряда. Это позволило укрепить полосу шириной 4 м по контуру стен насосной станции. Сваи изготавливали путем забивки вибропогружателем металлической трубы с раскрывающимся башмаком. Этот способ позволил сэкономить 110 т металлического шпунта и избежать применения 360 тыс. деревянных свай.

Технико-экономический анализ, выполненный Н.Н. Морарескулом (1970 г.) с целью обоснования рентабельного способа устройства фундаментов на слабых грунтах, показал, что наименьшую стоимость имеют сборные фундаменты на песчаных подушках, несколько большую — фундаменты на естественном основании с прорезкой торфа. При глубине болот 4 м наиболее экономичны свайные фундаменты, которые менее трудоемки. При глубинах болот 1–2 м стоимость фундаментов с прорезкой торфа, свайных и на песчаных подушках, примерно одинакова. Однако фундаменты с прорезкой торфа более трудоемки, особенно при увеличении глубины болот.

Для промышленных зданий на слабых грунтах с нагрузкой на опору до 500 т наиболее эффективны свайные фундаменты. Но последние вследствие особых условий работы получаются тяжелыми и дорогими. Если в основании залегают большие толщи слабых грунтов, то обычно устраивают фундамент из жестких висячих свай. Однако наблюдения по-

казали, что большинство сооружений на свайных фундаментах испытывало значительные осадки во времени, например древние соборы в Боровске, Исаакиевский собор, один из станков металлургического завода в Новокузнецке, жилые здания на Фрунзенской набережной в Москве, некоторые промышленные здания в Риге [1].

Глава 2. СОСТАВ, СВОЙСТВА, УСЛОВИЯ ЗАЛЕГАНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ СЛАБЫХ ГРУНТОВ

2.1. ТОРФ И ЗАТОРФОВАННЫЕ ГРУНТЫ

Торф — органогенная осадочная горная порода, образующаяся в результате отмирания, отложения и разложения остатков болотной растительности при избыточном увлажнении и недостаточном доступе воздуха. Твердое вещество высушенного торфа состоит из не вполне разложившихся растительных остатков и продуктов разложения — гумуса, а также неорганических примесей и минеральных включений.

Заторфованность территории СССР, особенно в лесной и лесотундровой зонах, составляет от 1—3 до 25—40% и более. Торфяные отложения распространены неравномерно: большая их часть — на сильнозаболоченных низменностях Полесья, Мещеры, Карелии, Большеземельской тундры, Западной Сибири, бассейнов рек Двины, Печоры, Оби и Амура и незначительная — на обширных пространствах черноземной полосы и южных степей.

Главным торфообразующим фактором является постоянное увлажнение субстрата, что обеспечивает развитие болотной растительности и создает благоприятные условия для накопления неполностью разложившихся растительных остатков.

Водное питание торфяников различается по степени минерализации и является решающим фактором, определяющим характер растительного покрова и тип торфяной залежи. Выделяют три типа торфяников — верховой, низинный и переходный.

Торфяники верхового типа получают водное питание главным образом за счет атмосферных осадков, бедных минеральными солями. Растительный покров здесь образуют растения, не требующие богатого минерального питания (сосна, пушица, сфагновые мхи).

Торфяники низинного типа питаются преимущественно грунтовыми и поверхностными водами, богатыми минеральными солями. В этих условиях развивается растительность, требовательная к богатому минеральному питанию (береза, ольха, осоки, зеленые мхи).

Торфяники переходного типа занимают промежуточное положение и развиваются в условиях несколько обедненного минерального питания.

Наиболее благоприятные условия для образования торфяников создаются в зоне избыточного увлажнения с высокой относительной влажностью воздуха, обилием влаги и близким залеганием уровня грунтовых вод. В южной зоне с недостаточным увлажнением условия для существования торфяников крайне неблагоприятны. В геологическом отношении близкое залегание к поверхности слабодопроницаемых глинистых пород способствует повышенному увлажнению субстрата и развитию болотной растительности, а распространение водопроницаемых песчаных грунтов или трещиноватых скальных пород неблагоприят-

но для процесса торфообразования. Подавляющее большинство торфяников приурочено к отрицательным формам рельефа, где застаиваются (или выклиниваются) поверхностные и грунтовые воды.

Благоприятные для торфообразования геоморфологические условия — обширные зандровые равнины, долины рек, а также пологие склоны речных террас и водоразделов в зоне избыточного увлажнения; близкое расположение к поверхности уровня подземных вод, наличие грунтовых вод напорного питания и пышное развитие влаголюбивой растительности — обеспечивают образование торфяников даже при неблагоприятных климатических условиях. Совокупность перечисленных выше факторов и определяет в конечном счете заторфованность территории, преимущественное распространение определенных типов торфяников, глубину и размеры преобладающих торфяных отложений.

Заторфованность территории СССР имеет четко выраженную зональность. Наименьшая заторфованность (менее 0,1%) наблюдается в южных районах — в степной зоне страны; севернее — в лесостепной зоне заторфованность повышается до 0,1—1%. Лесная зона характеризуется заторфованностью, достигающей 20% и более. На Крайнем Севере в границах тундры заторфованность снижается вследствие неблагоприятных климатических и почвенных условий для развития болотной растительности. В долинах рек и низменностях (в зоне лесов) образовались обширные заболоченные и заторфованные пространства, носящие название "торфяных бассейнов", где заторфованность достигает 30—50%. К их числу относятся Северное Полесье, Мещерская низменность, Западно-Сибирская низменность, долины среднего течения рек Волги (от г. Горького до Казани), Северной Двины, Печоры, верховья Камы, бассейн оз. Ильмень и др. В зонах с наибольшей заторфованностью торфяники занимают значительные площади. На территории с низкой заторфованностью торфяники занимают небольшие по площади участки.

В зоне таежных лесов широко развиты торфяники верхового типа, южнее — в лесостепной и степной зонах доминируют болота низинного типа. В лесотундре и в зоне смешанных лесов низинные и верховые болота встречаются примерно в равном количестве. Средняя мощность торфа на торфяниках, расположенных в лесной зоне европейской части СССР, составляет 2—3 м и убывает к югу и северу, доходя до 1,5 м. Максимальная мощность торфа на крупных торфяниках превышает 8—10 м.

Генетическая классификация торфов охватывает 37 видов, встречающихся в торфяных залежах месторождений, расположенных в европейской части СССР. Как уже отмечалось, все торфы объединены в три типа: низинный, переходный и верховой. В свою очередь каждый тип разделяется на три подтипа: лесной, лесо-топьяной и топьяной. В пределах подтипов выделяются группы: древесная, древесно-травяная, травяная, травяно-моховая и моховая.

Наименование торфа назначается по данным глазомерного определения по известной шкале Вольгрена, затем название его уточняют по результатам лабораторных микроструктурных исследований. Виды торфов устанавливаются по соотношению в них остатков растительности отдельных групп торфообразователей. Каждый вид торфа характеризуется более или менее постоянными значениями физико-химических свойств.

Торфы относятся к полидисперсным многофазовым системам. Дисперсность зависит от генезиса, ботанического состава и степени разло-

жения торфа. Важнейшей особенностью торфов является большое содержание в их составе волокнистой массы. В торфах содержится 30–50% частиц размером более 250 мкм, что и придает им большую пористость и повышенную влагоемкость. Частицы торфа размером 5–250 мкм составляют более 25–35% и представляют собой остатки растений. Тонкодисперсных фракций в торфе содержится 8–20%. В их состав входят продукты разложения органического вещества, потерявшего структуру. Фракции обладают низкой влагоемкостью, но определяют ионообменные и адсорбционные свойства торфа, поскольку обладают высокой удельной поверхностью [2].

Дисперсность низинных торфов слабо зависит от степени разложения, а у верховых отмечается резкое увеличение тонкодисперсных фракций по мере роста степени разложения. При одинаковой степени разложения верховые торфы обычно имеют несколько более высокую дисперсность по сравнению с низинными торфами. Сухое вещество торфов состоит из органических и минеральных веществ, содержание которых определяется химизмом водно-минерального питания торфяника и характером исходного субстрата растений-торфообразователей. О величине содержания органического вещества в торфах обычно судят по зольности, т.е. по массе остатка, полученной после его прокаливания, отнесенной к абсолютно сухой навеске торфа, выраженной в процентах. Зольность торфов изменяется от 1–3 до 40–50% и более. Согласно СНиП II-15-74, к торфам относятся грунты с содержанием растительных остатков более 60% и зольностью 40%. При содержании растительных остатков 20–60% грунты считаются заторфованными.

В болотоведении к торфам относятся органические отложения с зольностью менее 50%. При этом выделяют торфы нормально-зольные, зольность которых определяется только минерализацией исходного материала растений-торфообразователей, и высокозольные, у которых зольность повышена за счет приноса песчано-глинистого материала с минеральных берегов торфяника. Среди нормально-зольных торфов наименьшей зольностью (2–3%) отличаются верховые торфы моховой группы. Низинные торфы имеют более высокую зольность. Наиболее минерализованными являются низинные торфы древесной группы (10–16%). Важнейшие физико-механические показатели торфов приведены в табл. 3. Эти показатели во многом зависят от ботанического состава и степени разложения торфов. Под степенью разложения торфа, согласно ГОСТ 10650–72, понимается процентное содержание в нем бесструктурной массы, заключающей наряду с гуминовыми веществами и мелкие частицы негумифицированных остатков.

Естественная влажность торфов весьма высокая и изменяется от 200 до 2200% по отношению к массе сухого вещества. Влажность зависит главным образом от ботанического состава, вида торфа, степени разложения, зольности и структуры торфяной залежи. С увеличением степени разложения и с уменьшением плотности влажность торфов возрастает. Увеличение зольности вызывает снижение влагосодержания в торфе. Влагосодержание в низинных торфах закономерно возрастает по группам: древесная — в среднем 540%, древесно-травяная — 655%, травяная — 800% и травяно-моховая — 860%. Верховые торфы отличаются повышенной влагоемкостью и имеют влажность 650–1060%, которая достигает у моховых торфов (при степени разложения 2–3%) 2200%. Нижний предел содержания гравитационной воды, отвечающий полной

Т а б л и ц а 3. Основные физико-механические показатели торфов
(по Л.С. Амаряну, 1972)

Категория торфяных грунтов	Полная влагоемкость W_n , %	Зольность A_c , %	Плотность частиц грунта $\rho_{уд}$, г/см ³	Плотность сухого грунта $\rho_{сг}$, г/см ³	Коэффициент пористости e	Сцепление $c \cdot 10^5$, Па	Модуль деформации $E \cdot 10^5$, Па
Мало-зольные волокнистые (низкой степени разложения)	1400–2500	1,5–3	1,6–1,7	0,04–0,07	22–40	0,09–0,12	0,15–0,55
Нормально-зольные	900–1400	3–8	1,5–1,55	0,07–0,1	13–22	0,12–0,15	0,25–0,9
Высоко-зольные	500–900	8–40	1,45–1,5	0,11–0,14	9–13	0,15–0,18	0,5–1,3
Заторфованные грунты	200–500	40–90	1,5–2	0,2–0,4	3–9	0,18–0,3	1,3–1,5

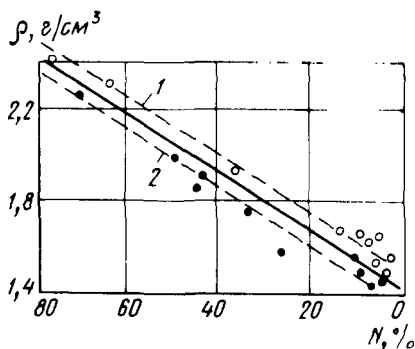
влагоемкости в зависимости от вида и степени разложения торфа, колеблется от 600 до 2400%.

Полная влагоемкость относится к числу классификационных показателей физико-механических свойств торфа, поскольку объем иммобилизованной влаги в торфе является прямым следствием структуры торфообразователей и состояния этих составляющих по степени распада. В зависимости от категории торфяных грунтов она изменяется от 200 до 2500% (см. табл. 3). Суммарное содержание прочносвязанной (физико-химической) и рыхлосвязанной (микрокапиллярной) воды в торфах 115–430%, физико-химической воды 45–80% и гигроскопической 4–13%.

Плотность торфов зависит главным образом от степени разложения и зольности. С увеличением степени разложения с 5 до 60% их плотность закономерно снижается с 1,6–1,7 до 1,4–1,5 г/см³. Увеличение зольности вызывает повышение плотности, которая у заторфованных грунтов возрастает до 1,7–2 г/см³. Низинные торфы, имеющие обычно более высокую зольность, отличаются повышенными значениями плотности (рис. 2).

Плотность торфов при естественной влажности весьма мала, например у верховых торфов в неосушенной залежи она не превышает 1 г/см³, а у торфов низинного типа она более высокая – 1–1,2 г/см³; у нормально-зольных торфов в условиях их естественного залегания отмечается весьма низкая плотность – от 0,07–0,15 до 0,2–0,5 г/см³. Пористость торфов естественной влажности соответственно очень большая и составляет для верховых торфов 93–96%, для низинных – 90–95%, снижаясь у заторфованных грунтов до 80–88%.

Рис. 2. Зависимость плотности ρ от зольности N и степени разложения R торфов в районе г. Череповца
1 — при $R = 5 \div 10\%$; 2 — при $R = 50 \div 60\%$



Торфы обычно полностью насыщены водой, поэтому степень уплотненности торфяных грунтов определяется уровнем их влагонасыщения. Установлена весьма тесная корреляционная взаимосвязь между влажностью и коэффициентом пористости торфов (рис. 3).

Разнородный характер органической и минеральной частей торфов определяет разнообразие форм и размеров пор структурного каркаса. Наряду с крупными порами волокнистого материала остатков растительных тканей имеется много мелких внутрисосудистых и внутриклеточных пор. Наличие глинистых частиц и коллоидных фракций способствует образованию множества очень мелких пор, что создает высокую общую пористость торфов.

Водопроницаемость торфов довольно изменчива и зависит от их уплотненности, степени разложения, зольности и геоботанического состава. Коэффициент фильтрации различных торфов изменяется от 0,01–0,001 до 1–80 м/сут. Благодаря слоистости торфяной залежи неред-

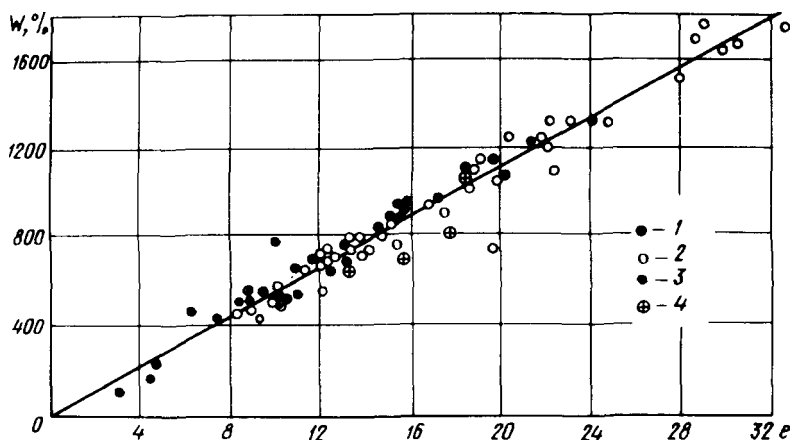


Рис. 3. Зависимость влажности W от коэффициента пористости e торфов в районе г. Череповца
1 — слаборазложившийся; 2 — слаборазложившийся, погребенный насытью; 3 — средней и высокой степени разложения; 4 — то же, погребенный насытью

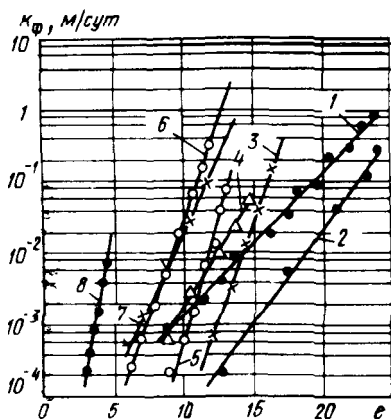


Рис. 4. Зависимость коэффициента фильтрации k_f от коэффициента пористости e торфа (по Л.С. Амаряну, 1969 г.)

1 — верховой со степенью разложения 5%; 2, 3, 4 — то же, 10% (фильтрация горизонтальная); 5 — то же, 35% (фильтрация под углом 45°); 6 — низинный торф со степенью разложения 35%; 7 — то же, 20%; 8 — то же, 50% (фильтрация горизонтальная)

ко отмечаются значительно более высокие значения коэффициента фильтрации в горизонтальном направлении, т.е. по напластованию. Водопроницаемость уплотненных низинных торфов высокой степени разложения приближается по своей величине к водопроницаемости глин, а фильтрационная способность слаборазложившихся верховых торфов близка к показателям фильтрации песков мелкой и средней крупности. Со временем водопроницаемость торфов уменьшается вследствие уплотнения залежи, ее газонасыщения и коагуляции. Зависимость коэффициента фильтрации от степени уплотненности торфов показана на рис. 4.

Сжимаемость торфов весьма высокая. Наибольшей сжимаемостью обладают верховые торфы малой степени разложения, у которых модули общей деформации составляют $(0,15 \div 0,55) \cdot 10^5$ Па. Торфы средней и высокой степени разложения и повышенной зольности менее сжимаемы и имеют модули деформации, равные $(0,5 \div 1,3) \cdot 10^5$ Па. При компрессионных испытаниях торфов в одометрах без возможности бокового расширения выявлено, что сжимаемость низинных торфов практически прекращается при давлении около $1,2 \cdot 10^5$ Па после отжатия из торфа свободносвязанной капиллярной воды, тогда как верховые слабо-разложившиеся торфы, имеющие высокую пористость и малую жесткость скелета, продолжают уплотняться вплоть до давления $(2,5 \div 3) \cdot 10^5$ Па. При нарушении естественной структуры торфов показатели сжимаемости увеличиваются примерно на 10–30%.

Прочностные показатели торфов определяются главным образом уровнем влажности, характеризующим степень их уплотненности, а также видом торфа и степенью разложения.

Сопротивление сдвигу в неконсолидированном состоянии соответствует начальной прочности торфа. Сцепление неуплотненных торфов составляет $(0,07 \div 0,18) \cdot 10^5$ Па; угол внутреннего трения для моховых торфов с влажностью около 1000% — 7–20°, для древесно-травяных с влажностью 300–600% — 15–25°.

Для неуплотненных торфов характерен большой диапазон значений сцепления и угла внутреннего трения. При уплотнении и уменьшении

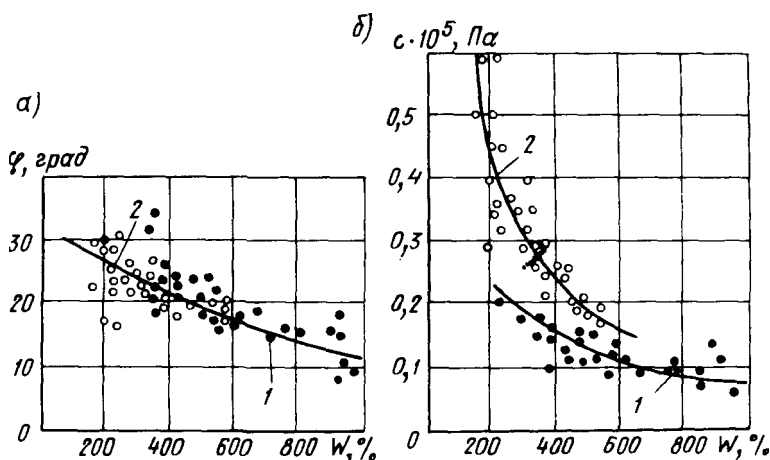


Рис. 5. Зависимость угла внутреннего трения φ — а и сцепления c — б неуплотненного (1) и уплотненного (2) торфа от влажности W (по Л.И. Кузнецовой, 1972 г.)

влажности до 150–250% прочностные показатели торфов заметно стабилизируются. Значения углов внутреннего трения при этом возрастают по прямой зависимости с 15–17 до 35°, а сцепление увеличивается в 4 раза — с 0,15 до $0,6 \cdot 10^5$ Па (рис. 5).

Заторфованные грунты, согласно СНиП П-15-74, по относительному содержанию растительных остатков q в общем объеме пробы подразделяются на слабозаторфованные ($0,1 < q \leq 0,25$), среднезаторфованные ($0,25 < q \leq 0,4$) и сильнозаторфованные ($0,4 < q \leq 0,6$). Заторфованность присуща в основном глинистым грунтам. При этом примерно в 80% случаев степень заторфованности грунтов не превышает 0,1, а в остальных 20% колеблется в пределах 0,1–0,25. Показатели свойств заторфованных грунтов Западной Сибири приведены в табл. 4.

Таблица 4. Свойства заторфованных грунтов Западной Сибири

Вид грунта	Степень заторфованности q	Плотность частиц грунта $\rho_{\text{ча}}$, г/см ³	Плотность сухого грунта $\rho_{\text{с.г}}$, г/см ³	Влажность			Коэффициент пористости e
				W_0	W_p	W_T	
Супесь	0,05–0,1	2,69	2	0,24	0,18	0,24	0,7
Суглинок	0,05–0,1	2,68	1,89	0,29	0,21	0,33	0,85
Глина	0,05–0,1	2,63	1,77	0,35	0,23	0,43	0,96
Супесь	0,11–0,25	2,60	1,82	0,26	0,23	0,29	0,83
Суглинок	0,11–0,25	2,52	1,71	0,35	0,25	0,37	1,17
Глина	0,11–0,25	2,48	1,60	0,47	0,35	0,59	1,30
Суглинок	0,26–0,4	2,18	1,44	0,41	0,27	0,42	2,25
Глина	0,26–0,4	2,04	1,3	0,43	0,40	0,68	2,5

Заторфованные грунты, как правило, не бывают однородными, а представляют собой чередование слоистых минеральных и торфяных грунтов различной степени минерализации.

2.2. МОРСКИЕ ИЛЫ

Морские илы по сравнению с другими видами илов наиболее распространены. Они выстилают прибрежные или литоральные части моря и области материковой отмели (шельфа). Осадки шельфа характеризуются отложениями валунов, галечников, гравия, песка, ила и глины. Граница между зоной песков и илов в морских водоемах находится на различных глубинах в зависимости от гидродинамики того или иного бассейна. У внутриконтинентальных морей (Черное, Каспийское) она проходит примерно на глубине 25–50 м. До этой глубины морские волнения достигают дна и взмучивают тонкий материал, переводя его во взвешенное состояние. В более глубоких частях бассейна, где движение воды в придонной части ослабевает, тонкие взвешенные вещества оседают на дно. В океанах граница между указанными зонами опускается до глубины 100–150 м. За береговыми валами, в прибрежных низинах, местами создаются условия для заболачивания и развития торфяников, которые могут чередоваться со слоями морских осадков, соответствующих вторжениям моря. В пределах плоских низменных побережий в спокойных заливах и бухтах образуются глинистые, песчаные, а местами известковые илы. Прибрежные илы по сравнению с глубоководными имеют более рыхлую структуру и отличаются высокой влажностью, малой плотностью и весьма значительной сжимаемостью.

Морские илы образуются в результате отложения на дне водоема взвешенного и растворенного материала, который смешивается с веществами, содержащимися в морской воде, разносится по акватории и осаждается на дно. При этом седиментационный процесс представляет собой сложное взаимодействие физических, химических, физико-химических и химико-биологических процессов, сопровождающихся механической, химической и биологической дифференциацией исходных веществ. Основными компонентами илов являются терригенный материал, органическое вещество и водные растворы.

На разных участках дна в различных физико-географических условиях характер седиментационного процесса существенно изменяется, что определяет образование различных по составу и свойствам осадков. Крупные фракции минеральных частиц, поступающих в моря благодаря абразии берегов и речному стоку, в физико-химическом отношении весьма инертны и быстро оседают недалеко от берега в пляжевой зоне. Глинистые частицы, наоборот, оседают медленно, разносятся далеко от берега и образуют структурированный глинистый осадок (пелоген), который постепенно уплотняется и превращается в ил.

Органическая часть илов имеет различное происхождение. Много органических веществ приносят речные воды. Богатая органическая жизнь побережий и морского дна после отмирания также дает дополнительный материал для формирования илов. В открытых морях и океанах органическое вещество поступает главным образом за счет планктона. Но в целом морские осадки бедны органическими веществами, так как основная масса последних поглощается живыми организмами, окисляет-

ся и разрушается в процессе деструкции благодаря хорошей аэрации морской воды. Содержание органического вещества в морских осадках обычно составляет не более нескольких процентов и изредка достигает 15–25%.

В прибрежной части шельфа вследствие сильного штормового волнения и интенсивного "перемывания" обломочного материала органических веществ очень мало. Бедны органическими веществами и алеврито-песчаные осадки у открытых побережий и в узких заливах, где наблюдаются быстрые приливно-отливные течения. Содержание органического вещества в осадках здесь обычно не превышает 0,2%.

Плохо сортированные алевритопесчано-глинистые отложения крупных заливов, а также алевритопесчаные илы содержат 0,4–1,5% органического вещества. Повышенное содержание органических веществ наблюдается вблизи устьев рек с заболоченной поймой и в углубленных понижениях шельфа (3–5%). Илы южных морей несколько богаче органическим веществом, чем осадки северных морских акваторий. Наиболее обогащенные органическим веществом осадки приурочены к материковым окраинам, находящимся под воздействием пограничных холодных течений. Например, в зоне действия Перуанского течения в Тихом океане происходит накопление кремнисто-глинистых слабодиагомных илов с содержанием органических веществ до 20%, а в зоне действия Бенгальского течения в Атлантике в близких по составу осадках содержание органических веществ в отдельных пробах достигало 25%.

Формирование морских илов с повышенным содержанием органических веществ в этих районах связано с высокой биологической продуктивностью фитопланктона, которая поддерживается за счет постоянного подтока глубинных богатых биогенными элементами вод. Сохранению биологического вещества в илах некоторых морей способствует также сероводородное заражение осадков, что характерно, например, для глубинных зон Черного моря, где содержание органических веществ достигает 15–36%. Однако подобные отложения встречаются редко и в целом для морских илов нехарактерны. Образовавшийся в воде глинистый осадок постепенно уплотняется в результате процессов синерезиса и гравитационного воздействия поступающих новых порций органикоминеральных веществ. Старение коллоидов происходит особенно интенсивно в начальный период осадкообразования, поэтому природная влажность илов в придонном слое с глубиной резко уменьшается.

Консолидация осадка и упрочнение структурных связей между частицами приводит к изменению консистенции и упрочнению илов. Удельное сопротивление пенетрации возрастает с $(0,005 \div 0,01)$ до $(0,7 \div 0,75) \cdot 10^5$ Па, а консистенция переходит от жидкотекучего в вязкотекучее и далее вязкопластичное состояние. Консолидация продолжается до тех пор, пока природное давление уравнивается расклинивающим давлением водных оболочек. В таком стабилизированном состоянии плотности — влажности илы находятся в условиях естественного залегания. Длительный период осадконакопления обуславливает очень медленное увеличение природного давления и постепенную литификацию илов в процессе диагенеза. Органические вещества при этом существенно изменяются и, взаимодействуя с высокодисперсными минеральными

частицами, дают устойчивые органоминеральные соединения, оказывающие большое влияние на физико-механические свойства илов и образующихся из них глинистых пород.

Гравитационное уплотнение, сопровождающееся уменьшением с глубиной пористости и влажности, является общей закономерностью для глинистых пород. Однако во многих случаях влажность и пористость илов в пределах 5–15-метровой толщи остаются практически постоянными, хотя прочностные показатели заметно возрастают. Морские илы разделяются на пять групп, отличающихся по физико-механическим свойствам (табл. 5).

Выявлена прямая корреляционная связь между влажностью на границе текучести W_L морских илов и числом пластичности I_p :

$$I_p = 0,55 (W_L - 11,27). \quad (1)$$

Гранулометрический состав илов определяется минералогическим и гранулометрическим составом исходных пород, характером и интенсивностью процессов выветривания и переноса его продуктов, гидродинамическим режимом водоема, соленостью и температурой воды и другими факторами. В общем случае по мере удаления от берега состав морских отложений становится все более дисперсным. Так, в северной части Азовского и Черного морей с удалением от берега глинистость илов возрастает, но часто эта закономерность нарушается.

Илы отлагаются на ровном дне впадин и котловин, на подводных плато и очень пологих склонах. В умеренной и тропической зонах отложению ила способствует богатая водная растительность.

По фациальному признаку илы разделяются на четыре группы: шельфовые мелководные (глубина воды до 20 м), шельфовые глубоководные (20–200 м), континентального склона (200–3000 м) и океанического дна (более 3000 м). По генезису и преобладанию в них минеральных и органических компонентов различают илы: терригенные, биогенные (карбонатные, кремнистые, диатомовые, глобигериновые, фазелиновые и др.), хемогенные (карбонатные, галогенные и др.), вулканогенные и полигенные.

Для илов наиболее характерны коагуляционные структуры. Образованию рыхлых коагуляционных структур благоприятствует анизометричность легкорастворимых солей, оказывающих коагулирующее действие на мелкодисперсные фракции. Возникающая при этом пространственно-структурная сетка обладает слабой, но достаточной прочностью, чтобы в определенной степени препятствовать гравитационному уплотнению. После нарушения естественной структуры восстановление прочности во времени до величины, близкой к первоначальной, происходит для грубодисперсных илов Кольского залива и Баренцева моря за 2–3 сут, для глинистых илов Черного моря – за 10–12 сут.

Естественная влажность илов высокая – 0,32–1,2, иногда достигает 2,4 (см. табл. 5) и редко 5 вследствие повышения содержания органических веществ. В порах структурного каркаса морских илов содержится значительное количество свободной и иммобилизованной воды. Повышенное содержание глинистых фракций, органического вещества и высокогидрофильных минералов тила монтмориллонита способствует удержанию значительного количества влаги. По мере уплотнения, что наблюдается с глубиной, влажность илов постепенно снижается.

Таблица 5. Классификация морских илов (по А.Б. Шпикову, 1978 г.)

Илы	Плотность частиц грунта $\rho_{\text{чд}}$, г/см ³	Сопротивление пенетрации $R_{\text{пх}} \times 10^5$, Па	Консистенция	Влажность W , доли единицы	Плотность грунта ρ_w , г/см ³	Коэффициент пористости e	Модуль осадки L_k , мм/м	Угол внутреннего трения φ , град	Сцепление $c \cdot 10^5$, Па
Су-песчаный ($W_L \leq 0,32$)	2,65–2,73	<0,1	Жидкотекучая	<0,64	>1,62	<1,72	<265	>4	<0,02
		0,1–0,3	Вязкотекучая	<0,48	>1,74	<1,29	<125	>10	<0,03
		>0,3	Пластичная	<0,38	>1,83	<1,02	<35	>15	<0,06
Суглинистый ($0,32 < W_L \leq 0,42$)	2,64–2,74	<0,1	Жидкотекучая	0,48–0,84	1,44–1,74	1,29–2,26	125–305	<4	<0,03
		0,1–0,3	Вязкотекучая	0,38–0,64	1,62–1,83	1,02–1,72	35–165	5–9	0,03–0,05
		>0,3	Пластичная	0,32–0,48	1,74–1,9	0,86–1,29	10–65	8–14	0,05–0,12
Глинистый легкий ($0,42 < W_L \leq 0,66$)	2,64–2,75	<0,1	Жидкотекучая	0,64–1,32	1,37–1,62	1,72–3,54	160–380	<4	<0,04
		0,1–0,3	Вязкотекучая	0,48–0,99	1,46–1,74	1,29–2,65	65–255	4–8	0,04–0,1
		>0,3	Пластичная	0,42–0,79	1,54–1,79	1,12–2,12	20–120	6–12	0,05–0,14
Глинистый средний ($0,66 < W_L \leq 1,2$)	2,52–2,78	<0,1	Жидкотекучая	0,99–2,4	1,23–1,46	2,65–6,43	255–430	<3	<0,05
		0,1–0,3	Вязкотекучая	0,79–1,8	1,29–1,54	2,12–4,82	120–280	3–6	0,05–0,12
		>0,3	Пластичная	0,66–1,44	1,35–1,61	1,77–3,86	50–160	3–9	0,07–0,16
Глинистый тяжелый ($W_L > 1,2$)	<2,65	<0,1	Жидкотекучая	>1,8	<1,29	>4,82	>280	<2	>0,05
		0,1–0,3	Вязкотекучая	>1,44	<1,36	>2,86	>160	<3	>0,07
		>0,3	Пластичная	>1,2	<1,4	>3,22	>75	<4	>0,1

Значения плотности частиц илов часто составляют 2,52–2,78 г/см³ и определяются главным образом их химико-минералогическим составом, содержанием органических веществ и дисперсностью. Наибольшая плотность отмечается у грубодисперсных илов северных морей, наименьшая — у глинистых илов Черного моря, имеющих большое содержание органических веществ. Плотность илов изменяется от 1,29 до 1,9 г/см³. Диапазон колебаний достаточно широк, но чаще встречаются значения 1,4–1,8 г/см³.

Пористость илов изменяется от 45–50 до 90%, что соответствует коэффициенту пористости от 0,9–1 до 8. Пористость илов возрастает с увеличением дисперсности и содержания в них органического вещества. Особенно велика она у глинистых илов, обогащенных органическим веществом. В процессе литификации пористость илов заметно уменьшается по мере перехода их в пластичные глинистые грунты.

Пластичность илов зависит от их дисперсности, содержания органических веществ и химико-минералогического состава глинистых частиц. Выявлена корреляционная связь показателя пластичности почти со всеми основными показателями физико-механических свойств илов. По пластичности илы разделяются на супесчаные, суглинистые и глинистые (см. табл. 5). Консистенция илов близка к единице или больше ее.

Все илы находятся в текучем или скрытотекучем состоянии. Это один из определяющих признаков илов. Если илы уплотнились настолько, что показатель консистенции их стал меньше единицы и они перешли в пластичное состояние, то они перестают быть илами и переходят в ряд иловатых глинистых грунтов.

Коэффициент фильтрации глинистых илов очень низок и составляет $10^{-6} \div 10^{-8}$ см/с; у супесчаных илов — до 10^{-4} см/с. Фильтрационная способность илов существенно зависит от их пористости и пластичности. С увеличением дисперсности, гидрофильности и степени уплотненности фильтрационная способность илов заметно падает.

Структурная прочность илов незначительна, поэтому интенсивное сжатие илов начинается уже при давлениях $(0,01 \div 0,05) 10^{-5}$ Па, при этом основная часть осадки завершается до давления $(1 \div 1,2) 10^{-5}$ Па. Сжимаемость илов сопровождается отжатием воды и поэтому зависит от их фильтрационной способности, которая уменьшается в процессе уплотнения. Показатели сжимаемости (модуль осадки, коэффициент сжимаемости, модуль деформации) илов существенно зависят от действующих давлений. Наибольшие значения сжимаемости фиксируются на первых ступенях нагрузок после преодоления структурной прочности грунтов, а затем по мере консолидации сжимаемость илов значительно уменьшается. Характерные значения модулей деформации илов приведены в табл. 6.

Сопротивление сдвигу илов зависит от их минералогического и гранулометрического состава, степени уплотненности, содержания органических веществ, структурной прочности и выбранной методики испытаний. Обычно илы испытывают в сдвиговых приборах по методике быстрого неконсолидированного сдвига, которая дает, как правило, невысокие значения сцепления и угла внутреннего трения; характерные для илов естественной влажности.

В процессе консолидации илы уплотняются, и их прочностные характеристики заметно возрастают. Для определения значений сопротивления сдвигу илов в процессе строительства и эксплуатации илы в лабо-

Т а б л и ц а 6. Модули деформации морских илов
(по Г.В. Сорокиной и др., 1964 г.)

Морские илы	Значения модулей деформации при давлениях $p_0 \cdot 10^5, \text{Па}$		
	0,25–1	0,25–1,5	0,5–1,5
Супесчаные	23,4	30,6	39,9
Суглинистые	12,3	15,2	19,5
Глинистые	2,6	3,6	4,3

раторных условиях испытывают при нагрузках и режимах испытаний (ускоренный или консолидированный), моделирующих условия работы оснований проектируемых сооружений. Многократные испытания уплотненных и неуплотненных илов позволяют построить кривые зависимости показателей прочности от влажности (плотности), что дает возможность проследить за изменением прочности илов в процессе консолидации и правильно выбрать расчетные значения деформативных характеристик илов.

2.3. ОЗЕРНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

Озерные отложения, формирующиеся на дне озер и водоемов путем постоянного осаждения взвешенных в воде осадков, образуются из минеральных примесей приносного характер, неорганических компонентов биогенного происхождения, органических веществ отмерших водных организмов и растений, обитающих в воде озер и населяющих их дно и берега. Количество минеральных наносов особенно велико в начальных стадиях развития озер, но по мере распространения прибрежной растительности и выполаживания склонов оно уменьшается. Большое значение в формировании донных отложений имеют степень проточности озера, величина и характер водосбора. Обилие притоков, несущих с собой взвешенные минеральные частицы (твердый сток), значительно увеличивает минеральную часть озерных отложений, осаждающихся в спокойных водах озера. Чем меньше размеры озера, тем больше сказывается влияние проточности и сноса минеральных осадков с его берегов. Размеры водосбора и эродированность поверхности определяют величину мутности и объем поверхностного стока.

Органическое вещество образуется непосредственно в водоеме, но может также приноситься с водой впадающих притоков или заноситься ветром. Ветер обычно приносит листья, пыльцу, семена и споры растений, которые всегда присутствуют в толще озерных осадков. Однако решающее значение имеет синтез органического вещества, который осуществляется зелеными организмами планктона и прибрежной растительностью. Чем выше продуктивность озера, тем больше поступает материала для образования органической части донных отложений, но количество его лимитируется процессом разложения. Взаимодействие этих противоположных процессов — продуцирования и разложения органического вещества — определяет характер озерных отложений. Толща озерных отложений формируется в результате последовательного напластования сравнительно однородных осадков, отвечающих определенным стадиям развития озер.

В большинстве случаев процессы образования озерных осадков обуславливают отложение их в виде концентрических зон. А. Гарункшпис (1959 г.) выделяет три зоны осадкообразования. Для береговой отмели (I зона) характерны песчаные отложения с гравием. На склоне береговой отмели (II зона) откладываются песчанистые сапропели, за ее склоном (III зона) до глубины 5–6 м (ярус А) образуется известковый сапропель, на глубине от 5–6 до 10–12 м (ярус Б) откладывается наибольшее количество сапропеля. Глубже сапропеля мало, развиты сульфидные, железистые, глинистые и другие минерализованные отложения.

В зависимости от глубины озера, дно которого располагается в том или ином ярусе, можно судить о характере донных отложений. Решающим фактором в образовании известковистых отложений является подток карбонатных вод. При наличии постоянного притока кальция образуются известковистые осадки, а при его отсутствии – органические отложения различной степени минерализации. При интенсивном зарастании озер в I зоне на отмели отлагаются торфянистые сапропели, а на склоне береговой отмели – торфянисто-водорослевые сапропели. Концентрические зоны отложений наблюдаются на всех стадиях развития озер, но ширина их зависит от морфометрии озерной котловины, направления озерных течений, связанных с его проточностью, направления и силы господствующих ветров, а также характера прибрежной растительности. Несомненно одно, что характер донных отложений связан с глубиной озера и что он более резко изменяется у берегов, чем вдали от них, за склоном береговой отмели.

Минерализация озерных отложений изменяется как в плане, так и по глубине. Она обычно мало колеблется в пределах генетически однородного слоя, представленного определенным типом озерных отложений и претерпевает резкие изменения при переходе от одного слоя к другому. Изменение минерализации в плане связано с концентрическим распределением озерных отложений. Как правило, на береговой отмели располагаются наиболее крупные фракции озерных отложений. На склоне береговой отмели механический состав отложений характеризуется более мелкими фракциями, поэтому содержание органических веществ возрастает. В глубокой части озера (профундали) оседают обычно самые тонкие фракции с наименьшей минерализацией.

Описанный порядок распределения отложений по механическому составу и минерализации типичен для небольших непроточных озер без заметного притока грунтовых вод. Только в таких озерах, а также в защищенных заливах и бухтах больших озер образуются органические сапропели. С увеличением акватории озер возрастает водосборная площадь и неизбежно появляется проточность воды. Кроме того, с увеличением площади открытой водной поверхности под влиянием ветра развивается волнение. Волны перемешивают верхний слой воды, снабжая его кислородом, и разрушают берега озера. Все это значительно увеличивает минерализацию осадков. Максимальные размеры озера, в котором могут образовываться органические сапропели, в зависимости от площади водосбора и защищенности от ветрового воздействия изменяются в пределах 1–5 км². Отсюда следует, что органические сапропелевые отложения представляют собой небольшие по площади участки.

Проточность озер является важным фактором, регулирующим минерализацию отложений. Вдоль основных направлений течения воды всегда отмечается пониженное содержание органического вещества в озерных отложениях. Это обусловлено и механической транспортировкой минеральных частиц (взвешенные наносы), и лучшей аэрацией воды, благодаря чему здесь происходит более полное разложение органического вещества. Проточность озера часто нарушает концентрическое распределение осадков по механическому составу и степени минерализации. Нередко в центральной проточной части озера наблюдаются более высокая минерализация и крупность фракций донных отложений, чем в прибрежных относительно спокойных заводях и бухтах. У проточных озер отложения обычно имеют повышенную минерализацию в прибрежной полосе и вдоль основных направлений течения воды.

Ширина прибрежной полосы у малых озер составляет примерно 50–200 м, а у больших (Галичское, Чухломское, Ильмень) достигает 0,4–1 км и более. Ширина зон повышенной минерализации, связанных с течениями воды, зависит от морфометрических и гидрологических факторов и может быть различной, но обычно они имеют вид сравнительно узких полос на фоне общей акватории озера. Важно, что в этих местах минерализация отложений меняется более резко, чем на остальной площади озерных осадков.

Закономерности распространения озер и озерных отложений на территории СССР изучались многими исследователями в различных направлениях. Схематическая карта зональности сапропелевых отложений СССР приведена на рис. 6 (см. далее табл. 7). Выделяются следующие основные зоны сапропеленакопления.

I — северная зона слабого сапропеленакопления — охватывает территорию распространения мелководных пресных озер тундры и лесотундры. При малой испаряемости и повышенной влажности воздуха здесь создаются условия для формирования многочисленных небольших озер. В условиях холодного климата и близкого залегания многолетнемерзлых грунтов котловины озер слабо развиты. Много озер термокарстового происхождения.

II — центральная зона интенсивного сапропеленакопления — характеризуется большим разнообразием озер лесной полосы. Относительно теплый климат и избыток влаги наряду с процессами выветривания и размыва, обеспечивающими поступление в озера достаточного количества биогенных компонентов, создают благоприятные условия для развития органической жизни в озерах. Вместе с тем прибрежная растительность и леса предохраняют озера от механического заиления минеральными наносами. На дне озер встречаются различные типы отложений мощностью в несколько десятков метров. Озерность в центральной зоне ниже чем в северной в десятки раз и изменяется от 0,08 до 1,8%. Только в области конечно-моренного рельефа она достигает 4% (табл. 7).

III — южная зона слабого сапропеленакопления — занимает полосу лесостепи с мелководными и солончатыми озерами. Вследствие высокого испарения вода озер повышенной минерализации. Они всегда эвтрофны с богатой органической жизнью. Для озер характерны органоминеральные и минерализованные отложения с максимальной мощностью 2–5 м.

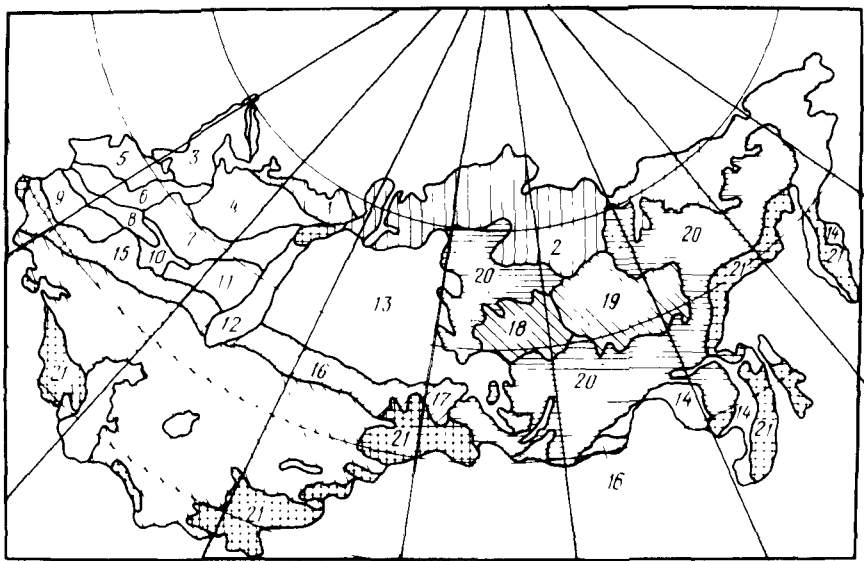


Рис. 6. Схематическая карта зональности сапропелевых отложений СССР (по А.Я. Рубинштейну, 1971 г.)

Число озер в зоне небольшое, например в Воронежской области имеется всего 1552 озера общей площадью около 100 км². Все озера маленькие, только 5% из них имеют площадь более 10 га. Озера преимущественно пойменные, мелкие, со средней глубиной воды до 2 м.

1У — зона солоноватых сапропелей и минеральных грязей — охватывает мелководные солоноватые, соляные и самосадочные озера сухих степей, полупустынь, пустынь. Аридный климат и песчаные хорошо пронизываемые почвы обуславливают бедность этой территории водоемами. Имеющиеся водоемы обычно мелководны с минерализованной водой различной степени солености. Мощность донных отложений может достигать 2–12 м и более, например в приморском оз. Саки в Крыму она составляет 26 м. Однако эти отложения по своему характеру относятся к разряду минеральных грязей.

Всего на территории СССР выделена 21 область сапропеленакопления, входящих в рассмотренные четыре зоны. Для каждой из них определены площади, озерность, общая акватория озер, площадь сапропелей в озерах и средняя их мощность (см. табл. 7).

Вещественный состав озерных отложений весьма разнообразен и изменяется от органогенных и гомогенных образований до песчано-галечных накоплений. Это объясняется генезисом озерных ванн, их морфометрией, климатическими и палеогеографическими условиями осадконакопления. Например, в озерах тектонического происхождения отлагаются галечно- и песчано-глинистые осадки, а в наиболее крупных из них (Псковско-Чудское, Ильмень, Кубенское и др.) и органогенные осадки значительной мощности. В озерах ледникового происхождения накапливаются главным образом глинистые илы с различным содержанием органических

Таблица 7. Основные показатели областей сарпопелскакопении в СССР

Зона	Область сарпопелскакопения (см. рис. 6)	Площади областей, км ²	Сарпопелскакопение, %	Общая акватория озера, тыс. км ²		Площади сарпопелскакопения в степях, в том числе		Средняя мощность сарпопелскакопения, м	Ориентировочные ресурсы сарпопелскакопения, млн. м ³
				тыс. км ²	%	км ²	%		
I Канско-Июльская (1)									
	Канско-Июльская (1)	206	5	10,3	30	3090		1,5	4635
II Канско-Июльская (2)									
	Канско-Июльская (2)	2280	4	91,2	25	22 800		1,2	27 400
III Канско-Июльская (3)									
	Канско-Июльская (3)	263	9	23,67	45	10 700		2,2	21 400
IV Канско-Июльская (4)									
	Канско-Июльская (4)	360	0,8	2,88	75	2160		2,7	5 830
V Канско-Июльская (5)									
	Канско-Июльская (5)	260	1,5	3,9	70	2730		2,6	7100
VI Канско-Июльская (6)									
	Канско-Июльская (6)	198	4	7,92	70	5540		2,7	14 960
VII Канско-Июльская (7)									
	Канско-Июльская (7)	380	0,4	1,52	80	1220		3	3660
VIII Канско-Июльская (8)									
	Канско-Июльская (8)	156	1,3	2,03	70	1420		2,7	3 840
IX Канско-Июльская (9)									
	Канско-Июльская (9)	280	0,6	1,68	75	1260		2,8	3 530
X Канско-Июльская (10)									
	Канско-Июльская (10)	108	0,7	0,76	75	570		2,7	1540
XI Канско-Июльская (11)									
	Канско-Июльская (11)	280	0,08	0,22	60	132		2	264
XII Канско-Июльская (12)									
	Канско-Июльская (12)	280	0,8	2,24	70	1568		2,7	4230
XIII Канско-Июльская (13)									
	Канско-Июльская (13)	2480	1,8	44,6	50	22 300		2,3	51 300
XIV Канско-Июльская (14)									
	Канско-Июльская (14)	680	0,5	3,4	75	2550		2,2	5620
XV Канско-Июльская (15)									
	Канско-Июльская (15)	590	0,02	0,12	80	96		1,6	154
XVI Канско-Июльская (16)									
	Канско-Июльская (16)	450	3,5	15,79	70	11 000		1,8	19 800
XVII Канско-Июльская (17)									
	Канско-Июльская (17)	360	0,05	0,13	75	135		1,7	229
XVIII Канско-Июльская (18)									
	Канско-Июльская (18)	520	0,3	1,56	30	467		1,5	701
XIX Канско-Июльская (19)									
	Канско-Июльская (19)	720	6	4,13	40	17 300		1,6	27 700
XX Канско-Июльская (20)									
	Канско-Июльская (20)	41 300	0,1	4,13	30	1240		1,2	1490
XXI Канско-Июльская (21)									
	Канско-Июльская (21)	2450	0,2	4,90	45	2200		1,7	3740
Итого									
	Итого	17 431	Ср. 1,53	266,16	Ср. 41,5	110 478		Ср. 1,9	209 123

ких веществ; в ложбинных озерах — мощные толщи песчаных накоплений; в озерах эрозионно-аккумулятивного типа (за исключением дельтовых) — опесчаненные илы, сапропели, иногда карбонатные осадки; в дельтовых озерах — песчаные осадки.

Гранулометрический состав озерных отложений характеризуется содержанием глинистых частиц в среднем 15–30%, пылеватых 40–80% и песчаных 5–15%, небольшим содержанием крупных фракций. Встречаются песчаные и гравелистые отложения в прибрежной зоне озер и вдоль направлений сильных течений. Глины имеют подчиненное значение в общей массе озерных отложений. Содержание в озерных отложениях органического вещества различно — от 3–10% у иловатых глинистых грунтов до 70–90% у органических сапропелей.

Электронно-микроскопические и термические исследования показали, что в тонкодисперсной фракции озерных отложений содержится органических примесей до 40–65% и мало глинистых минералов. Основную массу составляет комплекс органоминеральных соединений. У минерализованных озерных отложений большая часть органических веществ концентрируется в тонкодисперсной фракции, где ее содержание в 3–4 раза больше общего количества органического вещества в породе, а грубодисперсные фракции в этом случае почти не содержат органических соединений.

Естественная влажность озерных отложений изменяется в широком диапазоне, например у глинистых отложений 25–120%, у органических сапропелей 1600–3000%. Влажность зависит от содержания органического вещества. Характерные показатели физико-механических свойств различных типов озерных отложений представлены в табл. 8.

Водопроницаемость отложений весьма слабая и зависит от содержания органических веществ и степени уплотнения осадков. По мере увеличения содержания органического вещества и уменьшения пористости значения коэффициентов фильтрации озерных отложений уменьшаются с 50–1200 до 0,02–0,06 мм/сут. Органические сапропели в 10–20 раз менее проницаемы, чем минерализованные илы при той же плотности (рис. 7).

Зависимость удельного сцепления сапропелей и угла внутреннего трения от влажности приведена на рис. 8.

У минерализованных илов и глинистых озерных отложений картина несколько меняется. Здесь сопротивление сдвигу благодаря высокой плотности отложений определяется преимущественно величиной сцепления, которое возрастает с 0,004–0,03 до 0,06 МПа, а значения углов внутреннего трения вследствие увеличения содержания глинистых фракций несколько снижается — с 15–28 до 13–25°.

Сжимаемость озерных отложений высокая, поэтому они относятся к группе сильносжимаемых пород. В процессе компрессионных испытаний они в значительной степени уплотняются и отдают воду. На компрессионных кривых выделяются начальные более пологие участки, соответствующие давлению 0,005–0,01 МПа (у минерализованных отложений до 0,02–0,05 МПа), которое характеризует природную структурную прочность отложений (рис. 9).

При последующем сжатии наблюдается значительное разрушение природного структурного каркаса и уплотнение грунта по мере удаления свободной воды. Время полной стабилизации сапропелей под на-

Таблица 8. Физико-механические свойства озонных отложений

Типы озонных отложений	Содержание органического вещества, Q , %	Естественная влажность W , %	Коэффициент пористости e	Число пластичности $W_{пл}$, %	Усадка, %	Сцепление с $\cdot 10^5$, Па	Угол внутреннего трения ϕ , град	Модуль деформации $E \cdot 10^5$, Па
------------------------	--	--------------------------------	----------------------------	---------------------------------	-----------	-------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------

Сапропели:

органические 70-90 1600-3000 23-30 320-420 95-97 0,002-0,003 15-20 0,1-0,3

органические 50-70 850-1600 16-23 230-320 93-95 0,003-0,004 20-25 0,3-0,8

органические 30-50 350-850 9-16 150-230 85-93 0,004-0,015 25-28 0,8-2

минерализованные

10-30 150-850 3-9 100-150 60-85 0,015-0,08 28-30 2-8

Углеродистые

3-10 80-150 1,2-3,0 10-100 30-60 0,04-0,30 15-28 8-30

Глинистые осевые отложения

3-10 25-120 0,5-1,2 5-60 15-40 0,06-0,60 13-25 20-180

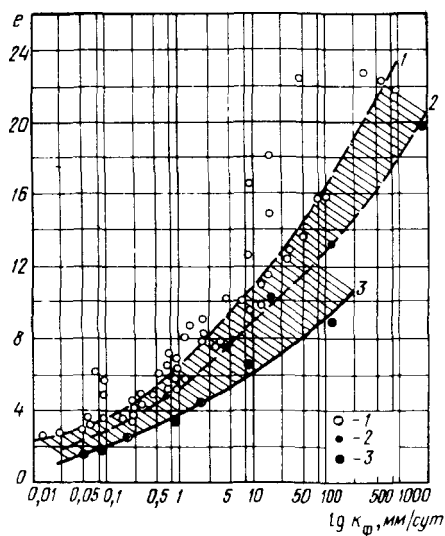


Рис. 7. Зависимость коэффициента фильтрации k_f от коэффициента пористости e сапропелей с различным содержанием органических веществ Q : 1 — при $Q = 68,2\%$ (оз. Святое); 2 — при $Q = 51,5\%$ (оз. Бисеровское); 3 — при $Q = 26,4\%$ (оз. Неро)

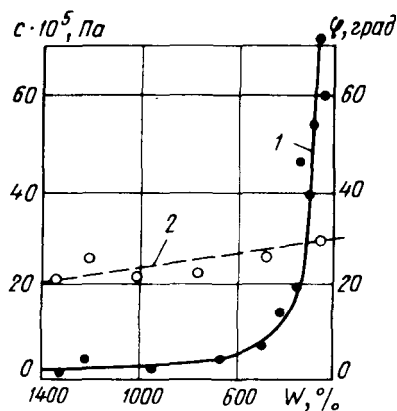


Рис. 8. Зависимость удельного сцепления c (1) и угла внутреннего трения φ (2) от влажности W сапропелей района г. Череповца

рушкой колеблется в пределах 50–200 ч. Большая часть осадки происходит в течение первых суток. Степень консолидации, равная 70–90%, достигается уже через 20–30 ч, что вполне достаточно для практических целей определения показателей сжимаемости грунтов.

Модули деформации озерных отложений по мере снижения содержания органических веществ и увеличения плотности отложений увеличиваются с 0,01 до 18 МПа (см. табл. 8).

Характерной разновидностью озерных отложений являются отложения стариц, образующиеся в отшнуровавшихся меандрах рек — старицах.

Старичные отложения широко распространены среди современных аллювиальных образований. Например, по данным К.М. Пановой*, на одном из участков низовий Волги в районе Волжской ГЭС имени XXII съезда КПСС старичная фация охватывает 31% площади. При проектировании насосной станции под г. Ленинском Волгоградской области на левом берегу р. Ахгубы, выбранном для строительства, была разбурена полоса длиной около 1100 м и шириной до 250–300 м. Все 15 заложённых скважин вскрыли старичные отложения мощностью около 7 м, нередко возрастающей до 8–10 м.

* Панова К.М. Физико-технические свойства старичных глин низовий Волги. Автореф. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. — М., 1969, 30 с. (МГРИ).

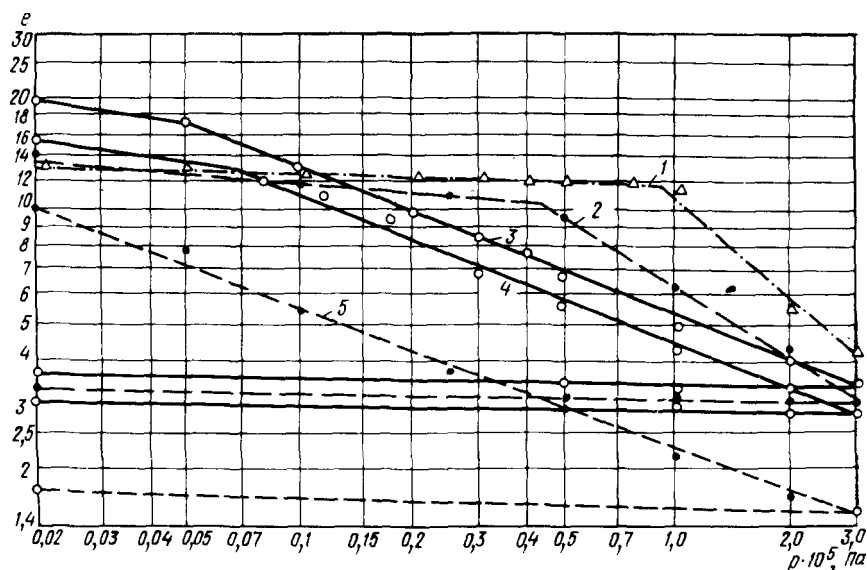


Рис. 9. Компрессионные кривые сапропелей с различной влажностью W
 1 — глинистый сапропель из оз. Неро, $W = 458\%$; 2 — глинисто-водорослевый сапропель из оз. Бисеровского, $W = 1175\%$; 3 и 4 — водорослевый сапропель из оз. Святого соответственно при $W = 1787$ и $W = 1004\%$; 5 — известковый сапропель из оз. Неро, $W = 705\%$

По данным изысканий Гидропроекта, на суженном участке Волго-Ахтубинской поймы в районе створа Цаган — Аман — Михайловка, примерно на середине расстояния между Волгоградом и Астраханью старичные отложения были встречены в 269 скважинах из 434 пробуренных в пойме, т.е. в 62% случаев.

Однако распространение старичных отложений по площади поймы неравномерное. Например, на притеррасной пойме слева от Ахтубы на площади около 5 км² все до одной скважины вскрыли старичные отложения значительной мощности, в районе Енотаевского створа в 16 скважинах из 23 (70%) обнаружены отложения стариц, а на острове Лебяжьем, в вершине дельты р. Волги, старичные отложения распространены только на 40% территории.

Мощность старичных отложений различна. В районе Волжской ГЭС имени XII съезда КПСС мощность погребенных старичных отложений современной аллювиальной свиты составляет 3–6 м и нередко возрастает до 8–10 м. В отдельных случаях мощность старичных отложений достигает 12–15 м, а на дне высохшего озера Кунаковского выявлена 18-метровая толща старичных отложений. Мощность старичных отложений р. Сазанлей в районе Саратовской ГЭС достигает 20 м.

Современные старичные осадки низовий Волги представлены илами разного состава. Все они отличаются высокой гидратированностью и характеризуются темно-серой и черной окраской нередко с голубоватым, синеватым, розоватым и другими оттенками или разводами,

Возраст глины и районы исследова- ний	Влажность, %	Плотность частиц, г/см ³	Коэффи- циент по- ристости	Пластичность, %			Сцепление $c \cdot 10^5$, Па	Угол внут- реннего трес- ния ϕ , град	Модуль деформа- ции $E \cdot 10^5$, Па
				W_T	W_p	W_n			
Глины современных староочей:									
Волжская ГЭС	45,5	2,70	1,26	54	26	28	0,32	4	20
имени ХХП съез- да КПСС, верши- на дельты	51,5	2,72	1,42	46	24	22	0,27	3	24
Глины верхового яруса:									
Волжская ГЭС	43,7	2,70	1,21	56	28	28	0,72	5	19
имени ХХП съез- да КПСС, Ле- нинск	43,3	2,67	1,13	52	27	25	0,51	2	31
Саратовский за- тоновый, среднее по- выш. участок	42,4	2,72	1,18	52	25	27	0,36	6	65
вершина дельты	38,9	2,74	1,11	50	26	24	0,21	6	28
Глины нижнего яру- са:	51,5	2,74	1,28	49	26	23	0,26	5	22
Волжская ГЭС	30,9	2,73	0,86	57	30	27	0,89	7	138
имени ХХП съез- да КПСС	26,9	2,75	0,79	49	24	25	0,97	8	707
Хазарские глины, Волжская ГЭС	83,2	2,71	2,31	-	-	-	-	-	13
Глиняные илы современных староочей	147,3	2,70	3,82	-	-	-	-	-	9

что обусловлено значительным содержанием органического вещества, соединений закисного железа и т.п. Повсюду в них встречаются растительные остатки как в тонкораспыленном виде, так и в форме включений неполностью разложившихся растительных остатков, листьев, плодов, семян, корневищ и т.д. Местами в старичных осадках захоронены раковины пресноводных моллюсков. Книзу старичные илы переходят в заиленные пески. Например, скважины, пробуренные на озерах Коржино, Горбатое и других в створе Цыган—Аман—Михайловка, показали, что до глубины 0,4—3,3 м залегают глинистые илы, которые глубже сменяются супесчаными илами мощностью до 7 м. Еще глубже под супесчаными илами залегают пылеватые заиленные пески с тонкими прослоями глинистых и супесчаных илов и с обильными включениями растительных остатков.

Описанная последовательность в составе осадков, отражающих нормальную вертикальную дифференциацию старичных отложений, не всегда выдерживается, нередко осадки целиком представлены пылеватыми заиленными песками, или супесчаными илами, или одними лишь глинистыми илами.

Погребенные старичные отложения перекрываются или осадками пойменной фации аллювия или песками русловой фации. Среди них выделяются: 1) погребенные старичные отложения верхнего яруса с кровлей на 2—4 м выше горизонта реки; 2) отложения нижнего яруса с кровлей на 5—6 м ниже уреза реки; 3) погребенные старичные отложения в Хазарской аллювиальной свите.

Старичные отложения более древнего возраста, естественно, сильнее уплотнены, менее гидратированы и отличаются более высокими показателями физико-механических свойств. Глинистые отложения современных слоев имеют консистенцию от мягкопластичной до текучей, а глины нижнего яруса и хазарского возраста — полутвердую. Основные показатели физико-механических свойств старичных отложений низовий Волги приведены в табл. 9.

2.4. ВОДОНАСЫЩЕННЫЕ ГЛИНИСТЫЕ ГРУНТЫ

Водонасыщенные слабые глинистые грунты бывают различного возраста и генезиса, но чаще всего встречаются аллювиальные, морские, озерные, лиманные, дельтовые и болотные, реже делювиальные и пролювиальные. Обычно слабые водонасыщенные грунты образуются в гидрогеологических условиях, обеспечивающих состояние их полного водонасыщения вследствие высокого стояния уровня грунтовых вод.

Слабые глинистые грунты морского происхождения широко развиты вдоль побережья Ледовитого океана, в бассейне нижнего течения Печоры и Северной Двины и прослеживаются вдоль долин всех крупных рек, впадающих в Ледовитый океан, проникая далеко на юг до бассейна Ваги и Вычегды. Мощность морских иловатых грунтов достигает здесь 8—10 м, а залегают они ниже современного уровня моря. Морские глины содержат органических веществ 6—15%, их естественная влажность составляет 44—82% (в среднем 62%), предел текучести — 64%, раскатывания — 33%, число пластичности — 31%, коэффициент пористости — 1,4—2,25 (в среднем 1,65), модуль осадки при нагрузке 0,05 МПа — 20—60 мм/м, угол внутреннего трения — 9—12° и сцепле-

ние — 0,001–0,005 МПа. После предварительного уплотнения до полной консолидации угол внутреннего трения их возрастает до 20–22°, а сцепление повышается до 0,01 МПа.

Согласно данным Г.Л. Коффа (1970 г.), мощность слабых глинистых грунтов древнеморских террас Кольского залива достигает 30 м и они подстилаются комплексом песчано-гравелисто-валунных отложений. С поверхности до глубины 3–5 м обычно залегают тяжелые пылеватые супеси, реже суглинки, ниже следует толща слоистых водонасыщенных супесей и суглинков (реже глин) мощностью до 3 м.

С глубиной дисперсность отложений, как правило, увеличивается. Естественная влажность и пористость изменяются в широких пределах в зависимости от состава и глубины залегания глинистых отложений. У супесей влажность изменяется от 18 до 36%, у суглинков и глин — от 22 до 38%, коэффициент пористости соответственно колеблется от 0,54 до 1,0 и от 0,62 до 0,7. Основные показатели прочностных и деформационных свойств глинистых грунтов приведены в табл. 10.

Таблица 10. Основные показатели прочностных и деформационных свойств слабых глинистых грунтов древнеморских террас в районе г. Мурманска (по Г.Л. Коффу, 1970 г.)

Глубина, м	Консистенция глинистых грунтов	Сцепление с 10^5 , Па	Угол внутреннего трения φ , град	Коэффициент сжимаемости $1/10^5$, Па
До 3–5	Твердая	0,33	24	0,022
5–7	Скрыто текучая и текучая	0,07	0–2	0,080
7–10	Текучая до текучеplastичной	0,09	9	0,080–0,042
10–15	Текучеplastичная	0,16	10	0,042
15–18	Текучеplastичная до мягкоplastичной	0,27	16	0,023

Характерные разновидности слабых морских глинистых грунтов послепедникового времени (отложения Иольдиевого, Анцилового и Литоринового морей) широко распространены в районах Балтийско-Беломорского бассейна. Большое сходство свойств и признаков с иольдиевыми глинами обнаруживают плестоценовые морские глины Скандинавского полуострова и озерно-ледниковые отложения Финляндии.

Иольдиевые глины отличаются голубовато- или зеленовато-серой окраской, массивной текстурой с линзами песчано-галечникового материала, определяющими неоднородность свойств глины в пределах одного разреза. В толще иольдиевых глин четко выделяются два горизонта — корка и подкорковая глина. Корка отличается несколько иным химическим составом, более высокой плотностью и структурной прочностью, мощность ее обычно 1–2 м и не превышает 3 м. Подкорковая глина содержит 40–70% глинистых тонкодисперсных частиц; состав глинистых минералов преимущественно гидрослюдастый, мощность достигает нескольких десятков метров. Подкорковая глина характеризуется высокой влажностью ($> 60\%$), резкой потерей прочности при перематии, малой упрочняемостью при уплотнении, низкой водопроницаемостью. Иольдиевые глины обладают относительно высоким пределом структурной прочности при компрессионном сжатии. Значение механических характеристик иольдиевых глин приведено в табл. 11.

Литориновые отложения широко распространены в пределах Приморской низменной равнины и Приладожской низменности. Низкие литориновые террасы почти непрерывно прослеживаются вдоль Финского залива от центра Ленинграда до Черной речки. Мощность литориновых отложений на территории Ленинграда обычно не превышает 10 м, но иногда достигает 15 м и более. Основным районом развития литориновых отложений в Ленинграде является Охта, хотя встречаются эти слабые грунты и в других частях города, охватывая в целом большую часть территории Ленинграда, в том числе и районы интенсивного строительства.

Подстилаются литориновые отложения в большинстве случаев озерно-ледниковыми ленточными суглинками и глинами и реже — ледниковыми суглинками. С поверхности они обычно перекрыты культурным слоем или болотными отложениями. Литологически литориновые отложения представлены преимущественно мелко- и тонкозернистыми песками, супесями и суглинками. При общей пестроте литологического

Т а б л и ц а 11. Прочностные и деформативные показатели иольдиевых глин

Консистенция	Относительная влажность	Полное сцепление, МПа	Угол внутреннего трения φ , град	Структурное сцепление c_s , МПа	Предел структурной прочности при компрессии, МПа	Модуль осадки, мм/м, при давлении, МПа	
						0,02	0,1
Текучепластичная	<1	>0,015	>7	>0,01		7-9	15-40
Скрыто-текучая	1,0-1,5	0,02-0,01	7-3	0,015-0,007	0,05	9-11	40-120
	1,5-2,5	0,015-0,005	3-0	0,007-0,003	0,05-0,018	11-14	120-250

П р и м е ч а н и е. Относительная влажность $W_{отн} = W/W_T$, где W — природная влажность; W_T — влажность на границе текучести.

состава и невыдержанности отдельных слоев как по мощности, так и простиранию отмечается увеличение степени дисперсности литориновых отложений с глубиной.

Все разновидности этих отложений, как правило, содержат неравномерно распределенные примеси органических веществ различной степени разложения. Часто встречаются также гнезда, линзы или отдельные прослой торфа и заторфованных грунтов.

Физико-механические свойства литориновых отложений в значительной мере определяются их гранулометрическим составом и содержанием органического вещества (табл. 12 и 13).

Небольшая примесь органических веществ в тонкозернистых песках придает им плавунные свойства и резко снижает их фильтрационную способность. Консистенция литориновых супесей и суглинков в естественном сложении, как правило, пластичная или тугопластичная. Легкие супеси пластичной консистенции с содержанием органических веществ от 4 до 6% и влажностью 34-44% имеют угол внутреннего трения около

Т а б л и ц а 12. Показатели физических свойств литориновых отложений (по данным В.М. Фурса и В.М. Александровой, 1969 г.)

Грунты	Коэффициент пористости	Влажность, %	Плотность, г/см ³
Пески	0,5–0,8	19–30	2,1–1,9
Супеси	0,45–0,92	18,7–34	2,17–1,88
Суглинки	0,57–1,03	21–38	2,09–1,85

Т а б л и ц а 13. Изменение свойств литориновых отложений в зависимости от содержания органических веществ (по данным В.М. Фурса и В.М. Александровой, 1969 г.)

Потери при прокаливании, %	Влажность, %	Плотность частиц, г/см ³	Плотность, г/см ³	Коэффициент пористости	Коэффициент сжимаемости 1/10 ⁵ , Па
1,5–3	25–36	2,70	2,00–1,85	0,68–0,98	0,03–0,10
3–5	36–50	2,70–2,67	1,85–1,72	0,98–1,33	0,10–0,16
5–10	50–70	2,67–2,57	1,72–1,56	1,33–1,80	0,16–0,32
10–15	70–90	2,57–2,47	1,56–1,48	1,80–2,22	0,32–0,48
15–20	90–110	2,47–2,40	1,48–1,38	2,22–2,64	0,48–0,64
20–30	110–140	2,40–2,23	1,38–1,29	2,64–3,14	0,64–0,96
30–40	140–180	2,23–2,08	1,29–1,23	3,14–3,71	0,96–1,25
40–45	180–200	2,08–2,00	1,23–1,20	3,74–4,00	1,25–1,36

320, а сцепление порядка $0,02 \cdot 10^5$ Па. Угол внутреннего трения тонкозернистых песков находится в пределах от 29 (в рыхлом сложении) до 35° (в плотном сложении).

Среди четвертичных глинистых отложений северо-запада европейской части СССР широко распространены озерно-ледниковые ленточные глины позднеледникового времени. Они встречаются на Кольском полуострове, в Карелии, Архангельской, Вологодской и Ленинградской областях, в районе Большеземельской тундры и в Коми АССР, в республиках Прибалтики, Белоруссии и Подмоскowie. Мощность озерно-ледниковых глин возрастает к югу и составляет в Ленинграде 16–19 м, а еще южнее, в восточном Приильменье, – 23,5 м. В Эстонии мощность ленточных глин достигает 8–10 м, а в Иксийской депрессии (бассейн р. Онеги) – 44 м.

Ленточные глины обычно залегают на морене или на флювиогляциальных отложениях, нивелируя неровности рельефа, а перекрываются последниковыми и современными образованиями и нередко выходят на поверхность.

Ленточная стоимость обусловлена сезонными условиями осадконакопления в озерных бассейнах. Летние слои, как правило, более песчанистые и пылеватые, а зимние – более глинистые. Мощность отдельных слоев или лент изменяется от нескольких миллиметров до 15–30 см, а местами ленточность становится не ясно выраженной или вообще исчезает.

В Приневской низменности ленточная толща подразделяется на три горизонта: нижний представлен серыми неясными слоистыми суглинками

с включениями гравия и мелкой гальки; выше залегают тонкослоистые глины, которые местами полностью размыты; верхний горизонт состоит из глин с хорошо выраженной грубой слоистостью.

В районе г. Луги наблюдается обратная картина. Здесь низы толщи сложены толстослоистыми глинами с редкими невыдержанными прослойками и линзами мелкозернистых песков мощностью 0,2–1 м. Толщина глинистых слоев достигает 25 см, а мощность прослоек пыли редко превышает 1–2 мм. Выше залегают тонкослоистые глины и суглинки, перемежающиеся с прослойками и линзами мелкозернистого песка. В Новгороде отмечены ленточные отложения с толщиной глинистых лент 3–10 мм, а пылеватых — 5–50 мм, при этом мощность лент увеличивается с глубиной.

При вскрытии ленточных глин выемками нередко происходит суффозия тонкого песчаного материала и оплывание откосов. Под действием гидродинамического давления эти породы легко теряют свою связность и переходят в плывуны. Наличие ленточных глин или супесей на участке строительства резко осложняет его исследования. Например, по этой причине пришлось отказаться от строительства ГЭС на р. Нерис. Зависимость угла внутреннего трения и сцепления от естественной влажности для глин этого района приведена на рис. 10.

Для ленточных глин севера Белоруссии Л.К. Морозовой и Н.Г. Лукинской (1973 г.) выявлены следующие довольно тесные связи между показателями деформативных и прочностных свойств (модуль деформации E , сцепление c , угол внутреннего трения φ) и характеристиками физических свойств (показатель консистенции B , влажность W , коэффициент пористости e , предел раскатывания W_p):

$$c = 0,58 - 0,764B - 0,0015W \quad (R = 0,96); \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = 0,340 - 0,36B - 0,00125W \quad (R = 0,60); \quad (3)$$

$$E_{0,5-2} = 410,5 - 175,2e - 6,8W_p \quad (R = 0,78), \quad (4)$$

где R — коэффициент множественной корреляции.

Модуль деформации E ленточных глин района г. Пярну (Эстонская ССР) зависит от коэффициента пористости следующим образом:

e	2,4	2,0	1,8	1,6	1,4
E , МПа	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8.

С увеличением природной влажности закономерно уменьшаются плотность, модуль деформации, угол внутреннего трения и сцепление ленточных глин (рис. 11).

Глинистые засоленные грунты морского происхождения окаймляют побережье Каспийского моря, что связано с понижением уровня и регрессией моря. Слабые глинистые грунты встречаются полосами также в долинах рек Волги, Б. Иргиса, Урала, Узенья, Маныча и прослеживаются от Каспийского побережья до Урала и Ергеней. Мощность их здесь не превышает 12–15 м.

Слабые глинистые грунты морского происхождения развиты в Черноморском бассейне, а также на Таманском и Керченском полуостровах и вдоль Азовского побережья, где их мощность составляет от 2–3 до 16–18 м. Подобные грунты встречаются и в Западно-Сибирской низмен-

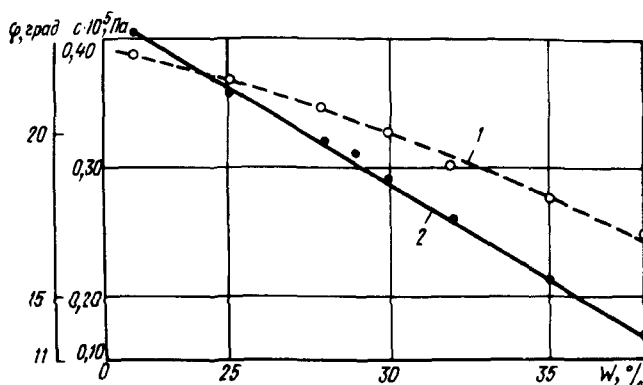


Рис. 10. Зависимость угла внутреннего трения φ (1) и сцепления c (2) от влажности W озерно-ледниковых глин района Турнишкес на р. Нерис Литовской ССР (по А.А. Аликонису, 1972 г.)

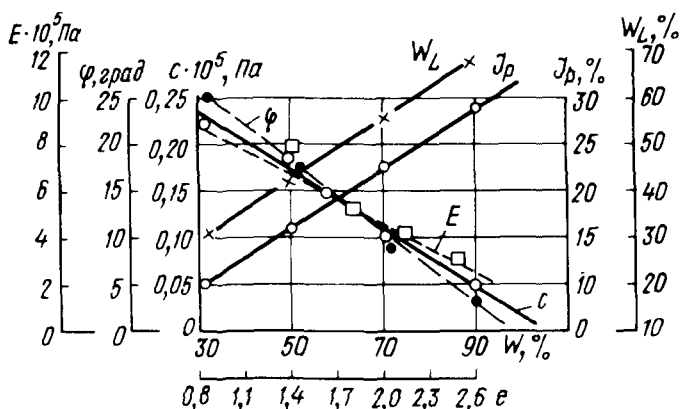


Рис. 11. Зависимость модуля деформации E , угла внутреннего трения φ и сцепления c от влажности W , числа пластичности I_p и предела текучести W_L ленточных глин района г. Пярну (по А. Вило, 1975 г.)

ности, на побережье Чукотского и Охотского морей и на Сахалине, где их мощность нередко достигает 20–30 м.

Наиболее широко распространены слабые глинистые грунты озерного и речного происхождения. Аллювиальные речные глинистые отложения типичны для пойменных и надпойменных террас почти всех крупных равнинных рек Европы и Азии. Неудивительно поэтому, что слабые глинистые грунты занимают большие территории в долинах Днепра, Зап. Двины, Волги, Оки, Камы, Оби, Енисея, Лены, Сырдарьи, Амударьи, Дона, Хопра и др. Дельты крупных рек нередко полностью сложены

толщей переслаивающихся водонасыщенных глинистых грунтов изменчивого состава — от иловатых супесей до глины и илов. Мощность глинистых грунтов в дельтах крупных рек достигает 15–20 м, а площади их распространения исчисляются тысячами квадратных метров. Например, дельта Волги занимает около 12 тыс. км², а Амударьи — 10 тыс. км².

К слабым водонасыщенным глинистым грунтам принадлежат различные по генезису отложения, которые отличаются друг от друга минералогическим составом, структурными особенностями и показателями физико-механических свойств. Однако им присущи и общие закономерности, характеризующие изменения прочностных и деформационных показателей в процессе их уплотнения. Например, сжимаемость водонасыщенных глинистых грунтов высокая, модули общей деформации в зависимости от коэффициента пористости e изменяются от 0,6–0,7 до 3–4 МПа (рис. 12). При этом значения модулей деформации глинистых грунтов зависят от условий испытаний. При нагружении штампов малыми ступенями нагрузок получаются более высокие значения модулей деформации для одних и тех же грунтов. В случае длительной выдержки каждой ступени нагрузки до полной стабилизации осадки также повышаются значения модулей деформации. Существенную роль играют форма и размер штампов. Так, малые штампы площадью 600–1000 см² теряют устойчивость при значительно меньших давлениях, чем большие штампы площадью 5000–10 000 см².

Коэффициент бокового расширения не является постоянной величиной для слабых водонасыщенных глинистых грунтов, а изменяется в зависимости от их напряженного состояния. При вертикальном давлении 0,01–0,05 МПа он равен 0,05, при давлении 0,05–0,1 МПа возрастает до 0,2, а при давлении 0,1–0,2 МПа достигает более 0,4. Удельное сопротивление сдвига и угол внутреннего трения водонасыщенных глинистых грунтов изменяются в зависимости от их плотности и условий испытания.

При инженерных изысканиях прочность слабых водонасыщенных глинистых грунтов нередко определяется только по методу ускоренного неконсолидированного сдвига. При этом, как правило, получают минимальные значения сцепления и угла внутреннего трения, которые чаще всего и принимают в качестве нормативных характеристик. При испытаниях по методике медленного консолидированного сдвига значения сцепления примерно на 30% выше значений, полученных ускоренным неконсолидированным сдвигом, а угол внутреннего трения возрастает на 20–60%. На стадии изысканий под технический или техно-рабочий проект методика сдвиговых испытаний корректируется с учетом типа здания (сооружения), величин нагрузок на фундаменты основания и сроков строительства.

Водопроницаемость глинистых грунтов, как правило, низкая. Коэффициент фильтрации зависит от гранулометрического состава и плотности и изменяется от 10^{-8} до 10^{-5} см/с. Значения его определяют в лаборатории на монолитах с использованием компрессионно-фильтрационных приборов различных конструкций.

Засоленные глинистые грунты и солончаки встречаются в засушливой зоне нашей страны. Особенно широко они распространены в Казахстане и Средней Азии — в районах развития сухих степей, полупустынь и пустынь.

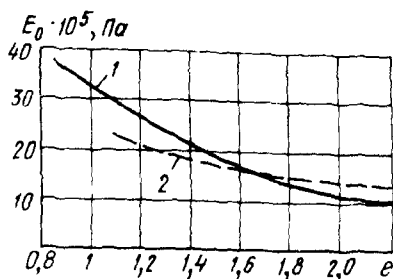
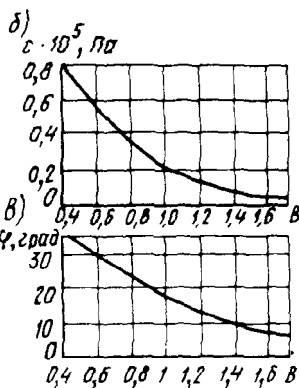
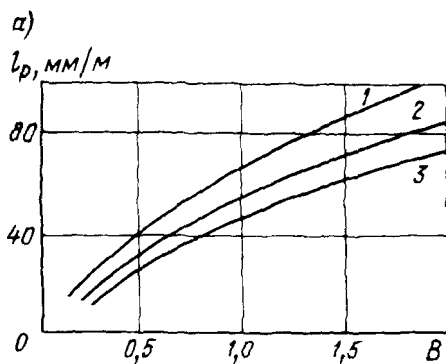


Рис. 12. Зависимость модуля общей деформации E_0 от коэффициента пористости e для слабых водонасыщенных суглинков (1) и глин (2) (по М.Ю.Абелеву, 1975)

Рис. 13. Зависимость деформационных (а) и прочностных (б) и (в) показателей слабых засоленных глинистых грунтов от консистенции 1 — при $\rho = 10^5$ Па; 2 — при $\rho = 0,5 \cdot 10^5$ Па; 3 — при $\rho = 0,25 \times 10^5$ Па



Результаты полевых и лабораторных исследований, проводившихся в Казахском филиале СоюздорНИИ, показывают, что природная влажность мокрых солончаков составляет $(0,8 \div 1,4) W_T$, содержание легко-растворимых солей — 2–10%. В зависимости от состава и содержания солей в грунте его физико-механические свойства могут значительно меняться. Степень засоленности в интервале, характерном для мокрых солончаков, определенным образом влияет на значение коэффициента консистенции, что позволяет использовать последний в качестве основного показателя состояния засоленных глинистых грунтов (рис. 13).

В зависимости от влажности и засоленности показатели физико-механических свойств мокрых солончаков изменяются в пределах $c = (0,0 \div 0,7) 10^5$ Па, $\varphi = 5 \div 30^\circ$, $E = (14 \div 35) 10^5$ Па и менее, что позволяет отнести их к группе слабых грунтов.

2.5. Рыхлые пески*

Основным критерием для выделения рыхлых песков как слабых грунтов среди большого разнообразия песчаных отложений является их невысокая плотность. Практически к рыхлым могут быть отнесены пески любого состава и генетической принадлежности. Показатели плотности песка — пористость и коэффициент пористости — считаются важнейшими для характеристики песчаных грунтов. Являясь одним из самых

* Раздел написан совместно с канд. геол.-минерал. наук Э.Р. Черняком (ПНИИИС).

простых показателей как по физическому смыслу, так и по способам определения, эти характеристики косвенно позволяют судить о прочностных и деформационных свойствах песков, их несущей способности и даже в известной мере предопределяют подход к оценке состава и объема работ при инженерно-геологических изысканиях для строительства.

Согласно СНиП II-15-74, для определения категории рыхлости песка требуется проведение на каждой строительной площадке специальных исследований. Вместе с тем для назначения нормативных значений песков плотных и средней плотности при расчете по деформациям оснований зданий и сооружений допускается пользоваться данными, приведенными в табл. 1 прил. 2 СНиП II-15-74.

Критерии для определения категории рыхлости песков условны и за последние 25 лет менялись трижды (табл. 14).

Т а б л и ц а 14. Критерии для определения категории рыхлости песка, принятые в различных документах

Пески	НиТУ 6-48 по плотности Q	НиТУ 127-55 по коэффициенту	СНиП II-15-74 пористости e
Гравелистые крупные и средней крупности	$D > 0,33$	$e > 0,65$	$e > 0,70$
Мелкие	—	$e > 0,70$	$e > 0,75$
Пылеватые	—	$e > 0,80$	$e > 0,80$

Изменения норм оценки рыхлых песков приводили к тому, что в пределах конкретных территорий площади, занятые рыхлыми песками, существенно изменялись. Например, по данным И. Вайчайтиса, Б. Сиддауге, И. Шимкуса (1972 г.), на территории Литовской ССР, в соответствии с НиТУ 6-48, более половины всех песков отнесены к категории плотных, а в соответствии с НиТУ 127-55 — в 3 раза меньше. Естественно, что в этом случае площадь песков, отнесенных к категории рыхлых, увеличилась в 4 раза. В соответствии со СНиП II-15-74, площади, занятые рыхлыми песками на территории Литовской ССР, уменьшились. Отсюда следует, что критерии выделения категории рыхлости песков подлежат уточнению. В настоящей работе пески по плотности сложения классифицируются в соответствии со СНиП II-15-74.

Рыхлое сложение песков при образовании обуславливается их составом, однородностью формы зерен, содержанием глинистой фракции и условиями осадконакопления. Рыхлые пески чаще встречаются среди хорошо отсортированных песчаных отложений, однородных по гранулометрическому составу. В таких песках отсутствуют мелкие частицы, заполняющие промежутки между крупными фракциями. Присутствие в песках глинистой фракции способствует образованию рыхлых структур. Это объясняется тем, что глинистые частицы обволакивают более крупные (песчаные) и раздвигают их, вследствие чего увеличивается пористость грунта, поэтому в природе рыхлыми часто являются более дисперсные пески — глинистые и пылеватые. Неправильная форма и угловатость частиц, шероховатость их поверхности влияют на увеличение пористости песка. Пески, состоящие из частиц удлиненной и пластинча-

той формы, например слоистые, имеют, как правило, более рыхлое сложение.

Условия осадконакопления влияют на плотность песков, но они настолько разнообразны и изменчивы, что в пределах небольших площадей могут встречаться пески рыхлого и плотного сложения. Рыхлые морские пески встречены в глубинной зоне среди фракций, отлагавшихся в условиях спокойного волнового режима; этим пескам свойственна более высокая дисперсность. Наличие рыхлых песков в толще флювиогляциальных отложений косвенно подтверждается наблюдавшейся в некоторых районах самопроизвольной их осадкой. При этом приходили в движение большие массы водонасыщенного песка, передвигавшиеся на значительные расстояния, что можно объяснить только их рыхлым сложением. Пески рыхлого сложения встречаются часто и в аллювиальных отложениях. Крупные аварии гидротехнических и других сооружений связаны с разжижением рыхлых аллювиальных песков [8]. Наиболее широко рыхлые пески развиты на пойменных террасах и в дельтовых отложениях рек, например Волги и Амударьи.

Эллювиальные пески отличаются угловатой формой зерен, сильно-выветренной неровной поверхностью частичек, нередко покрытой железистой оболочкой, что обуславливает их рыхлое сложение; при этом отмечается повышенная пористость в верхних частях разрезов. Рыхлые пески не имеют широкого распространения среди песчаных пород. По данным П.Н. Фадеева (1951 г.), рыхлые пески в Мещерской низменности среди современных аллювиальных отложений встречаются в 21% общего числа песков данного генетического типа; водно-ледниковые подморенные пески — в 10%; валдайские аллювиальные пески — в 9%; водно-ледниковые надморенные пески — в 8,5%; золотые пески — в 4% и аллювиальные пески Подмосковья — в 2,5%.

По гранулометрическому, минералогическому и химическому составу рыхлые пески не отличаются от аналогичных песков другой плотности. Можно лишь отметить повышенное содержание глинистых фракций и как следствие — несколько большее содержание глинистых минералов.

Главной особенностью рыхлых песков являются низкие показатели их прочностных и деформационных свойств и способность к разжижению в водонасыщенном состоянии. В технической литературе из-за отсутствия достоверных данных практически не содержится сведений о свойствах рыхлых песков, что связано с трудностями определения показателей прочностных и деформационных свойств песков рыхлого сложения. Например, приходится учитывать специфическую особенность песка, заключающуюся в том, что в ходе сдвиговых испытаний неизбежно изменяется его плотность в плоскости среза; рыхлые пески уплотняются и плотность их возрастает до некоторой критической пористости. В результате сопротивление песка сдвигу определяется его состоянием вдвигаемой плоскости и при испытаниях возможно завышение угла внутреннего трения рыхлых песков.

Как известно, модуль деформации является основной характеристикой сжимаемости грунтов и значение его существенным образом зависит от метода определения. Например, при исследовании плотных песков штампом значение модуля может быть в несколько раз больше полученного при компрессионных испытаниях в лаборатории. Для рыхлых песков отмечается обратная зависимость, но точной взаимосвя-

зи модулей деформации по данным компрессионных и штамповых испытаний для них не установлено.

Вместе с тем модули деформации, полученные по данным штамповых и прессиометрических испытаний рыхлых песков, близки по абсолютному значению и не требуют дополнительной корректировки, так как переходный коэффициент между ними равен единице.

Для ориентировочной оценки показателей прочностных и деформационных свойств рыхлых песков в зависимости от их плотности и состава можно пользоваться данными табл. 15.

Т а б л и ц а 15. Прочностные характеристики рыхлых песков

Вид рыхлого песка	Плотность сухого песка $\rho_{с.п.}$, г/см ³	Угол внутреннего трения φ , град	Модуль деформации $E \cdot 10^5$, Па
Пылеватый	1,38	24	20
	1,40	25	
	1,45	26	
Мелкий	1,43	27	15
	1,45	29	30
	1,50	30	70

При исследовании песков, содержащих малое количество глинистых частиц, угол внутреннего трения можно определить по углу естественного откоса песка. По данным многих исследователей, расхождение между этими параметрами, как правило, не превышает 1–3°.

Одной из характерных особенностей рыхлых песков является их способность к разжижению. В природе встречаются пески, которые при определенных условиях способны переходить в текучее состояние. Это наиболее интенсивно проявляется в мелких и пылеватых водонасыщенных песках рыхлого сложения и вызывается нарушением их структуры под влиянием механических воздействий. В настоящее время отсутствуют строгие критерии, позволяющие по показателям состава и состояния песков однозначно судить об их способности к разжижению. Характер разжижения не зависит от гранулометрического состава песка, но с увеличением крупности уменьшается время пребывания песка в разжиженном состоянии. Например, время пребывания в разжиженном состоянии слоя рыхлоуложенного гравия достигает всего нескольких секунд. За такой короткий промежуток времени их растекание не успевает произойти, поэтому их разжижение обычно не представляет опасности для устойчивости сооружений. Наличие в рыхлом песчаном грунте большого количества пылеватых или глинистых частиц уменьшает коэффициент фильтрации, вследствие чего время пребывания песка в разжиженном состоянии увеличивается до 10 мин, что может вызвать разрушение сооружений.

Способность песка к разжижению следует оценивать по степени плотности, так как при одной и той же пористости и одинаковом гранулометрическом составе пески могут иметь различную плотность. Например, при плотности скелета 1,56 г/см³ намывтый песок района Волжской ГЭС имени В.И. Ленина вполне пригоден для ее сооружения, а песок района Шульбинской ГЭС при такой же плотности оказывается непригодным из-за возможности его разжижения [8].

2.6. ИСКУССТВЕННЫЕ ГРУНТЫ

Согласно СНиП П-15-74, грунты искусственного происхождения подразделяются на группы и виды в зависимости от однородности состава, сложения, способа производства земляных работ, качественной характеристики материала грунта и давности его образования.

В зависимости от однородности состава и сложения грунтов выделяют: планомерно-возведенные насыпи (дамбы, плотины, насыпи дорог); отвалы грунтов и отходов производства (шлаки, золы, формовочные земли, отходы обогатительных фабрик с содержанием органических включений не более 5%); свалки грунтов, отходов производства и бытовых отбросов (состав и сложение весьма изменчивы).

По способу возведения различают намывные грунты, образованные способами гидромеханизации, и насыпные, отсыпанные автомобильным или железнодорожным транспортом. Характерной особенностью насыпных грунтов является их способность к самоуплотнению под действием собственного веса в результате процессов дегидратации, структурообразования и разложения. В зависимости от давности отсыпки или намыва искусственные грунты подразделяются на слежавшиеся, в которых процесс уплотнения под действием собственного веса закончился, и неслежавшиеся, в которых процесс уплотнения не закончился.

Насыпи, уплотняемые во время строительства транспортом или специальными машинами, испытывают наименьшие конечные осадки и сравнительно быстро консолидируются. Непланомерно отсыпанные грунты, наоборот, дают большие осадки и процесс их уплотнения длится долгие годы. Хорошо уплотненные насыпи из крупнозернистого песка и обломочного материала дают осадку до 1% первоначальной высоты, менее уплотненные — до 1,5%, а неуплотненные — до 2,5–3%. Осадки среднеуплотненных глинистых насыпей составляют около 2–2,5%, а неуплотненных — до 10–12%.

Наибольшие осадки под действием собственного веса дают городские и производственные свалки, содержащие значительное количество бумаги, опилок и щепы. Осадки насыпи в этом случае достигают 28–30% их первоначальной высоты.

Время самоуплотнения насыпных грунтов колеблется от 3 до 20 лет. В редких случаях осадки стабилизируются в течение года, а иногда продолжаются 30–50 лет и больше. Однако в основном процесс самоуплотнения песчаных насыпей заканчивается в первые 2 года, а глинистых — за 5–7 лет (табл. 16).

Прочностные и деформационные свойства некоторых характерных видов искусственных грунтов приведены в табл. 17 и 18, а их физикомеханические свойства — в табл. 19.

Свойства намывных грунтов в значительной степени зависят от состава исходных (карьерных) грунтов и технологии намыва. По гранулометрическому составу намытые грунты, как правило, крупнее грунтов, используемых для намыва, так как часть мелких фракций отмывается и удаляется вместе с осветленными водами. Количество отмываемых фракций регулируют, изменяя технологию намыва.

При надводном намыве размеры частиц намываемого грунта уменьшаются при удалении от распределительного трубопровода. Раскладка грунта по фракциям происходит по принципу обратного фильтра, что весьма важно для плотин, так как это предотвращает суффозию

Т а б л и ц а 16. Время самоуплотнения насыпных грунтов
(Руководство по проектированию зданий и сооружений, 1977 г.)

Насыпные грунты	Ориентировочное время самоуплотнения, годы
Планомерно возведенные насыпи (при их недостаточном уплотнении) из грунтов:	
песчаных	0,5–2
глинистых	2–5
Отвалы из грунтов:	
песчаных	2–5
глинистых	10–15
Отвалы из отходов производства:	
шлаков формовочной земли	2–5
золы и каолошниковой пыли	5–10
Свалки грунтов и отходов произ- водства из:	
песчаных грунтов и шлаков	5–10
глинистых грунтов	10–30

грунта. По мере увеличения количества пылеватых и глинистых фракций в исходном грунте их содержание в намывных грунтах возрастает, но при начальном их количестве до 10% они почти полностью отмываются и их содержание в намывных грунтах не превышает 1–2%. Чем больше содержание пылеватых и глинистых частиц в карьерном грунте, тем равномернее их распределение по длине пляжа. При малом содержании мелких фракций в исходном грунте наибольшее их отложение наблюдается ближе к месту выпуска пульпы и на хвостовых участках, где сказывается влияние прудка-отстойника.

При намыве под воду отмечается уменьшение крупности частиц по мере удаления от места выпуска пульпы, однако дифференциация по фракциям выражена менее четко, чем при надводном намыве. Фракции размером менее 0,05 мм обычно в подводную призму не откладываются, так как они медленно оседают и отжимаются при намыве за пределы профиля сооружения. В толще намывных грунтов отмечается четкая слоистость; при подводном намыве наблюдается косая слоистость, образующаяся по подводному откосу, где грунт имеет слои разной крупности, направленные под углом естественного откоса.

Плотность намывных грунтов зависит от гранулометрического состава, степени окатанности зерен, технологии намыва и сроков консолидации. Чем крупнее грунты по гранулометрическому составу, тем плотнее укладка намывного грунта. Плотность намывных песков резко возрастает с увеличением содержания гравия. При увеличении содержания пылеватых и глинистых частиц в мелкозернистых песках до 3% и в разнозернистых песках до 9–12% плотность намывных песков также увеличивается, однако дальнейшее повышение их количества вызывает уменьшение плотности. Неоднородные пески укладываются при намыве более плотно, чем однородные. Пески неокатанные с угловатой формой зерен ложатся более рыхло. Плотность песка при намыве в воду уменьшается с глубиной, приближаясь к его показателям плотности в предельно рыхлом сложении. Предельно плотное сложение намывных песчаных грунтов соответствует пористости 28–34%, предельно рыхлое — пористости 41–49%, критическая пористость составляет 38–44%.

Т а б л и ц а 17. Прочностные характеристики некоторых видов насыпных грунтов (по М.И. Хазанову, 1975 г.)

Насыпные грунты	Сцепление $c \cdot 10^5$, Па	Угол внутреннего трения φ , град
Отсыпанные покровные суглинки (р-н Белгорода)	0,63	26
Слежавшиеся фосфогипсы (р-н Воскресенка)	0,19	28
Перелопаченные фосфогипсы	0,08	21
Пиритовые огарки	0,15	25
Отсыпанные алевриты	0,20	18

Т а б л и ц а 18. Деформационные характеристики некоторых видов насыпных грунтов (по М.И. Хазанову, 1975 г.)

Отвалы насыпных грунтов	Давность отсыпки, годы	Мощность отвала, м	Предел пропорциональности, 10^5 , Па	Модуль деформации $E \cdot 10^5$, Па
Суглинки и глины с включением шлаков	17	9	0,6	50
Суглинки и супеси	20	7	1	90
Мергелистые глины	8	3,5	1,7	48
Шлаки и калошниковая пыль	14	12	2	150
Золы ТЭЦ	17	2,5	1	55

Т а б л и ц а 19. Физико-механические свойства насыпных грунтов г. Москвы (по Р.С. Зиянгирову, 1980 г.)

Грунты	Влажность, %	Коэффициент пористости e	Модуль деформации $E \cdot 10^5$, Па	Угол внутреннего трения φ , град	Сцепление $c \cdot 10^5$, Па
Отвалы суглинков со строительным мусором возрастом:					
10 лет	12,5–19,8	0,41–0,64	24–44	19–21	0,15–0,25
1 год	14,2–23,7	0,46–0,77	34–79	10–24	0,12–0,32
Золоотвалы ТЭЦ возрастом 3 года:					
пылеватая супесь	48–56,2	1,02–1,42	20–22	27–28	0,04–0,09
пылеватая супесь и песок	52–58,4	1,36–1,49	24–25	22–25	0,05–0,08
Свалки бытовых отходов возрастом:					
10 лет	25,7	–	27–32	–	–
3 года	24,8	–	16	–	–
до 1 года	30,3	–	9–11	–	–

Таблица 20. Нормативные характеристики грунтов, применяемых на территориях, подлежащих застройке (по П.Д. Лобасову, 1986 г.)

Грунт	Содержание фракции, % от их размера в мм				Коэффициент уплотнения, $1/10^3$ Па	Коэффициент фильтрации K_f , см/с	Угол внутреннего трения φ , град
	>0,001	0,001-0,005	0,005-0,01	0,01-0,05	0,05-0,25		

Песок:

мелкий - 0,5-0,7 0,1-0,8 0,1-3 46-62 $0,006-0,009$ $2,5 \cdot 10^{-3}$ - 29-32

пылеватый - 0,7-1,5 0,3-1,5 4,5-11 81-84 $0,007-0,01$ $1,3 \cdot 10^{-3}$ - 27-31

пылеватоглинистый - 1,4-2,1 3,4-6 26-43 50-67 $0,009-0,012$ $5 \cdot 10^{-4}$ - 29-34

Пылеватоглинистый 0,5-1,3 1,0-1,7 2-8 56-86 3-40 $0,008-0,013$ $5,5 \cdot 10^{-4}$ - 28-33

Суглинок 1,2-4 1,8-4 1,5-2 28-50 40-68 $0,01-0,019$ $5 \cdot 10^{-4}$ - 28

Суглинок 0-4 3,6-6 11-27 62-66 1-20 $0,011-0,03$ $1 \cdot 10^{-6}$ - 26-32

Продолжение табл. 20

Грунт	Среднее c , 10^3 Па	Плотность, г/см ³			Влажность W , %	Коэффициент водонепроницаемости C	Пористость n , %	Степень шаткости	Показатель конжентин B
		частиц	грунта	сухого грунта					

Песок:

мелкий - 2,65-2,67 1,96-2,06 1,55-1,68 19-23 0,9-1 36-41 $0,55-0,75$ -

пылеватый - 2,65-2,66 1,94-2,06 1,52-1,69 22-27 1 36-42 $0,70-0,95$ -

пылеватоглинистый 0,05-0,1 2,66-2,68 1,82-2 23-28 0,85-0,95 39-44 $0,7-0,8$ -

Пылеватоглинистый 0,15-0,2 2,65-2,68 1,86-2 24-29 0,9-1 40-46 - 1

Суглинок 0,2-0,25 2,66-2,68 1,86-2 26-30 0,9-1 41-49 - 1

Суглинок 0,18-0,28 2,65-2,7 1,85-2 27-40 0,9-1 40-52 - 1

Пылеватоглинистый

Фильтрационная способность намытых грунтов не одинакова в горизонтальном и вертикальном направлениях; в горизонтальном направлении она несколько выше. Разница между коэффициентами фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлении объясняется слоистостью грунта: чем разнороднее намытый грунт по отдельным слоям, тем она больше.

Механические свойства намытых грунтов зависят от гранулометрического состава, плотности и характера сложения. Нормативные характеристики грунтов намытых на территориях, подлежащих застройке, приведены в табл. 20.

Глава 3. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. СОСТАВ И ОБЪЕМ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

В основу оценки инженерно-геологических условий территории строительства должно быть положено комплексное изучение природной обстановки. Это позволяет определить характер и направленность изысканий, состав и объем исследовательских работ.

В состав инженерно-геологических изысканий территорий, занятых слабыми грунтами (болота, заболоченность, морские лиманы и пр.), входят: установление границ их распространения, выявление мощности и строения толщи слабых грунтов и определение их физико-механических характеристик.

Инженерно-геологические изыскания для строительства промышленных объектов выполняют с соблюдением требований инструкции СН 225-79, линейных объектов — СН 263-62, трубопроводов — РСН 31-69; при этом учитывают методические указания по проектированию земляного полотна на слабых грунтах, инструкции по исследованию слабых грунтов в гидротехническом строительстве, а также СНиП П-15-74.

Проектирование зданий и сооружений выполняют обычно в две стадии: технико-экономическое обоснование (ТЭО) и техно-рабочий проект. Инженерно-геологические изыскания выполняют в два этапа, однако при весьма сложных инженерно-геологических условиях и проектировании сооружений высокого класса с согласия заказчика исследования могут выполняться в три этапа.

На первом этапе инженерно-геологических изысканий производят сбор, анализ и обобщение материалов и отчетов о ранее выполненных на данной территории исследованиях; при необходимости выполняют инженерно-геологическую рекогносцировку, опробование и, в исключительных случаях, лабораторные работы. В особо сложных условиях вместо рекогносцировки выполняют инженерно-геологическую съемку в полном объеме в соответствии с СН 225-79.

Границей площади, подлежащей исследованию на участках распространения слабых грунтов, является территория, отведенная под строительство объекта согласно типовому генплану и ТЭО с охватом зоны влияния строительства на изменение природных условий и окружающей среды, определяемой "Основными положениями по восстановлению земель, нарушенных при разработке полезных ископаемых, приведении геолого-разведочных, строительных и иных работ".

Рекогносцировку выполняют по маршрутам, ранее намеченным по картам и аэрофотоснимкам. Направление маршрутов должно быть нор-

мальным к геоморфологическим элементам рельефа, к которым приурочены болота, лиманы, озера, речные поймы, морские террасы, где развиты слабые грунты. Расстояние между маршрутами принимают не более 200 м. В процессе съемки по намеченному маршруту описывают характер формы рельефа, растительного покрова, условий увлажнения территории и обнажения грунтов. При необходимости проходят опорные выработки (скважины или шурфы) на каждом типичном участке территории, занятой слабыми грунтами. Между опорными скважинами проходят две-три зондировочные скважины для определения состава и мощности слабых грунтов. Глубину опорных скважин назначают из расчета проходки всей толщи слабых грунтов с заглублением на 1–3 м в плотные минеральные грунты дна болота, озера или лимана. Отбор проб при проходке выработок производят через каждые 0,5–1 м с целью визуального описания грунтов.

По результатам первого этапа составляют схематическую карту ландшафтно-геологического районирования территории, занятой слабыми грунтами, масштаба 1:5000 – 1:25 000, которая служит основой для выбора типа фундаментов зданий и сооружений, а также оптимального варианта прокладки трасс коммуникаций и прочих линейных объектов. К карте прилагают схематические ландшафтно-геологические разрезы и пояснительную записку с рекомендациями, отражающими инженерно-геологические условия строительства и требования по охране окружающей природной среды.

На втором этапе изысканий ведутся работы на выбранной площадке строительства или прокладки трассы линейных сооружений. В состав работ на этом этапе входят: инженерно-геологическая и ландшафтно-индикационная съемка территорий, занятых слабыми грунтами в пределах границ выбранной площадки (п. 3.2); горно-проходческие работы (п. 3.3); отбор проб и монолитов грунтов для лабораторных испытаний (п. 3.3); лабораторные работы (п. 3.5); полевые специальные исследования грунтов – динамическое и статическое зондирование, вращательный срез, прессиометрические испытания (п. 3.4). Состав и объем работ на втором этапе определяется специальной программой. При назначении объема исследований территорий со сложными грунтовыми условиями, какими являются слабые грунты, необходимо выполнять следующие требования:

1) скважины располагают по периметру или по осям зданий, равномерно по всей площадке застраиваемой территории;

2) число скважин назначается из расчета не менее одной скважины на 200 м² площади проектируемого здания и не менее 3–4 на одно отдельно стоящее здание; число скважин может быть сокращено до 50% за счет увеличения точек испытаний статическим или динамическим зондированием;

3) глубина скважин должна в 1,5–2 раза превышать предполагаемую глубину заложения фундамента, в том числе длину свай, намечаемых к использованию на данной площадке в качестве фундаментов на слабых грунтах;

4) монолиты грунта отбираются равномерно по всей толще однородного грунта, но не реже чем через 1 м; общее число монолитов по всем скважинам должно быть достаточным для статистической обработки полученных данных согласно методике, приведенной в пп. 4.1 и 4.2, но не менее 6–12 из каждой литологической разности.

В полевой лаборатории определяют следующие характеристики слабых грунтов: влажность, содержание органических веществ, зольность, степень разложения (для торфов), пределы пластичности, плотность, ботанический состав (для торфов), содержание CaCO_3 . Методика их определения приводится в п. 3.5.

Испытания грунтов статическим зондированием производят с целью: установления положения в плане и по глубине границ между различными по литологическому составу слоями, а также между участками с различной плотностью — прочностью в одном литологическом слое; определения положения кровли более плотного грунта (минерального дна болота, лимана, озера и пр.); оценки несущей способности слабых грунтов и их отдельных слоев; определения плотности сложения, коэффициента пористости, угла внутреннего трения, модуля общей деформации.

Число точек испытаний слабых грунтов статическим и динамическим зондированием следует принимать в сложных условиях в 1,5—2 раза большим, чем число скважин, и распределять их на строительной площадке в пределах контуров проектируемых зданий между скважинами. В некоторых случаях, главным образом при исследовании неоднородных рыхлых песков, насыпных и намывных грунтов, число точек зондирования следует увеличивать за счет сокращения числа скважин. Зондирование следует выполнять на глубину проходки скважин.

Границы между слоями различного литологического состава устанавливают по данным зондировочных испытаний путем сравнения графиков изменения значений сопротивления грунтов под конусом зонда с характерными разрезами опорных буровых скважин. К слабым грунтам, однородным по литологическому составу, состоянию и свойствам, относятся такие, для которых максимальные значения сопротивления под конусом не превышают минимальных по всей глубине зондирования более чем на 40%, а коэффициент вариации не превышает 0,3.

По результатам исследований слабых грунтов по установленной форме составляют отчет с выводами и рекомендациями по устройству фундаментов зданий, сооружений и коммуникаций.

На третьем этапе изысканий на выбранной площадке в пределах контуров зданий и сооружений проходят дополнительно ряд технических скважин с отбором монолитов грунтов через 0,5—1 м для испытаний на сдвиг и компрессионных; проводят испытания крыльчаткой на срез (п. 3.4.5) и прессиометрами (п. 3.4.6) на различных глубинах; выполняют комплекс лабораторных компрессионных и сдвиговых испытаний при нагрузках и режимах, близких к условиям строительства проектируемых зданий и сооружений.

Число отбираемых монолитов должно быть на 25% больше общего числа испытываемых образцов для обеспечения необходимой повторности результатов и надежности статистической обработки исходных данных.

Документация по третьему этапу изысканий представляется в виде сводного отчета, в который входят все материалы исследований предыдущих этапов, детально проанализированных и оформленных в соответствии с действующими правилами и нормами, с выводами и рекомендациями по условиям строительства и прогнозу изменения природной обстановки. К отчету прилагают специальную инженерно-геологическую карту участка строительства; геолого-литологические разрезы с пока-

занием на них свойств слабых грунтов по глубине с данными о влажности, статическом и динамическом зондировании, результатами исследований крыльчатками и прессиометрами; сводная таблица лабораторных испытаний, графики и паспорта полевых испытаний грунтов и другие материалы.

3.2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

Целью съемки территорий, занятых грунтами, являются комплексное изучение и оценка инженерно-геологических условий. В состав съемки входят: на первом этапе исследований — камеральное дешифрирование аэрофотоснимков, аэровизуальные наблюдения, рекогносцировка, проходка выработок и лабораторные исследования грунтов; на втором — опытно-фильтрационные работы; исследования грунтов крыльчатками и прессиометрами. Масштабы съемок принимают по табл. 21.

Т а б л и ц а 21. Масштабы инженерно-геологических съемок

Масштабы съемок	Число выработок	Расстояние между выработками, м
<i>Площадки для промышленного и гражданского строительства</i>		
1:5000—1:1000	20—50 на 1 га	50—20
<i>Трассы линейных изысканий</i>		
1:10 000 — 1:1000	10—20 на 1 км	100—10

Основным методом съемки территорий, занятых слабыми грунтами, является ландшафтно-индикационный. Метод основан на объективном существовании в природе природно-территориальных комплексов (ПТК), которые Л.С. Бергом названы географическим ландшафтом. Это такая территориальная единица, в пределах которой все природные компоненты (рельеф, климат, растительный мир, почвы, водный режим) сливаются в единое гармонически целое и находятся в тесной взаимосвязи. Учение о ландшафте получило развитие в работах С.В. Колесникова, Н.А. Солнцева, С.В. Викторова, И.С. Комарова и др. При этом установлено, что ландшафт представляет собой сложную структуру, состоящую из комплексов более низких рангов — элементов и типов. Состояние, структура и облик любого ландшафта, который изучает геолог в своей практической деятельности, отвечает определенному моменту его исторического развития. Большая часть ландшафтов не находится в полном равновесии с окружающей средой. Отдельные компоненты ландшафта и весь ландшафт в целом изменяются с изменениями внешней среды. Наиболее изменчив растительный покров, чутко реагирующий на все изменения внешней среды и в первую очередь климата [6]. Для индикационных исследований большой интерес представляют современные элементы ландшафта, среди которых особое место занимают растительные ассоциации. Известно, что изменения растительного покрова служат указанием на развитие процессов подтопления и заболачивания, снижения уровня грунтовых вод, проявления процессов вторичного засоления, изменения температурного режима грунтов.

Ландшафты изучают, типизируют и классифицируют по набору ряда признаков. При типизации из большого числа признаков, характеризующих конкретные ландшафты, оставляют только такие, которые учи-

тываются при построении классификации. Это приводит к потере некоторой информации, но она компенсируется возможностью перехода от описания конкретных ландшафтов к изучению их группировок и создает условия для обобщений научного и методического характера. При построении классификации ландшафтов для съемки территорий, занятых слабыми грунтами, в качестве ведущего признака можно использовать приуроченность ландшафта к определенному геолого-генетическому комплексу отложений. При таком подходе в отдельных подразделениях классификации допускается объединять ландшафты морских, озерных, аллювиальных, ледниковых и других генетических отложений [6]. Следует учитывать принадлежность ландшафтов к определенной природной зоне и геокриологическим условиям. Такая классификация ландшафтов разработана Ф.С. Канаевым (1968 г.) для Воркутинского региона, Полярного Урала и Приобской лесотундры. В качестве основных классификационных признаков принят растительный покров, по которому названы ландшафты, далее указаны: приуроченность ландшафта к основным формам рельефа, основной генетический тип грунтов, характер увлажнения грунтов, толщина сезонно-талого и сезонно-мерзлого слоя, характерный микрорельеф, мощность растительного, мохового и торфяного покрова.

Данная классификация позволяет разработать рекомендации по ландшафтно-геологическому дешифрированию аэрофотоснимков и районированию (типизации) территории для различных видов строительства, в первую очередь для строительства дорог, трубопроводов, ЛЭП, пересекающих обычно большое число ландшафтных комплексов. Кроме того, она может служить для прогноза изменений природной обстановки в связи с освоением территории под строительство.

Ландшафтно-индикационные исследования включают изучение и анализ ландшафтных, а также общих и специальных географических карт, литературных и фондовых материалов; предварительное дешифрирование материалов аэрофотосъемки и составление предварительной ландшафтно-индикационной карты; аэровизуальные наблюдения. Наземные ландшафтно-индикационные исследования с полевым дешифрированием аэрофотоснимков на ключевых участках и опорных маршрутах включают и составление уточненного варианта ландшафтно-индикационной карты.

Наземную ландшафтную съемку выполняют маршрутами, направление которых намечают по топографическим, геологическим, почвенным, геоботаническим, лесоустроительным и болотным картам, а также аэрофотоснимкам с учетом местоположения территорий, занятых слабыми грунтами. Расстояния между маршрутами принимают через 100—500 м в зависимости от сложности рельефа и ландшафтных типов. Маршруты намечают нормально к основным формам рельефа. По этим же маршрутам составляют схематические ландшафтно-геологические профили. Эти профили длиной по 1—3 км, являющиеся базисными (ключевыми), закрепляют на местности столбами, а рельеф нивелируют. При геоботанической съемке выделяют границы ландшафтов по растительным ассоциациям и микрорельефу, типичным для каждого из них. Например, граница между осоково-сфагновой предгорной тундрой и ивово-предгорной тундрой четко фиксируется на местности по опушке ивы.

По результатам ландшафтно-геологической съемки составляется карта. Пример такой карты для Воркутинского региона и предгорий Полярного Урала по трассе железной дороги Чум — Лабытнанги приведен на рис. 14.

На втором этапе инженерно-геологических исследований производится детальное изучение сложных ландшафтных типов, расположенных в пределах площадки для строительства, либо по трассе дороги или трубопровода. К таким типам ландшафта в Воркутском регионе относятся, например, торфяно-бугристая тундра, состоящая из бугров пучения и болот (ерсеев), заполненных слабыми грунтами, — торфом толщей до 1,1 м, суглинками оторфованными толщей до 2,5 м, илистыми суглинками толщей до 3,5 м, а ниже верхне-моренными плотными суглинками. В результате детальной комплексной съемки (с проходкой выработок, отбором монолитов грунта и их лабораторным анализом) составляют эталон типичного ландшафтного профиля, например для ивовой полосы стока (рис. 15), предгорных тундр (рис. 16) и т.п.

Основы применения аэрологических методов при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях территорий для строительства приведены в работе И.С. Гудилина и И.С. Комарова [9]. Здесь же остановимся весьма коротко на особенностях съемки территорий, занятых слабыми грунтами, прежде всего приуроченных к болотам, заболоченностям и озерам.

В основу аэрометодов для съемки болот и заболоченных земель положено дешифрирование на аэроснимках рельефа местности, окружающей болота, озера и их прибрежные участки. Методика дешифрирования разработана В.Г. Мотаевым (1967 г.). В качестве эталонов фотоизображения принимают, как правило, растительный покров. Принцип эталонирования растительного покрова разработан Б.В. Виноградовым, почв и сельскохозяйственных культур — В.В. Кузнецовым и Ю.С. Тольчельниковым*.

Аэрометоды, применяемые для целей изучения территорий, занятых слабыми грунтами, позволяют решать многие вопросы: установление границ и контуров болот, лесных массивов, берегов морей, озер и морских лиманов; определение по характеру растительного покрова отличительных особенностей почв и грунтов на глубину до 3—4 м; установление зоны наименьшего и наибольшего обводнения поверхности болот; выделение участков топи, направлений гидрографической сети и ее связи с водосборным бассейном; оценка интенсивности фильтрационного потока в любом месте болота для выбора наилучшего положения трассы дорожного перехода, мест постройки водопропускных сооружений или фильтрующих участков в насыпях; трассирование осушительной сети и каналов; выявление нарушений водного режима болот при строительстве; производство камеральной трассировки линейных объектов строительства по вариантам и выбор оптимального направления трассы; анализ условий и особенностей отдельных болотных систем, вариантов трасс дорог, трубопроводов, ЛЭП и др.

Интерпретация по эталонам аэрофотоснимков болот позволила М.А. Шапошникову [17] установить взаимосвязь между структурой растительного покрова болотных фаций и механическими свойствами

* Аэрофотографическое эталонирование и экстраполяции (методическое пособие). — Л.: Наука, 1967, 155 с.

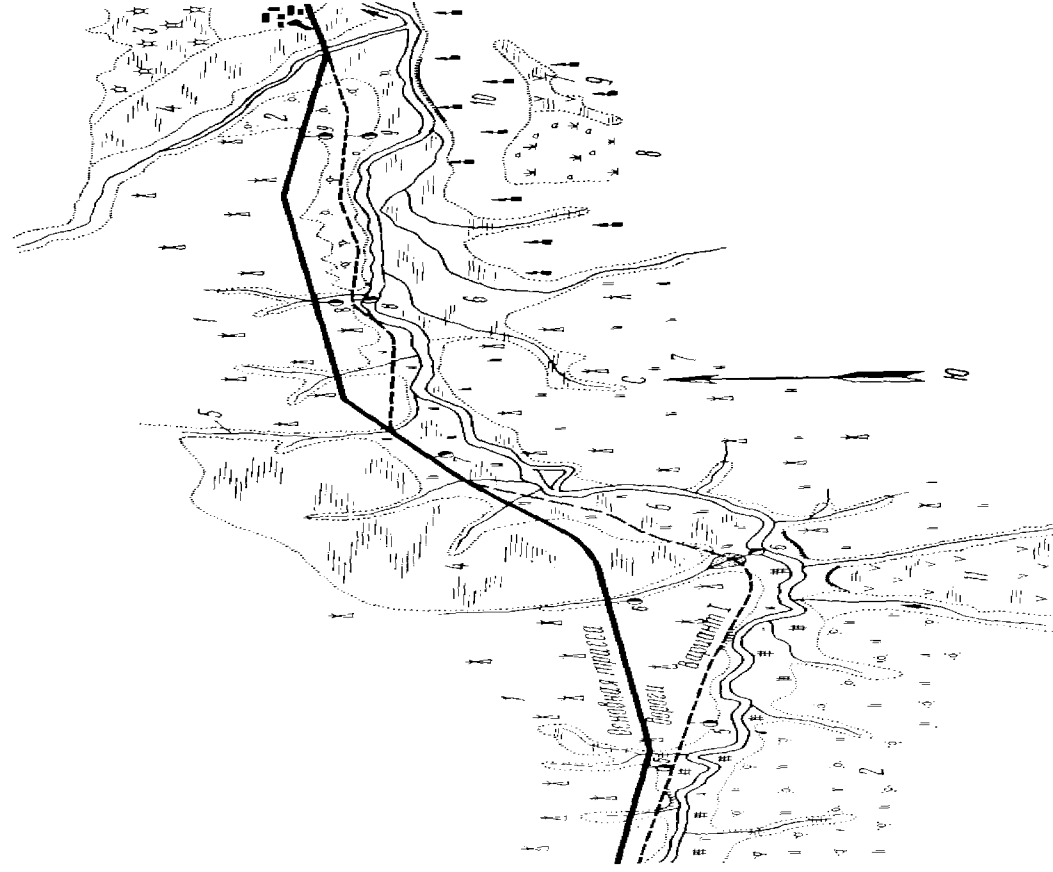


Рис. 14. Схематическая ландшафтная карта участка болот и прилегающего в пойме реки Урала (по Ф.С. Казаеву, 1969 г.)

1 - болото-оршановый тундр; 2 - болото-оршановый лес; 3 - болото-оршановый лес; 4 - болото-оршановый лес; 5 - болото-оршановый лес; 6 - болото-оршановый лес; 7 - болото-оршановый лес; 8 - болото-оршановый лес; 9 - болото-оршановый лес; 10 - болото-оршановый лес; 11 - болото-оршановый лес.

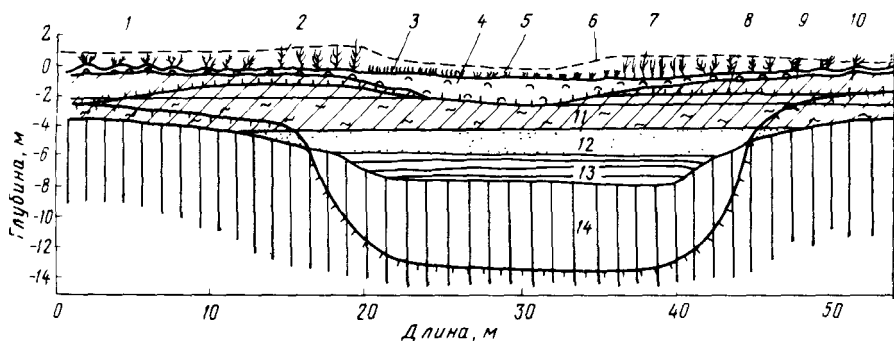


Рис. 15. Типичный ландшафтно-геологический профиль ивовой полосы стока в Воркутинском регионе (по Ф.С.Канаеву, 1969 г.)

1 – ерник; 2 – ива; 3 – зеленые мхи; 4 – торф; 5 – осока дернистая; 6 – средняя толщина снега в конце зимы; 7 – осока водяная; 8 – граница сезонно-талого слоя; 9 – покровые суглинки; 10 – граница многолетнемерзлых грунтов; 11 – овражно-делювиальные оторфованные суглинки; 12 – аллювиальные илстые супеси и пески; 13 – аллювиальные супеси и глины; 14 – верхне-моренные суглинки

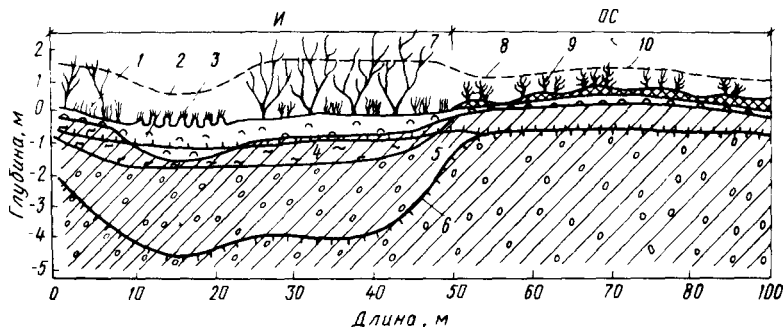


Рис.16. Ландшафтно-геологический профиль на границе двух типов осоково-сфагновой (ОС) предгорной тундры и ивовой (И) предгорной тундры (по Ф.С.Канаеву, 1969 г.)

1 – травы луговые; 2 – торф; 3 – осоковые кочки; 4 – суглинки илстые; 5 – граница сезонно-мерзлого слоя; 6 – верхняя граница вечномёрзлых грунтов; 7 – ива; 8 – ерник; 9 – мох; 10 – высота снежного покрова в конце зимы

торфа в поверхностной, средней и придонной зонах. Аэрофотосъемка дает возможность производить истолкование протекающих в болотах гидрографических процессов и создавать на основе аэрофотоснимков масштабные рельефные макеты, моделирующие местность на наиболее сложных участках.

3.3. ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗЫСКАТЕЛЬСКИХ РАБОТ

Слабые грунты в силу присущих им специфических свойств и условий залегания требуют особого подхода к методике, технологии и технике проведения изысканий. Чаще всего слабые грунты залегают в труднодоступных для обычного транспорта местах, осложненных близким залеганием уровня грунтовых вод, поэтому проходка открытых горных выработок затруднена, а отбор монолитов из шурфов, как правило, невозможен.

Проходка скважин и шурфов на территориях, занятых слабыми грунтами, осуществляется теми же станками, что и для обычных грунтов. За последние годы, по данным Б.В. Цынского (1980 г.), наибольшее применение нашли установки УГБ-50М, УРБ-2(2,5)А и ЛБУ-50. Наметилась тенденция комплексного использования буровых установок, например установки УГБ-50М, ЛБУ-50, УБП-15, БУКС-ЛГТ, БУЛИЗ и др., применяют для бурения скважин и для статического и динамического зондирования с помощью приставок, разработанных в ПНИИСе и в ряде трестов инженерных изысканий Госстроя РСФСР.

В Англии фирмой "Пилкон" изготовлен станок "Пилкон Вейсгеро" для статического и динамического зондирования. В Швеции буровое оборудование фирмы "Борро" позволяет вести бурение, статическое и динамическое зондирование, прессиометрические испытания, испытания на срез и испытания статическими нагрузками.

При испытании грунтов большое применение получила установка УГБ-50М, с помощью которой производится различные исследования. Для динамического зондирования широко используется установка УБП-15М — примерно 83% зондировочных работ, выполняе-

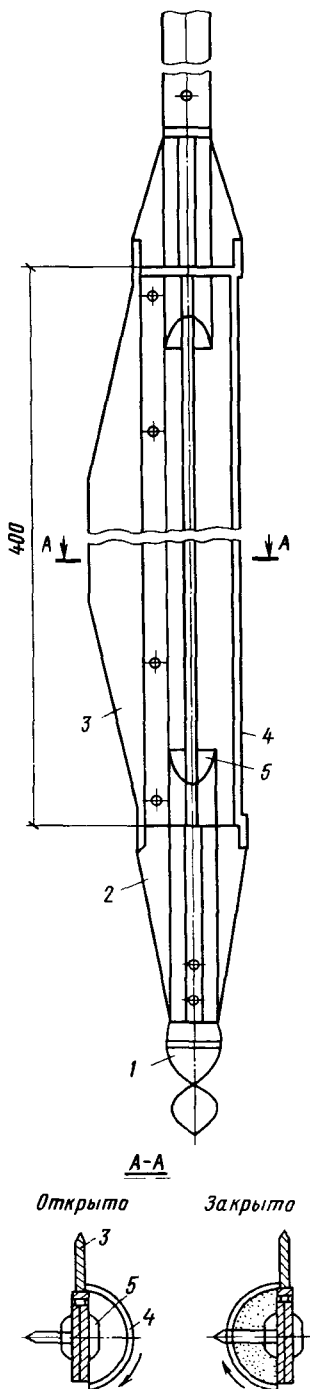


Рис. 17. Торфяной бур ТБ-5
1 — винт; 2 — полуконус; 3 — нож; 4 — ложка;
5 — сердечник

мых в СССР. В тех случаях, когда затруднен подъезд тяжелых буровых станков, используются установки облегченного типа.

Зондировочные скважины на торфяниках проходят с помощью бура-геолога, торфяного бура ТБ-5 (рис. 17) или двухдвухмотового бурового ручного комплекса без обсадки, а также с помощью легких (переносных) буровых установок с бензиновыми двигателями ЦНИИС-2.

В связи с трудностью отбора монолитов и невысокой структурной прочностью слабых грунтов их рекомендуется исследовать различными полевыми методами с применением транспортабельного малогабаритного оборудования, которое легко переносится, быстро монтируется и не требует дополнительных энергосиловых механизмов. Указанным требованиям отвечает разработанная ПНИИСом совместно с Калининским институтом полевая лаборатория для исследования слабых грунтов ПЛГ-1РМ конструкции А.С. Амаряна (рис. 18).

Лаборатория предназначена для испытания слабых грунтов различными полевыми методами до глубины 15 м с отбором образцов нарушенной и ненарушенной структуры. Комплекс приборов и задавливающая установка полевой лаборатории обеспечивают выполнение технологических операций по вращательному срезу, статическому и динамическому зондированию грунтов, прессиометрическим испытаниям, отбору монолитов и образцов и определению бокового трения зонда о грунт. Конструкция и компоновка приборов лаборатории позволяют использовать их автономно или совместно с задавливающей установкой. Благодаря малой массе приборы можно переносить вручную в сложных условиях районов изысканий.

Техническая характеристика полевой лаборатории ПЛГ-1РМ

Энергия двигателя, кДж	3
Максимальное усилие задавливания, кН	20
Диаметр лопасти винтовой сваи, мм	160
Масса молота для динамического зондирования, кг	30, 60
Высота падения молота, мм	400
Число ударов молота в 1 мин	17, 34
Максимальный крутящий момент, кН·см	15
Крыльчатки для испытаний вращательным срезом:	
диаметр, мм	60; 75; 100
высота, мм	120; 150; 200
Площадь основания конуса, см ²	10; 20; 40
Диаметр штанги, мм	22; 36
Габаритные размеры, мм	1995x750x525
Масса, кг	около 80

Выбор и назначение полевых методов испытаний производят согласно СНиП II-9-78. Методы полевых испытаний слабых грунтов, область их применения и особенности испытаний указаны в табл. 22.

Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов монолитов грунтов, в том числе и слабых, производится согласно ГОСТ 12071-84. Отбор слабых грунтов нарушенного сложения производится с помощью торфяного бура ТБ-5 (см. рис. 17) или другими пробоотборниками, например грунтоносом конструкции Игумнова или Фурса. Для отбора монолитов торфов и других болотных отложений применяют универсальный грунтонос конструкции ЦНИИИСа. Для отбора проб слабых грунтов используют также поршневой грунтонос конструкции БелдорНИИ.

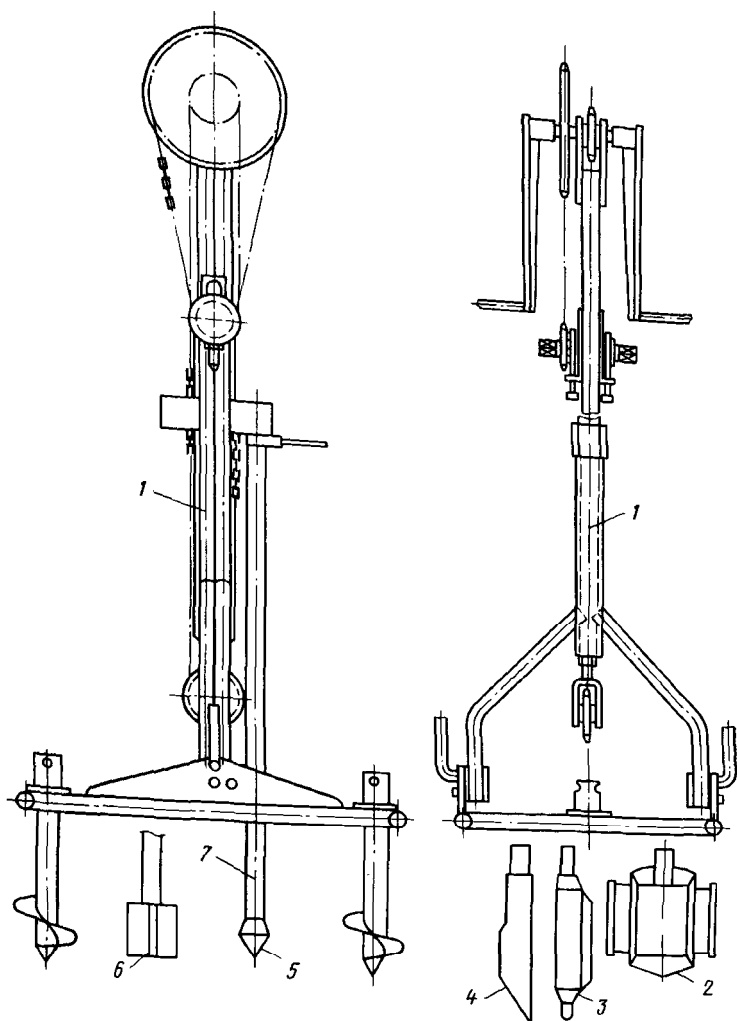


Рис. 18. Полевая лаборатория ПЛГ-1РМ конструкции Л.С. Амаряна
 1 – задавливающая установка УЗП-7; 2 – лопастной прессиомер ЛП-12;
 3 – горфяной бур ТБ-6; 4 – лопастной грунтонос ЛГ-5; 5 – зондовый
 пенетrometer П-5; 6 – сдвигомер-крыльчатка СК-10; 7 – совмещенные
 штанги 36/22

Т а б л и ц а 22. Методы полевых испытаний слабых грунтов

Методы испытания	Область применения (при глубине испытаний до 20 м)	Определяемые показатели	Особенности проведения испытаний
Статическое зондирование	Все виды слабых грунтов с содержанием включений крупнообломочного материала до 25%	Сопротивление грунта конусу зонда $p_{ск}$; сопротивление грунта по боковой поверхности зонда $p_{сб}$	При зондировании торфов, илов и сапропелей применяется облегченное переносное оборудование и конусные наконечники площадью сечения до 70–100 см ²
Динамическое зондирование	То же, до 40%	Условное динамическое сопротивление, p_d	При исследовании чрезвычайно слабых грунтов допускается снизить массу молота до 10–20 кг, а высоту падения до 30 см
Испытания статическими нагрузками на штампы	Все виды слабых грунтов	Модуль общей деформации E	Нагружение осуществляется ступенями нагрузки (0,1–0,2) 10^5 Па со стабилизацией осадок 0,2 мм за 2 ч. При испытании грунтов выше уровня грунтовых вод используют штампы площадью 5000–10 000 см ² , а ниже – 600 см ²
Вращательный срез	Торфы, илы и глинистые грунты с консистенцией $B > 0,25$ и содержанием крупнообломочных включений размером до 10 мм в количестве не более 15%	Сопротивление сдвигу грунта непарушенного и парушенного сложения	Торфы, илы и сапропели испытывают без трюх опки скважин с использованием большой и средней крыльчатки. Остальные грунты испытываются с забой скважины малой и средней крыльчатками

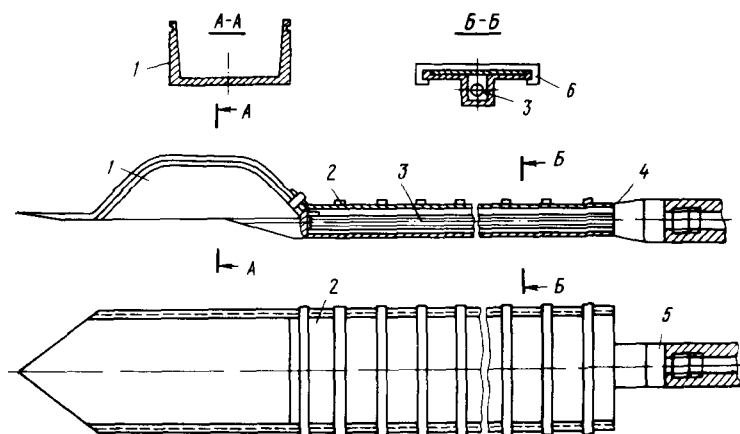


Рис. 19. Лопастной грунтонос ЛГ-6 конструкции Л.С. Амаряна
1 — челюнок; 2 — лезвие; 3 — винт; 4 — гайка; 5 — штанга; 6 — скобы

Отбор образцов водонасыщенных очень слабых грунтов ненарушенного сложения лучше всего производить грунтоносом ЛГ-6 (рис 19).

Образцы грунтов нарушенного сложения, требующие сохранения природной влажности, укладывают в металлические коррозионно-стойкие или пластмассовые банки с герметически закрывающимися крышками. Образцы грунта нарушенного слоя сложения допускается упаковывать в мешочки из синтетической пленки. Вместе с образцом в тару вкладывается этикетка, завернутая в кальку и покрытая слоем парафина, такая же этикетка наклеивается на тару.

Монолиты, вынутые из грунтоноса и не помещенные в жесткую тару, парафинируются. До парафинирования на верхнюю поверхность монолита помещается этикетка, завернутая в кальку и покрытая парафином. Второй экземпляр этикетки, смоченный в расплавленном парафине, необходимо прикрепить сверху монолита и покрыть тонким слоем парафина. На монолите делают метку "верх". Монолиты, отобранные в жесткую тару, укладывают в этой же таре. Открытые торцы тары следует закрывать жесткими крышками с резиновыми прокладками, покрывать двойным слоем изоляционной ленты или заливать расплавленным парафином.

Образцы грунта, предназначенные для транспортирования, упаковываются в ящики. Монолиты укладываются в ящики плотно, свободные пространства между ними заполняются древесными опилками или стружками толщиной 3—4 см.

При транспортировании монолитов принимают меры, обеспечивающие их сохранность; исключаются сотрясение, промораживание и подсушка.

Образцы немерзлых грунтов, требующие сохранения природной влажности, хранят в помещениях или камерах с относительной влажностью 50—60% при температуре не ниже +2 и не выше +20°C. Сроки хранения монолитов не должны превышать 3 мес.

3.4. ПОЛЕВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛАБЫХ ГРУНТОВ

3.4.1. Испытания слабых грунтов статическими нагрузками (штампами) в шурфах и скважинах

Испытания статическими нагрузками (штампами) выполняют с целью определения модуля деформации грунтов. Для фундаментов с размерами, близкими к площади штампов, устанавливают предел пропорциональности, т.е. линейную зависимость осадки от нагрузки, предел несущей способности или устойчивости грунта. Испытания выполняют, согласно ГОСТ 12374—77, с учетом высокой сжимаемости слабых грунтов.

Инженерно-геологические условия строительной площадки изучают до начала испытаний по данным опорных скважин, шурфов и зондирования. Минимальная толщина испытываемого слоя грунта должна быть не менее 1,5–2 диаметров штампа. Не допускается производить испытания, если в пределах сжимаемой зоны под штампом отмечается резкое изменение показателей зондирования.

Слабые грунты, залегающие в зоне аэрации выше уровня грунтовых вод, испытывают в шурфах круглыми, жесткими, фильгующими штампами площадью 5000–10 000 см², а залегающие ниже уровня грунтовых вод — штампом площадью 600 см² в скважинах. Конструкции штампов и их характеристики приведены в ГОСТ 12347—77.

Для испытаний песчаных глинистых грунтов статическими нагрузками в шурфах и дудках на значительных глубинах применяют свайный штамп (рис. 20). Для испытания слабых грунтов в скважинах используют канатно-рычажную установку КРУ-600 (рис. 21).

Перед установкой штампа дно шурфа выравнивают с помощью ножа; при этом выступы срезают. В скважинах выравнивание забоя производят вращением специального устройства с зачистными ножами. Для обеспечения плотного прилегания штампа к забюю поверхность земли выравнивают подсыпкой мелкого или средней крупности песка слоем

5–10 мм. Осадку штампа с точностью 0,05 мм фиксируют двумя прогибомерами, которые крепят на струбинах к элементам металлической реперной системы или другим неподвижным конструкциям с противоположных сторон штампа. Реперная система состоит из коротких металлических сваек диаметром 8–10 см или винтовых сваек с диаметром лопасти 20 см, забиваемых или завинчиваемых на глубину не менее 1 м с противоположных сторон выработки, и присоединенных к ним металлических ригелей, к ко-

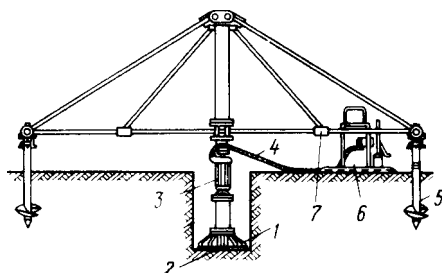


Рис. 20. Свайный штамп для испытания песчаных и глинистых грунтов статическими нагрузками в шурфах и дудках на значительных глубинах

1 — штамп; 2 — плита; 3 — нажимной домкрат; 4 — гибкий рукав; 5 — винтовая свая; 6 — насосная станция; 7 — упорная разборная ферма грузоподъемностью 25 т

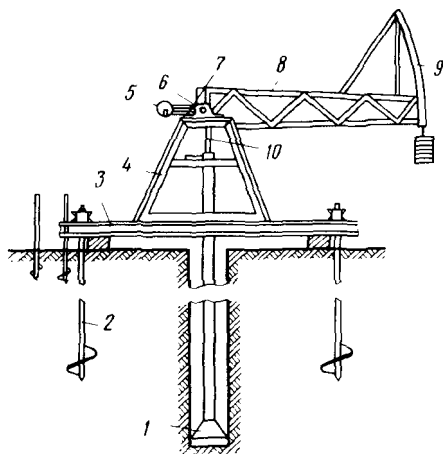


Рис. 21. Канатно-рычажная установка КРУ-600

1 — штамп; 2 — анкер; 3 — опорные балки; 4 — рама; 5 — противовес; 6 — подшипник с осью и двойным блоком; 7 — траверса с канатами; 8 — рычаг; 9 — сегмент грузовой; 10 — штанга

торым крепятся прогибометры; сваики располагают на расстоянии 1,5–2 м от краев выработки в местах, свободных от анкерных свай или опор загрузочной платформы, ригели — на расстоянии от центра штампа, примерно равном радиусу штампа, и на высоте 0,5–1 м.

Испытания начинают с предварительного уплотнения грунта нагрузкой, равной природному давлению грунта на отметке подошвы штампа, но не менее величины первой ступени нагрузки. Предварительное уплотнение грунта и последующую загрузку штампа производят ступенями удельных нагрузок по (0,1 – 0,25) 10^5 Па — для слабых песчано-глинистых грунтов и по (0,05 – 0,1) 10^5 Па — для торфов и сфагнопелей.

Каждую ступень нагрузки выдерживают до условной стабилизации осадки, но не менее 4 ч, при этом длительность выдержки каждой последующей ступени нагружения должна быть не менее длительности предыдущей. За предел условной стабилизации осадки принимается скорость осадки, равная 0,05 мм/ч.

Расчет модуля общей деформации грунта $E \cdot 10^5$, Па, выполняют для прямолинейного участка зависимости осадки штампа от удельной нагрузки по формуле

$$E = (1 - \mu^2) \omega d \frac{\Delta p}{\Delta S}, \quad (5)$$

где μ — коэффициент Пуассона, равный 0,55 — при $p = (0,1 \div 0,5) 10^5$ Па; 0,2 — при $p = (0,5 \div 1) 10^5$ Па и 0,4 — при $p = (1 \div 2) 10^5$ Па; ω — безразмерный коэффициент, зависящий от жесткости и формы штампа, принимаемый для штампов круглой формы равным 0,8; d — диаметр круглого штампа, см; Δp — приращение давления на прямолинейном участке зависимости осадки от удельной нагрузки, 10^5 Па; ΔS — приращение осадки штампа, соответствующее приращению давления на прямолинейном участке зависимости осадки от удельной нагрузки, см.

Сопоставление результатов полевых $E_{\text{пол}}$ (штампами площадью 370–750 см²) и лабораторных $E_{\text{лаб}}$ (компрессионных) определений модулей деформации показало, что $E_{\text{пол}} = E_{\text{лаб}}$.

Изменение площади штампа 370–750 см² существенного влияния на результаты определения модулей деформации слабых грунтов не оказывает. Однако при испытаниях, выполненных круглыми штампами площадью 5000 см², получены более высокие значения $E_{\text{пол}}$, что отвечает современным теоретическим представлениям. В песках рыхло-

го сложения значительные осадки штампа периодически приводят к полному или частичному разрушению уплотненного ядра, что не способствует развитию зон пластических деформаций и не может привести к потере устойчивости. Полученные экспериментально данные подтверждают рекомендации В.Г. Березанцева о расчете основания на рыхлых песках только по деформациям — по допустимой осадке фундамента. Достижение предела пропорциональности в процессе опыта обычно не фиксируется и расчет по первому предельному состоянию не может быть применен. На результаты испытаний влияют применяемые критерии условной стабилизации осадки и размеры штампа.

В практике штамповых испытаний за условный критерий затухания осадок принимают скорость деформирования, равную $0,01 \text{ см/ч}$ за последний час наблюдений. Однако исследования показали, что большая часть деформаций рыхлых песков происходит мгновенно после приложения нагрузок вследствие их уплотнения. Дальнейшее приращение осадки во времени проявляется слабо. Например, при испытании рыхлых песков штампами площадью 2500 и 5000 см^2 до нагрузки 150 кПа мгновенные деформации составляли до 91% полной осадки за ступень.

Максимальные ошибки при определении модуля деформации, связанные с неполной стабилизацией осадки, в случае применения ускоренной методики испытаний в рыхлых песках составляют $1-2\%$. Это позволяет рекомендовать ускоренную методику испытаний для производственного использования. Ускоренная методика отличается более высоким темпом нагружения штампа. За условную стабилизацию в этом случае принимается скорость осадки $0,03 \text{ см/ч}$, или $0,1 \text{ мм}$ за 20 мин .

3.4.2. Исследования слабых грунтов методом статического зондирования

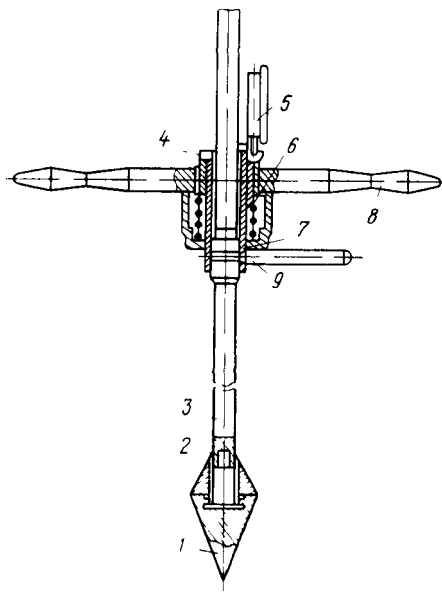
Статическое и динамическое зондирование выполняют с соблюдением требований СН 448-72 ("Указания по зондированию грунтов для строительства") и учетом специфических свойств слабых грунтов.

Статическое зондирование в сочетании с другими видами инженерно-геологических исследований слабых грунтов применяют при решении следующих задач: выделение инженерно-геологических элементов; определение мощности и границ распространения слабых грунтов различного состава; выявление однородных толщ слабых грунтов по площади и глубине; определение глубины залегания кровли подстилающих более плотных песчаных, глинистых, крупнообломочных или скальных грунтов; приближенная оценка плотности, сопротивления сдвигу, несущей способности и модуля деформации, определение сопротивления слабого грунта под острием сваи и по ее боковой поверхности; определение степени уплотнения и упрочнения во времени искусственно сложенных насыпных и намывных грунтов.

При использовании ручных пенетрометров П-4 конструкции Л.С. Амаряна (рис. 22) область применения статического зондирования ограничивается удельным давлением на грунт $(30 \div 50) \cdot 10^5 \text{ Па}$. Задавливание зонда вручную допускается лишь при нагрузке на конус не более $20 \cdot 10^5 \text{ Па}$. При необходимости создания давления на грунт свыше $20 \cdot 10^5 \text{ Па}$ статическое зондирование осуществляется с помощью задавливающих установок УЗП-6.

Рис. 22. Пенетрометр П-4

1 — конусный наконечник; 2 — стержень; 3 — штанга; 4 — упор; 5 — индикатор; 6 — упругая пружина; 7 — направляющая втулка; 8 — рукоятка; 9 — винт



Скорость зондирования должна по возможности сохраняться постоянной в пределах 0,5–1,5 м/мин. В журнале зондирования периодически через 20 см, а при резкой изменчивости свойств грунтов через 10 см по показаниям приборов измерительной аппаратуры регистрируются показатели сопротивления грунта. При использовании совмещенных штанг и измерительной головки П-5А результаты статического зондирования записываются автоматически на ленте барабана самопишущего прибора. Через каждый метр по глубине зондирования делается вынужденная краткая остановка для наращивания штанг.

Результаты статического зондирования оформляются в виде совмещенных графиков изменения по глубине удельного сопротивления грунта конусу зонда q и сопротивления грунта по боковой поверхности зонда Q_b или удельного сопротивления грунта по боковой поверхности зонда $f_{бок}$.

Расчет удельного сопротивления грунта q , Па, при статическом зондировании ведется по формуле

$$q = P/F, \quad (6)$$

где P — усилие задавливания зонда; F — площадь наибольшего поперечного сечения конуса.

При отсутствии или незначительной величине сил трения по боковой поверхности, что наблюдается в чрезвычайно слабых грунтах до глубины 4–5 м, трением по боковой поверхности зонда можно пренебречь. Однако обычно при производстве испытаний трение по боковой поверхности определяют. Для этого в процессе зондирования через каждые 40 см зонд приподнимают на 7–10 см. Благодаря специальному теле-

скопическому устройству штанги отключаются, оставляя конус на забое. Затем осуществляется повторное задавливание штанг с фиксацией усилия трения.

Для более точного определения сопротивления грунта по боковой поверхности в грунт задавливают одни штанги без конусного наконечника, который заменяют конусной пробкой. В этом случае расчеты ведут по формулам:

$$q = (P - P_{\text{ш}}) / (F - F_{\text{ш}}); \quad (7)$$

$$Q_6 = 0,5 [(P + P_{\text{ш}}) - q (F + F_{\text{ш}})], \quad (8)$$

где $P_{\text{ш}}$ — усилие задавливания одних штанг; $F_{\text{ш}}$ — площадь поперечного сечения штанг.

Параметры наконечников существенного влияния на результаты зондирования не оказывают. При использовании конусов площадью основания 10, 40, 70 и 100 см² получены сходные значения удельных лобовых сопротивлений. Вместе с тем отмечена несколько большая стабильность результатов испытаний, выполненных конусами большего диаметра. Конусы маленького диаметра в чрезвычайно слабых грунтах менее чувствительны и нередко "проваливаются" в грунт, что, конечно, недопустимо. Диаметры наконечников следует выбирать с таким расчетом, чтобы они были невелики по размерам, но в то же время ни в коем случае "не проваливались" в грунт и оставались неизменными на всю глубину зондирования.

Лобовое сопротивление грунта внедрению конуса и его сопротивление по боковой поверхности зонда является комплексной характеристикой, на значение которой влияют следующие факторы: плотность и влажность грунта, его механический состав, физико-химические особенности, параметры оборудования и методика испытаний. Поэтому результаты статического зондирования плохо коррелируются с такими показателями, как плотность, влажность, сцепление и угол внутреннего трения, но довольно хорошо согласуются с другими показателями, характеризующими прочность и деформируемость слабых грунтов. Например, выявлена тесная прямая связь между лобовым сопротивлением при статическом зондировании q и сопротивлением сдвигу τ по результатам испытания грунтов методом вращательного среза, имеющая вид:

$$\tau = 0,1 q; \quad q = 10\tau \text{ при } q < 0,6. \quad (9)$$

Удовлетворительно согласуются с данными статического зондирования результаты определения модулей деформации грунтов штампами и значения нормативных давлений на грунт, рассчитанные по СНиП II-15-74 (R_1^H) и "Временным рекомендациям по проектированию основания сооружений на заторфованных территориях Тюменской области (R_2^H), т.е.

$$R_1^H = 1,1 q \text{ и } R_2^H = 0,31 q + 0,13. \quad (10)$$

По данным статического зондирования определяют угол внутреннего трения, плотность сложения песчаных грунтов (табл. 23), консистенцию (табл. 24), нормативные давления для глинистых грунтов и модуль деформации (табл. 25).

Т а б л и ц а 23. Зависимость плотности сложения песчаных грунтов от показателя зондирования

Состав и состояние песков	Удельное сопротивление грунта конуса зонда $q \cdot 10^5$, Па	Плотность сложения
Крупные и средней крупности	≥ 50 < 50	Средней плотности Рыхлые
Мелкие	≥ 40 < 40	Средней плотности Рыхлые
Пылеватые маловлажные	≥ 30 < 30	Средней плотности Рыхлые
Пылеватые водонасыщенные	≥ 20 < 20	Средней плотности Рыхлые

Т а б л и ц а 24. Зависимость консистенции глинистых грунтов от показателя зондирования

Удельное сопротивление грунта конусу зонда $q \cdot 10^5$, Па	Консистенция глинистых грунтов
25–35	Полутвердая
15–25	Тугопластичная
10–15	Мягкопластичная
5–10	Текучепластичная
< 5	Текучая

Т а б л и ц а 25. Зависимость модуля деформации грунтов от удельного сопротивления грунта конусу зонда $q \cdot 10^5$, Па

Грунты	Модуль деформации $E \cdot 10^5$, Па
Пески	$3q$
Глины и суглинки	$7q$
Торф	$0,37q$

Значения угла внутреннего трения φ для песков крупных, средней крупности и мелких зависят от удельного сопротивления грунта конусу зонда q следующим образом:

$q \cdot 10^5$, Па	5	10	20	40	70
φ , град	24	26	28	30	32

Значения нормативных давлений на глинистые грунты R^H , по данным зондирования:

$q \cdot 10^5$ Па	2	5	10	20	30
$R^H \cdot 10^5$ Па	0,3	0,6	1,2	2,2	3,1

Если испытания грунтов методом статического зондирования производятся с использованием комплекта совмещенных штанг (ШТ-36/22), а в процессе испытаний фиксируется общее сопротивление зондированию

и сопротивление по боковой поверхности штанг, то это позволяет определять несущую способность свай. Интерпретацию результатов производят согласно СНиП П-Б. 5-79.

3.4.3. Исследования слабых грунтов методом динамического зондирования

Динамическое зондирование применяют при исследовании более прочных разновидностей слабых грунтов (например, пески, уплотненные прослойки песчано-глинистых отложений и грунты с содержанием крупнообломочного материала), а также в случаях, когда применение статического зондирования затруднительно или нецелесообразно (например, при исследовании грунтов с плавучих средств, где анкеровка с помощью свай невозможна).

Так как при динамическом зондировании ударное воздействие на грунт может меняться от 0,03 до 1,2 кДж, оно применяется для исследования чрезвычайно слабых, весьма слабых, слабых и более прочных грунтов. Режим зондирования, определяемый массой и высотой падения молота, выбирается с таким расчетом, чтобы он по возможности сохранялся постоянным на данной точке зондирования и на всем участке изысканий. Это облегчает обработку результатов испытаний и способствует получению стабильных данных.

При зондировании обычно используют съемные конусные наконечники с диаметром основания 7,4 см, площадью поперечного сечения 43 см² и углом при вершине 60°, а при исследовании чрезвычайно слабых грунтов допускается использовать наконечники сечением 70 и 100 см². Изменение параметров наконечника и режима зондирования существенного влияния на результаты динамического зондирования не оказывает.

В процессе зондирования необходимо постоянно контролировать вертикальность забивки зонда. Зондирование следует производить непрерывно до заданной глубины или резкого уменьшения величины погружения зонда (свыше 30 ударов за залог). Глубину погружения зонда определяют с точностью ±5 мм по рейке. Число ударов в залоге в зависимости от состава и состояния грунтов принимают от 1 до 20 ударов, исходя из средней глубины погружения зонда за залог на 10–20 см.

По окончании зондирования в журнале следует отразить характеристику усилий извлечения штанг ("легко", "с трудом", "с использованием домкрата или полиспаста").

Условное динамическое сопротивление p_D вычисляют по формуле

$$p_D = K\Phi \eta / h, \quad (11)$$

где K – коэффициент, учитывающий потери энергии при ударе; Π – коэффициент, учитывающий влияние параметров оборудования; Φ – коэффициент, учитывающий влияние трения штанг о грунт; η – число ударов в залоге; h – глубина погружения зонда за залог, см.

Коэффициент K определяется по формуле

$$K = (M_M + e^2 M_3) / (M_M + M_3), \quad (12)$$

где M_M — масса молота, кг; M_3 — масса зонда, кг; e — коэффициент, учитывающий упругий характер удара молота и зонда, равный 0,56.

Коэффициент Π вычисляется по формуле

$$\Pi = (M_M H) / F, \quad (13)$$

где H — высота падения молота, см; F — площадь основания конуса, см².

Коэффициент Φ определяется по данным двух параллельных сопоставительных испытаний, в одном из которых зондирование должно проводиться в разбуриваемой по интервалам скважине или приниматься по результатам испытаний, выполненных в сходных инженерно-геологических условиях. При незначительной величине сил трения по боковой поверхности штанг значение коэффициента Φ принимается равным 1.

Результаты динамического зондирования оформляют в виде непрерывного ступенчатого графика изменения по глубине значений условного динамического сопротивления R_d с последующим осреднением графика и вычислением средневзвешенных показателей зондирования для каждого инженерно-геологического элемента.

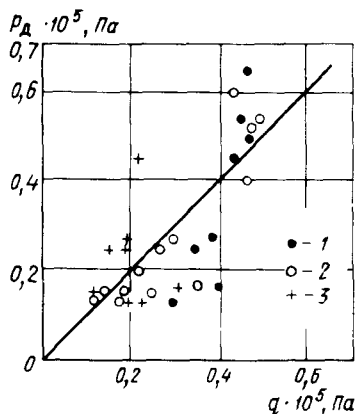
Прямые сопоставления показателей динамического и статического зондирования, выполненных ранее применительно к песчаным грунтам различного состава и генезиса, выявили наличие достаточно тесных корреляционных зависимостей между условным динамическим сопротивлением и лобовым сопротивлением под конусом зонда при статическом зондировании.

Такая же зависимость установлена А.Я. Рубинштейном (1976 г.) при сопоставлении результатов статического и динамического зондирования лессовидных суглинков Одесской области, аллювиальных, лиманно-морских и песчано-глинистых отложений Краснодарского края и морских глин Азербайджанской ССР, т.е. практически для всех наиболее широко распространенных песчано-глинистых грунтов, в том числе и самых слабых (рис. 23).

Эффективность исследования слабых водонасыщенных грунтов с помощью динамического зондирования изучена В.А. Ларюковым (1971 г.), В.Д. Шитовым (1976 г.) и др. Ими показано, что с помощью динамического зондирования по найденным корреляционным зависимостям можно определять не только консистенцию слабых водонасыщенных илистых грунтов, но и сцепление, угол внутреннего трения и коэффициент относительной сжимаемости. Илистые грунты Сиваша, на которых проводилось зондирование, не являются исключением. То же самое можно сказать и о других разновидностях слабых грунтов. Опасения относительно возможности "разжижения" слабых водонасыщенных грунтов в процессе динамического зондирования оказались преувеличенными. Эти исследования позволяют ставить вопрос об отмене ограничений СН 448-72 в части применения динамического зондирования при испытании пылеватых водонасыщенных песков и глинистых грунтов мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции.

Специальные исследования ударного способа возбуждения упругих колебаний грунтов, способных вызвать их "разжижение", проведенные М.Б. Шнейерсоном и Г.Н. Головиным (1974 г.), показали, что интенсивность упругих колебаний грунтов при динамическом ударе определяет-

Рис. 23. Зависимость условного динамического сопротивления R_d от лобового сопротивления конусу q
 1 и 2 — пески соответственно плотного и рыхлого сложения; 3 — глинистые грунты (по материалам ПНИИСа, пос. Красное Рязанской обл.)



ся не только массой и скоростью погружения ударника, но также и удельным давлением на грунт. Эти выводы подтверждаются исследованиями А.Я. Рубинштейна и И.Г. Минделя [15]. Ими экспериментально показано существование зоны критических значений удельных нагрузок, при которых амплитуда колебаний достигает максимума.

Значения этих удельных нагрузок достаточно малы и изменяются в зависимости от состава грунтов: $(0,15 \div 0,5) \cdot 10^5$ Па — для пылеватых песков и $(0,05 \div 0,2) \cdot 10^5$ Па — для суглинков. Ниже и выше этого интервала амплитуды колебаний резко снижались. Физическая сущность этого явления заключается в том, что при очень малых удельных нагрузках, значительно меньших предела упругости грунта, деформации грунта малы и недостаточны для образования интенсивных волновых колебаний. При давлениях, значительно превышающих предел упругости грунта, большая часть энергии груза расходуется на образование неупругих деформаций. И только в некотором узком интервале нагрузок, близких по величине пределу упругости грунта, достигается наибольший сейсмический эффект, вызывающий "разжижение" грунтов. Остаточные деформации при этом отсутствуют или бывают весьма малы. Это обстоятельство подтверждается тем, что при достижении наибольших значений амплитуды колебаний при ударе погружение конуса в грунт было минимальным. И наоборот, значительные осадки конуса до 5–6 см фиксировались при увеличении удельных давлений, когда отмечалось значительное уменьшение амплитуды упругих колебаний. Выяснилось, что при обеспечении оптимального режима зондирования возможность проявления неблагоприятных явлений, связанных с разжижением водонасыщенных грунтов, уменьшается.

Скорость внедрения зонда и удельное давление на грунт при динамическом зондировании можно в определенной степени регулировать, изменяя режим зондирования или параметры оборудования, поэтому динамическое зондирование можно эффективно использовать в самых слабых грунтах. При этом необходимо выполнять следующие правила производства испытаний.

1. Испытания следует проводить с помощью легкого оборудования (масса ударного молота 30 кг, высота падения 40 см, диаметр конусного наконечника зонда 7,4 см).

2. Скорость внедрения зонда должна быть от 3–5 до 25–30 см за удар; при меньшей скорости возможно возникновение "разжижения", а при большей теряется точность определения удельного динамического зондирования.

3. Удельное статическое давление на грунт от веса оборудования не должно превышать 10–15% удельного динамического сопротивления. Для легкого оборудования при массе молота 30 кг и площади поперечного сечения конуса 42 см² удельное статическое давление изменяется в пределах 0,08–0,14 МПа. Следовательно, легкое оборудование можно применять в грунтах с удельным динамическим сопротивлением выше 0,8–1,5 МПа.

4. При испытании очень слабых грунтов площадь конуса следует увеличивать до 100–200 см², массу молота снижать до 10–20 кг, использовать более легкие штанги, если этого окажется недостаточно, то применять противовесы, снижающие или полностью исключаящие давление на грунт от действия собственного веса оборудования.

5. Коэффициент учета трения штанг о грунт Φ при расчете удельного динамического сопротивления может быть принят равным единице, так как при использовании зондов с уширенными наконечниками трение штанг о грунт бывает очень мало.

При зондировании слабых грунтов подскока молота при ударе, как правило, не наблюдается, что свидетельствует о неупругом характере удара ($e = 0$), поэтому значения коэффициента K для учета потерь энергии при ударе следует рассчитывать по формуле

$$K = M_M / (M_M + \Sigma M_3) . \quad (14)$$

По результатам динамического зондирования определяют плотность сложения песков (табл. 26), угол внутреннего трения песков (табл. 27), динамическую устойчивость водонасыщенных песков (табл. 28), модуль деформации песчаных грунтов (табл. 29) и нормативное давление на глинистые грунты.

Т а б л и ц а 26. Плотность сложения песков по результатам динамического зондирования

Сложение	Состав и состояние	$p_d \cdot 10^5, \text{Па}$	Плотность
В природном залегании	Крупные и средней крупности	> 35 ≤ 35	Рыхлые Средней плотности
	Мелкие мало-влажные	> 30 ≤ 30	Рыхлые Средней плотности
	Пылеватые, мало-влажные и мелкие водонасыщенные	> 30 ≤ 20	Рыхлые Средней плотности
Свеженамытые	Мелкие и средней крупности мало-влажные	> 35 ≤ 35	Рыхлые Средней плотности
	Мелкие и средней крупности	> 20 ≤ 20	Рыхлые Средней плотности

Таблица 27. Угол внутреннего трения песков φ

$p_d \cdot 10^5, \text{Па}$	Значения φ , град, для песков		
	крупных и средней крупности	мелких	пылеватых
10	27	26	24
20	30	28	26
35	33	30	28
70	36	33	30

Таблица 28. Динамическая устойчивость водонасыщенных песков

$p_d \cdot 10^5, \text{Па}$		Вероятность разжижения песков при динамических нагрузках
среднее	минимальное	
< 20	< 7	Большая (пески, рыхлого сложения)
20–35	7–14	Разжижение возможно (пески рыхлые или средней плотности)
35–50	14–20	Небольшая (пески средней плотности)
> 50	> 20	Разжижение песков практически невозможно (пески плотные и средней плотности)

Примечание. Оценка разжижаемости песков производится по средним значениям p_d . Учет минимальных значений повышает достоверность прогноза.

Таблица 29. Модуль деформации песчаных грунтов

$p_d \cdot 10^5, \text{Па}$	Модуль деформации $E \cdot 10^5, \text{Па}$, для песков		
	крупных и средней крупности	мелких	пылеватых
10	140–110	90	50
20	200–160	130	80
35	260–210	190	130
70	390–340	290	220

Модуль деформации для суглинков и глин равен $E = 6p_d \cdot 10^5, \text{Па}$.

Нормативное давление на глинистые грунты R^H зависит от условного динамического сопротивления p_d :

$p_d \cdot 10^5, \text{Па}$	2	5	10	20	30	40
$R^H \cdot 10^5, \text{Па}$	0,4	0,6	1,0	1,8	2,5	3,2

3.4.5. Испытание слабых грунтов в условиях природного залегания приборами попастного типа

Испытания слабых грунтов на срез в скважинах и в массиве выполняют по ГОСТ 21719–80, которым установлена методика определения угла внутреннего трения, удельного сцепления, а также показателя структур-

ной прочности грунта при срезе, характера пространственной изменчивости и сопротивления срезу. Этот нормативный документ распространяется на песчаные и глинистые грунты, а также илы, торфы, заторфованные и другие виды слабых грунтов. Метод вращательного среза следует применять для определения сцепления глинистых грунтов текучей консистенции и характера пространственной изменчивости. Этим методом испытывают глинистые грунты, залегающие ниже забоя опытной скважины, с показателем консистенции $I_L > 0,5$, а в массиве — с $I_L > 1$.

Методы кольцевого и поступательного среза следует применять для определения сцепления и угла внутреннего трения глинистых грунтов с показателем консистенции $0 \leq I_L \leq 0,75$, находящихся в условиях естественного залегания в опытных скважинах выше уровня грунтовых вод, а также песков крупных, средней крупности, мелких и пылеватых, средней плотности и рыхлых маловлажных и влажных.

Сущность метода вращательного среза заключается в измерении крутящих моментов, затрачиваемых на определение сопротивления грунта срезу с помощью рабочего наконечника в виде крестообразной крыльчатки. Методом вращательного среза определяют: сопротивление грунтов сдвигу в ненарушенном состоянии; показатель структурной прочности или чувствительность грунтов, однородность грунтов по площади и глубине. При этом производят сравнительную оценку состояния и свойств грунтов.

Параметры крыльчаток, применяемые при испытаниях, приведены в табл. 30.

Т а б л и ц а 30. Крыльчатки и их размеры

Крыльчатки	Параметры крыльчатки, мм			Постоянная B , см ³
	высота	диаметр	толщина лопастей	
Малая	120	60	2	791
Средняя	150	75	3	1545
Большая	200	100	4	3663

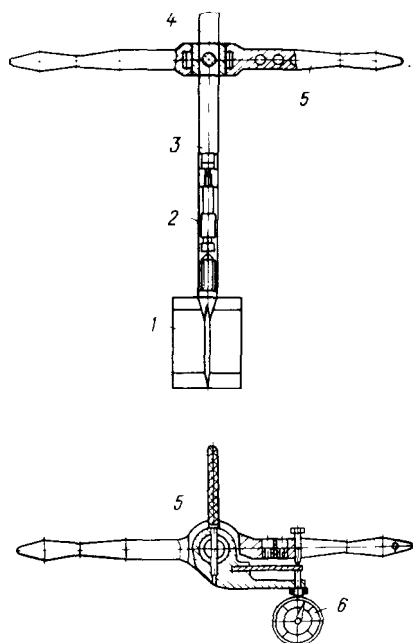
Размеры крыльчатки на значения сопротивления грунта сдвигу влияют незначительно. Специальные исследования показали, что при изменении диаметра крыльчатки с 75 до 150 мм и высоты с 31 до 200 мм постоянная B изменялась в пределах 500–8800. Конечные результаты определения сопротивления сдвигу изменяются незначительно и находятся в пределах ошибки парных измерений, обусловленных неоднородностью грунта и погрешностью самих измерений. Однако при больших размерах наконечников отмечается более высокая стабильность результатов, поэтому при прочих равных условиях следует отдавать предпочтение наконечникам больших размеров, хотя в более плотных грунтах приходится использовать наконечники малых размеров из-за того, что большие крыльчатки создают слишком большие крутящие моменты, превышающие для данных установок предельно допустимые нагрузки.

Для массовых испытаний при зондировании торфяных залежей, пластов сапропелей и илов рекомендуется использовать сдвигомер-крыльчатку СК-8 конструкции Л.С. Амаряна (рис. 24), крыльчатки конструкции БелдорНИИ, ЦНИИС и др.

Методика испытаний грунтов с помощью крыльчатки заключается в следующем. Глинистые грунты мягко- и тугопластичной консистенции испытывают с забоя лидирующей скважины малой и средней крыльчатками. Илы, сапропели, торфы, глинистые грунты текучей и текучепластичной консистенции, в которые можно сравнительно легко вдавливать крыльчатку до требуемой глубины, целесообразно испытывать средней и большой крыльчатками. Лидирующую скважину проходят вращательным или одноударным способом. При необходимости ее стенки удерживают обсадными трубами. Забой скважины располагают в слабых грунтах на 0,5 м выше глубины планируемого испытания.

Рис. 24. Сдвигомер СК-8

1 — крыльчатка; 2 — устройство учета трения штанг; 3 и 4 — штанги, соединенные резьбовыми переходниками; 5 — измерительная головка с рукояткой; 6 — индикатор часового типа



Подготовленную колонну штанг с надетыми на них центрирующими шайбами и крыльчаткой общей длиной на 0,5–0,8 м больше глубины испытания опускают на забой скважины, вдавливают в грунт и поддерживают на заданном уровне, а затем соединяют с переходником головки установки, укрепленной на станине или опорах.

При испытании с поверхности (без лидирующей скважины) крыльчатку вертикально вдавливают, применяя в случае необходимости рычаги или домкраты. По мере погружения крыльчатки колонну штанг постепенно наращивают и плавно вдавливают до требуемой глубины.

В ходе испытаний вращением с угловой скоростью 0,2 град/с определяют максимальный крутящий момент $M_{\text{макс}}$, отвечающий природной прочности грунта ненарушенного сложения, и установившийся момент $M_{\text{уст}}$, соответствующий прочности того же грунта после нарушения в нем структурных связей. Для получения значения $M_{\text{уст}}$ совершают два-три полных оборота крыльчатки с угловой скоростью 2–3 град/с, а затем полный оборот со скоростью 0,2 град/с.

При испытаниях без проходки скважины для учета влияния трения о грунт штанг и стержня крыльчатки на ту же глубину погружают колонну штанг со стволом рабочего наконечника, но без лопастей и определяют значения $M_{\text{макс}}^o$ и $M_{\text{уст}}^o$.

Сопротивление грунта сдвигу вычисляют на основании исходных данных по формулам:

для грунта природного сложения

$$\tau_{\text{макс}} = \frac{M_{\text{макс}} - M_{\text{макс}}^0}{B} ; \quad (15)$$

для грунта нарушенного сложения

$$\tau_{\text{уст}} = \frac{M_{\text{уст}} - M_{\text{уст}}^0}{B} . \quad (16)$$

Отношение $\tau_{\text{макс}}/\tau_{\text{уст}}$ характеризует чувствительность грунтов, по которой они разделяются: на малочувствительные (чувствительность 1–2); чувствительные (чувствительность 2–5); высокочувствительные (чувствительность > 5).

В илах, сапропелях с влажностью 200%, малоразложившихся торфах с влажностью более 900%, глинистых грунтах текучепластичной и текучей консистенции сопротивление сдвигу равно сцеплению $\tau_{\text{макс}} = c$.

По результатам испытаний строят графики изменения сопротивления грунтов сдвигу по глубине. Данные испытаний вращательным срезом различных разновидностей слабых грунтов обычно хорошо согласуются с графиками статического и динамического зондирования (рис. 25). Данные испытаний, проводившихся двумя различными установками — УИГС ЦНИИС-2 и СК-10, оказались сходными.

Выявлена довольно тесная прямая зависимость между $\tau = \tau_{\text{макс}} - \tau_{\text{уст}}$, полученной по данным полевых испытаний и сцеплением грунтов c , определенным по результатам лабораторных сдвиговых испытаний:

$$c = 0,7 \tau . \quad (17)$$

При исследовании методом вращательного среза грунтов, не обладающих сцеплением (например, свеженамытые рыхлые пески и супеси), угол внутреннего трения можно определять по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \tau / \sigma_0 , \quad (18)$$

где σ_0 — нормальное природное (бытовое) давление (рис. 26).

Бытовое давление от действия веса вышерасположенных слоев в водонасыщенных грунтах определяется с учетом взвешивающего влияния воды по формуле

$$\sigma_0 = h_1 (\rho_{\text{г}} - \rho_{\text{в}}) + (h - h_1) \rho_{\text{г}} , \quad (19)$$

где h_1 — высота стояния уровня грунтовых вод над точкой исследования; h — глубина исследования; $\rho_{\text{г}}, \rho_{\text{в}}$ — плотность соответственно грунта и воды.

3.4.6. Испытания слабых водонасыщенных грунтов методом прессиометрии

В настоящее время широко распространено определение модуля деформации различных грунтов по результатам прессиометрических испытаний в соответствии с ГОСТ 20276–74. Однако испытания слабых

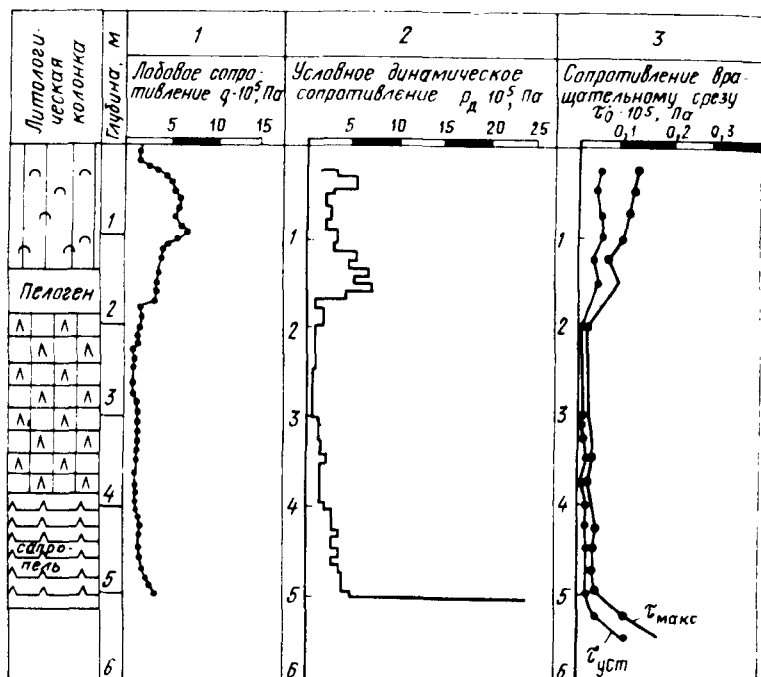


Рис. 25. Графики полевых испытаний слабых грунтов оз. Жихарика Вологодской области методами статического зондирования (1) и динамического зондирования (2), а также вращательного среза (3)

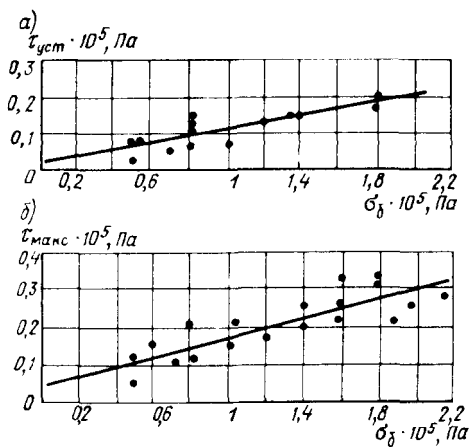


Рис. 26. Зависимость сопротивления сдвигу $\tau_{уст}$ — а и $\tau_{макс}$ — б от бытового давления $\sigma_{ср}$ для намываемых мелкозернистых песков по данным вращательного среза крыльчаткой СК-10

водонасыщенных грунтов круглыми перссиометрами с резиновой оболочкой весьма затруднены или практически неосуществимы из-за невозможности сохранения ненарушенной структуры грунта в стенках пробуриваемых скважин, ограниченного диапазона расширения рабочей камеры прессиометра при большой сжимаемости слабых грунтов, трудности извлечения прессиометров после проведения испытаний и другим

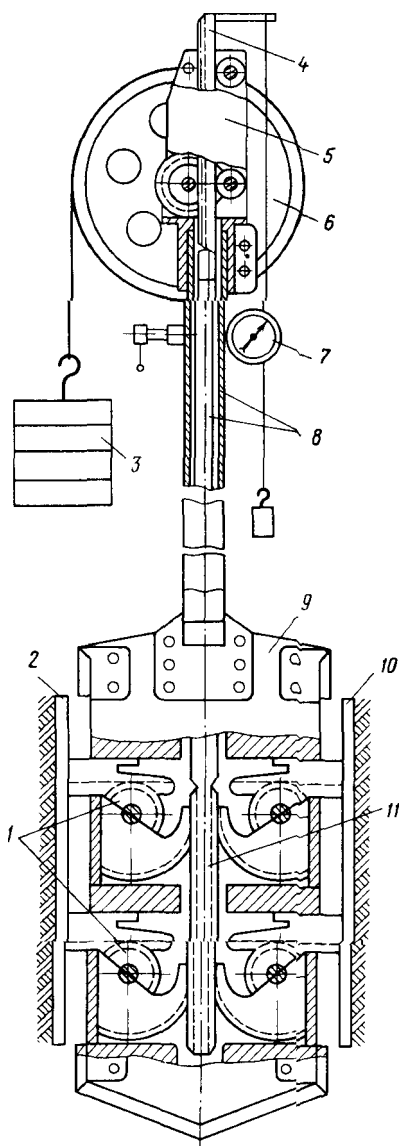


Рис. 27. Прессиометр ЛП-12 для испытаний слабых грунтов
 1 — шестерни; 2 — штамп; 3 — груз;
 4 — рейка; 5 — нагрузочное устройство; 6 — штурвал; 7 — прогибомер;
 8 — штанги; 9 — корпус; 10 — штамп;
 11 — рейка

причинам, поэтому для прессиометрических испытаний слабых грунтов целесообразно использовать лопастной механический прессиометр с жесткими штампами прямоугольной формы ЛП-12М, разработанный коллективом сотрудников ПНИИИСа под руководством Л.С. Амаряна (рис. 27).

Прессиометр ЛП-12М предназначен для проведения инженерно-геологических изысканий слабых органо-минеральных и нескальных минеральных грунтов на акватории и на суше в сложных геологических и суровых природно-климатических условиях и позволяет определять как деформационные, так и прочностные характеристики пород по глубине грунтового массива. Прессиометр представляет собой стальной корпус двутаврового сечения с двумя выдвижными штампами прямоугольной формы и цилиндрическим редуктором, состоящим из приводной рейки, находящейся в зацеплении с блок-шестернями, выдвигающими направляющие — рейки штампов. В комплект прессиометра входят совмещенные штанги (наружная диаметром 36 мм и внутренняя — 22 мм) со свинчивающейся резьбой и приводной рейкой, а также нагрузочное и измерительное приспособление.

Нагрузочное устройство состоит из крепящегося на наружной штанге цилиндрического редуктора, приводная шестерня которого вводится в зацепление с вытяжкой зубчатой рейкой внутренней штанги и штурвального диска с тросиком для подвески тарированных грузов. Измерительное приспособление представляет собой прогибомер 6-ПАО-ЛИСИ со стальной струной, крепящейся к штифту вытяжной рейки и натяжного груза.

Техническая характеристика прессиометра ЛП-12М

Тип прессиометра	механический
Рабочее давление под штампом, Па	$5 \cdot 10^5$
Площадь штампа, см ²	150x400
Число штампов	2
Рабочий ход штампа, мм	50
Глубина исследования, м	15–20
Габаритные размеры рабочего наконечника, мм	153x250x700
Масса рабочего наконечника, кг	25

Методика испытаний грунтов прессиометром ЛП-12М отличается от обычных стандартных испытаний, принятых по ГОСТ 20276–74, поэтому интерпретацию результатов испытаний грунтов с малой анизотропией производят по методике штамповых испытаний по ГОСТ 12374–77.

Модуль деформации грунтов определяют по величине бокового перемещения распорных штампов при нагрузке их ступенями давлений с выдержкой каждой ступени во времени до условной стабилизации осадки. За условную стабилизацию деформаций осадки принимают приращение бокового перемещения штампа, не превышающее 0,1 мм за время, указанное в табл. 31 и 32. Каждую ступень давления создают за 1–2 мин. Давление на штамп измеряют с точностью 10% величины ступени давления. Общее число ступеней давления $\sigma_{пр}$ после давления, соответствующего природному давлению на грунт σ_6 на глубине испытания, должно быть не менее четырех. Время выдержки каждой последующей ступени давления должно быть не менее времени выдержки предыдущей ступени. Измерение осадок производят с точностью 0,1 мм.

Т а б л и ц а 31. Значения ступеней давлений $\sigma_{пр}$ и времени условной стабилизации деформации t песков

Пески	Значения $\sigma_{пр} \cdot 10^5$, Па, при плотности сложения песков		Значение t , мин, песков	
	средней плотности	рыхлых	водонасыщенных	неводонасыщенных
Крупные	0,5	0,25	30	15
Средней крупности и мелкие	0,25	0,1	60	30

Т а б л и ц а 32. Значения ступеней давления $\sigma_{пр}$ и времени условной стабилизации деформаций t глин

Значения показателя консистенции I_L илистых грунтов	Значения $\sigma_{пр} \cdot 10^5$, Па, при коэффициенте пористости e		Значения t , ч, при коэффициенте e	
	$\leq 1,1$	$> 1,1$	$\leq 1,1$	$> 1,1$
$< 0,25$	1,0	0,5	1	2
$0,25-0,75$	0,5	0,25	2	3
$0,75-1$	0,25	0,1	2	3
> 1	0,25	0,1	3	4

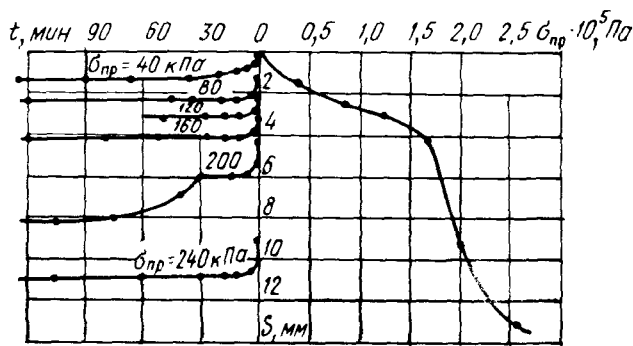


Рис. 28. Зависимость осадки S от удельного давления $\sigma_{пр}$ и времени выдержки под нагрузкой t при испытании тор-фа на глубине 2,1 м прессиометром ЛП-12М в районе пос. Радченко Калининской области

По результатам испытаний строят зависимости деформации грунта от удельного давления $S = f(\sigma_{пр})$ и изменения деформации грунта во времени по ступеням нагрузки $S = f(t)$ — рис. 28.

Модуль деформации грунта высчитывают для прямолинейного участка правой части графика $S = f(\sigma_{пр})$ по формуле

$$E = (1 - \mu^2) \omega b \frac{\Delta \sigma_{пр}}{\Delta S}, \quad (20)$$

где μ — коэффициент Пуассона, принимаемый по табл. 32; ω — коэффициент формы штампа, принимаемый по табл. 33; b — ширина или диаметр штампа, см; $\Delta \sigma_{пр}$ — приращение давления на грунт под штампом, равное разности $\sigma_{пр л} - \sigma_{пр о}$; ΔS — приращение осадки штампа, соответствующее $\Delta \sigma_{пр}$, определяемое на осредненной прямой, см.

Прессиометр ЛП-12М позволяет изучать прочностные свойства грунтового массива. С этой целью штампы рабочего наконечника прессиометра по всей поверхности оснащены поперечными зубчатыми выступами. Длина выступов 150 мм, высота 5 мм, шаг между выступами 10 мм, число выступов на штампе 39.

Для определения сдвиговых характеристик грунтов рабочий наконечник прессиометра в собранном виде погружают на заданную глубину изучаемого массива грунта. Затем с помощью грузов создают ступени удельных уплотняющих нагрузок на грунт штампами прессиометра и производят сдвиг грунта вертикальным усилием, измеряемым динамометром при выдергивании штанги вверх.

Сопротивление грунтов сдвигу определяют по формуле

$$\tau = (P - \Delta P) / 2F, \quad (21)$$

где P — выдергивающее усилие, измеряемое динамометром растяжения и прикладываемое к рабочему наконечнику прессиометра через наружную штангу при заданной ступени уплотняющей нагрузки $\sigma_{пр}$; ΔP — выдергивающее усилие, соответствующее $\sigma_{пр} = 0$; F — площадь штампа.

Сопротивление сдвигу связных грунтов при действии внешнего давления является функцией сцепления и угла внутреннего трения:

$$\tau = c + (\sigma_{\text{пр}} + \sigma_b \operatorname{tg} \varphi), \quad (22)$$

где σ_b — нормальное бытовое давление, рассчитываемое при учете взвешивающего влияния воды в водонасыщенных грунтах.

Сцепление c и угол внутреннего трения φ определяют по зависимости $\tau = f(\sigma_{\text{пр}})$ как для обычных сдвиговых испытаний при трех ступенях нагрузки прессиометра.

Значения коэффициента относительной поперечной деформации некоторых грунтов и коэффициента формы штампа приведены в табл. 33 и 34.

Т а б л и ц а 33. Коэффициент относительной поперечной деформации некоторых грунтов μ

Вид и характеристика грунта	Значения коэффициента Пуассона μ
Песок	0,2–0,25
Супесь	0,15–0,3
Глины и суглинки:	
тугопластичные	0,2–0,25
пластичные,	0,3–0,4
текучепластичные	0,45–0,5
текучие	0,3–0,35
Торф	

Т а б л и ц а 34. Коэффициент формы прямоугольного штампа ω

Соотношение сторон прямоугольного штампа	Значения ω для средней осадки штампа в упругом полупространстве
1,5	1,15
2	1,3
2	1,53
4	1,7

3.5. ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ СЛАБЫХ ГРУНТОВ

3.5.1. Определение физических свойств слабых грунтов

Важнейшими показателями физических свойств слабых грунтов являются содержание органических веществ, влажность, пределы пластичности, плотность, удельное сопротивление пенетрации, а для песчаных грунтов — и гранулометрический состав.

Содержание органических веществ в грунте определяют по ГОСТ 23740–79. При этом предусматривается раздельное определение растительных остатков и гумуса. Количество растительных остатков определяют после отмучивания гумуса на сите в проточной воде. Для определения общего содержания органических веществ рекомендуется метод сухого сжигания в потоке кислорода при температуре

950–1000°C. Карбонаты предварительно удаляют путем обработки грунта раствором 5%-ной серной кислоты.

Можно применять и другие упрощенные методы определения содержания органических веществ в грунте. Например, Н.П. Бетелев рекомендует метод сжигания пробы в газоанализаторе ГОУ при температуре 500°C в присутствии катализатора — закиси кобальта, при этом не требуется предварительное удаление карбонатов. Пользуются и обычным методом прокаливания навески в муфельной печи при температуре так называемого "красного каления" (450–500°C), при которой карбонаты еще не разлагаются.

При содержании в грунте органических веществ менее 10% рекомендуется использовать более точный оксидометрический способ, при котором органическое вещество окисляется двуххромовокислым калием в сильноокислой среде. Однако этот метод применяется в основном для определения гумуса почвенных горизонтов, а для грунтов морского, лиманного, старичного, озерного и болотного происхождения он по ГОСТ 23740–79 не рекомендуется.

Зависимость плотности сапропелей от содержания в них органического вещества приведена далее на рис. 37.

Влажность слабых грунтов определяют термовесовым способом путем высушивания образцов при температуре 105°C согласно ГОСТ 5180–75. Навеска грунта должна быть не менее 20 г; определение выполняют дважды. Влажность полной влагоемкости определяют на образцах грунтов ненарушенного сложения после водонасыщения в течение 24 ч. Для водонасыщения используется ванна с водой, в которую устанавливают одновременно несколько колец с образцами известной плотности. После суточного водонасыщения воду из ванны сливают, срезают излишки набухшего грунта с торцов колец и производят их повторное взвешивание, что позволяет одновременно рассчитать плотность образцов при влажности, соответствующей полной влагоемкости грунта.

Навески грунта для определения влажности полной влагоемкости отбирают равномерно из трех точек каждого кольца.

В случае отсутствия образцов с ненарушенной структурой допускается определение полной влагоемкости грунта по образцам, отобраным с помощью торфяного бура ТБ-6. В этом случае водонасыщение образцов производят в трехслойном марлевом мешочке, допускающем свободное набухание грунта.

Плотность частиц грунта определяют методом высоких давлений с помощью уплотнителя УВД-5 конструкции Калининского политехнического института (рис. 29) или на гидравлическом прессе ПГ-2. Для этого навеску сухого грунта в 3–4 г прессуют в течение 3–4 мин под давлением (4–5) 10^8 Па. Не снимая давления, измеряют высоту спрессованности образца, а после снятия давления образец извлекают и взвешивают. Объем грунта V определяют по формуле

$$V = 0,786 (D^2 - d^2)h, \quad (23)$$

где D — диаметр штока; d — диаметр малого стержня; h — высота образца под давлением (по индикатору).

Плотность частиц грунта вычисляют по формуле

$$\rho_{уд} = G/V, \quad (24)$$

где G — навеска абсолютно сухого грунта.

Плотность слабых грунтов определяют согласно ГОСТ 5182-78 с использованием режущего кольца объемом 120–150 см³ или гидростатического взвешивания образца, покрытого пленкой.

Метод *режущего кольца* применяют, когда объем и формы образца сохранены в жесткой обойме. Кольцом из монолита грунта отбирают образец, а остаток, выступающий над гильзой, срезают ножом; кольцо с грунтом взвешивают и вычисляют плотность по формуле

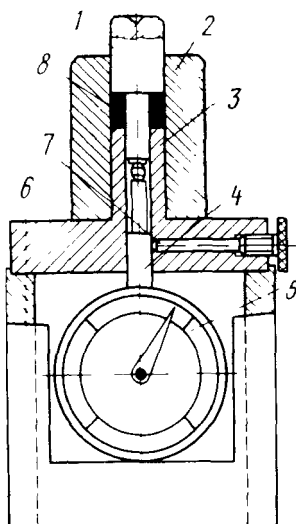
$$\rho_w = q/V, \quad (25)$$

где q — масса образца грунта при данной влажности, г; V — объем грунта внутри кольца, см³.

Для малоразложившихся торфов метод дает недостаточно точные результаты, так как торф трудно обрабатывается и деформируется при резании ножом.

Рис. 29. Уплотнитель УВД-3 для определения плотности частиц органических грунтов

1 — верхний шток; 2 — втулка; 3 — нижний шток; 4 — ножка индикатора; 5 — индикатор; 6 — подставка; 7 — зажимный болт; 8 — испытываемый грунт



Метод парафинирования. Образец грунта опускают в парафин и наращивают на нем слой толщиной 0,5 мм, затем взвешивают в воздухе, подвешивают к серье коромысла весов и погружают в стакан с водой и вторично взвешивают. Удаляют парафин с образца и отбирают пробу для определения влажности. Плотность определяют по формуле

$$\rho_w = q_1/V, \quad (26)$$

где q_1 — масса образца при данной влажности, г; V — объем образца без парафина, см³.

Волюнометрический метод. Образец грунта взвешивают, затем помещают в сетчатый каркас и погружают в волюнометр. По трубке устанавливают изменение уровня воды и вычисляют объем образца. По шкале трубки определяют объем вытесненной воды, который соответствует объему образца грунта.

Ботанический состав торфа определяют визуально и с помощью микроскопа по характеру содержащихся растительных остатков в соответствии с описанием видов и групп торфов. Для древесного торфа количество древесных остатков должно быть более 50%, для травяного — травяных не менее 65%, для мохового — моховых более 75%. Компоненты ботанического состава (древесные, травяные и моховые остатки) определяют вид и наименование торфа.

Гумус отделяют методом отмучивания, пропуская взвесь через сито с диаметром отверстий 0,1 мм — при торфе сильноразложившемся и через сито с диаметром отверстий 0,25 мм — при торфе

с меньшей степенью разложения. Из отмученной массы навеску торфа переносят пинцетом на стекло стандартного размера и под микроскопом с увеличением не менее чем в 90 раз устанавливают процентное содержание растений — торфообразователей.

Название ботанического вида дается торфу по остаткам, которых в данном образце более 15%. Если, например, в составе образца осоки 30%, древесных остатков 40%, гипнума 20% и сфагнома 10%, то торф называют гипново-осоково-древесным.

Степень разложения торфа характеризует содержание бесструктурной массы мельчайших негумифицированных остатков, имеющих в навеске (процент по массе всей навески); ее определяют химическими и физическими методами; в полевых и лабораторных условиях применяют микроскопический, **весовой**, глазомерно-микроскопический методы или центрифугирование.

Микроскопический метод. Пробу торфа в 30–40 г помещают на листе картона, тщательно перемешивают и разравнивают тонким слоем. Из 10 мест пробы на три предметных стекла помещают по 0,5 см³ торфа, разравнивают тонким слоем, добавляют несколько капель воды и покрывают покровным стеклом, затем рассматривают на каждом стекле (в равных ее частях) до 10 зон под микроскопом при увеличении в 100 раз и в процентах оценивают площадь, занятую частицами размером 0,25 мм относительно всей площади зоны, занятой торфом. Степень разложения определяют как среднее арифметическое из всех определений с округлением до 5%.

Весовой метод. Навеску в 50 г делят на две равные части, одну из которых высушивают в термостате при температуре 105°C и взвешивают с точностью до второго знака, а вторую отмучивают струей воды на сите с диаметром отверстий 0,25 мм. Отмучивание продолжают до тех пор, пока из сита не будет вытекать прозрачная вода. Оставшиеся на сите промытые растительные частицы высушивают в термостате до сухого состояния при температуре 105°C и взвешивают. Степень разложения R определяют по формуле

$$R = 100 - (a/b) 100, \quad (27)$$

где *a* и *b* — масса сухого волокна соответственно из отмученной и неотмученной навески.

Степень разложения торфа центрифугированием определяют по ГОСТ 10650–72.

Глазомерно-микроскопический метод основан на глазомерной оценке структурно-механических свойств торфа при сжатии его в руке и по цвету отжимаемой из него воды, а также по мазку торфа. При этом пользуются классификационной таблицей степени разложения основных видов торфов, приведенной в Методическом руководстве*.

Зольность — это масса золы, оставшаяся от сжигания торфа, отнесенная к массе сухой пробы и выраженная в процентах. Зольность определяют в соответствии с ГОСТ 7302–73. Сущность метода определения заключается в следующем: навеску (1–2 г сухого торфа) сжигают в муфельной печи, а остаток прокалывают при температуре 800±25°C до получения постоянной массы (с допустимой разницей в последующей массе до 0,005 г). Зольность торфа определяют по формуле

* Разведка торфяных месторождений (Методическое руководство). — М.: Недра, 1966, 347 с.

$$Z = \frac{M_1 - M_0}{M} \cdot 100, \quad (28)$$

где Z — процент золы абсолютно сухого вещества; M_1 — масса тигля с золой, г; M_0 — масса сухого прокаленного тигля; M — масса сухого торфа, г.

Разница в двух параллельных определениях должна быть не более 2%. Потерю при прокаливании (или содержание органических веществ для некарбонатных грунтов) вычисляют по формуле

$$P = 100 - Z_0. \quad (29)$$

Удельное сопротивление пенетрации определяют согласно указаниям СНиП II-15-74, п. 2.10, с помощью лабораторного пенетromетра П-11 на образцах природного сложения и естественной влажности (рис. 30).

Пределы пластичности определяют для минеральных глинистых и органо-минеральных грунтов. Границу текучести и раскатывания грунта определяют с помощью балансирного конуса по ГОСТ 5184-77.

Пределы пластичности грунтов можно определить на образцах с нарушенной структурой с помощью пенетromетра П-11 при заранее подобранной влажности. При этом следует учитывать, что удельное сопротивление грунтов на границе текучести $p_{\text{п}}^T = 7,6 \times 10^3$ Па, а на границе раскатывания $p_{\text{п}}^P = 1,9 \cdot 10^5$ Па. Так как усилие, передаваемое

на конус пенетromетра П-11 постоянно и равно 3Н, то глубина погружения конуса в грунтах на границе текучести составляет $h^T = 19,9$ мм и пластичности $h^P = 3,98$ мм. При этом используются образцы грунтов с нарушенной структурой и природной влажностью, перемятые и слегка подсушенные (или дополнительно увлажненные) до состояния влажности, близкой влажности на границе пластичности.

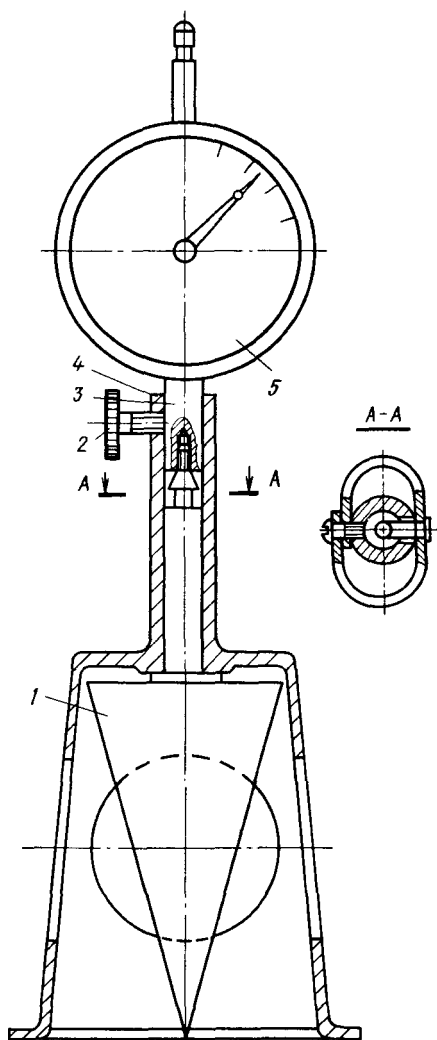


Рис. 30. Лабораторный пенетromетр П-11
1 — наконечник; 2 — винт; 3 — шток;
4 — станина; 5 — микродинамометр

Приготовление грунтовых паст из предварительно высушенного и растертого грунта не допускается, поскольку при высушивании органо-минеральных грунтов происходят необратимые процессы коагуляции коллоидных веществ, искажающих их водно-физические свойства.

Гранулометрический состав грунтов определяют в соответствии с ГОСТ 12536–79. Для песчаных грунтов гранулометрический состав практически определяется ситовым методом. Для глинистых и органо-минеральных грунтов номенклатурным показателем является число пластичности, а гранулометрический состав определяется выборочно по контрольным пробам и играет лишь вспомогательную роль.

3.5.2. Определение механических свойств слабых грунтов

Сжимаемость (деформативность) слабых грунтов в лабораторных условиях определяется на монолитах грунтов в компрессионных приборах и стабилометрах. Так как осадки слабых грунтов в основании сооружений длятся до 13 лет [1.], то для изучения их сжимаемости рекомендуется получать как компрессионные, так и консолидационные кривые, характеризующие зависимость осадки слабых грунтов от нагрузки с течением времени.

Компрессионные испытания проводятся на приборах различной конструкции с площадью кольца не менее 40 см² и высотой не менее 2 см. Уплотнение грунтов рекомендуется производить следующими ступенями нагрузки: 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2 · 10⁵ Па и далее через 0,1 МПа до заданного давления. Каждую ступень нагрузки выдерживают до условной стабилизации осадки образца: не более 0,01 мм в течение 24 ч.

Для оперативного изучения деформативных свойств грунтов, если требуется определять осадку при степени консолидации около 90%, допускается сократить время условной стабилизации на каждой ступени нагрузок до 0,01 мм в течение 4 ч, что примерно соответствует выдержке образца на каждой ступени нагрузок в течение 1 сут.

По результатам компрессионных испытаний определяется относительная деформация λ для каждой ступени нагрузки:

$$\lambda = S/h, \quad (29)$$

где S – стабилизированная осадка образца, см; h – начальная высота образца, см.

Компрессионный модуль деформации E_K при одномерном уплотнении под давлением p без возможности бокового расширения определяется по формуле

$$E_K = p/\lambda. \quad (30)$$

Коэффициент относительной сжимаемости $Q_{от} = 1/E_K$.

По данным компрессионных испытаний строят зависимость коэффициента относительной сжимаемости $Q_{от}$ от коэффициента пористости e_0 . Зависимость выражается прямой линией с угловым параметром θ и начальным отрезком $e_{кр}$, отсекаемым на оси ординат (рис. 31). По осредненным значениям компрессионных испытаний характерных разно-

видностей слабых грунтов определяют значения основных параметров их сжимаемости:

$$\lambda_{кр} = - \frac{e_0 - e_{кр}}{1 + e_0} ; \quad (31)$$

Рис. 31. Зависимость коэффициента относительной сжимаемости $Q_{от}$ от коэффициента пористости e_0
1, 2 — для торфов; 3 — для сапропелей
(по Л.С. Амаряну, 1977 г.)

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{\operatorname{tg} \theta (1 + e_0)} , \quad (32)$$

которые связаны уравнением

$$E_K = (p + \operatorname{tg} \alpha) / \lambda_{кр} . \quad (33)$$

Общий объем компрессионных, а также и консолидированных испытаний зависит от числа выделенных литологически однородных слоев и стадии проектирования. При выполнении испытаний в полном объеме число образцов должно быть таким, чтобы для каждого расчетного слоя можно было получить стандартную компрессионную кривую и консолидационные кривые для трех-четырех различных ступеней нагрузок при двух разных путях фильтрации.

Сопротивляемость сдвигу слабых грунтов в лаборатории оценивается на стандартных приборах прямого и плоского сдвига или трехосного сжатия по методу "плотность — влажность", разработанному Н.Н. Масловым, в соответствии с уравнением

$$S = p \operatorname{tg} \varphi_w + c_w , \quad (34)$$

где p — полное нормальное давление на площади сдвига; φ_w — угол внутреннего трения, зависящий от плотности — влажности грунта в момент сдвига; c_w — сцепление, также зависящее от плотности — влажности грунта в момент сдвига.

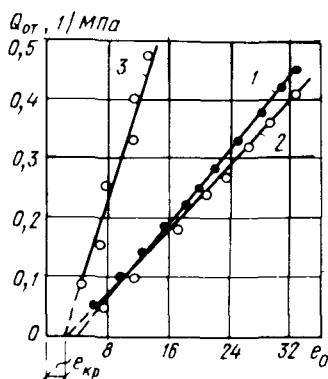
При этом

$$c_w = \Sigma_w + c_c , \quad (35)$$

где Σ_w — часть полного сцепления, имеющая водно-коллоидную природу; c_c — часть полного сцепления, обусловленная наличием восстанавливающихся связей.

Задача испытаний сводится к установлению зависимости угла внутреннего трения φ_w и сцепления c_w от влажности в зоне сдвига, что достигается в результате сдвига под тремя нормальными нагрузками нескольких образцов, с различными плотностями — влажностями.

Вертикальные нагрузки выбираются с таким расчетом, чтобы не происходило выпирания грунта из-под штампа. При этом можно использовать обычные сдвиговые приборы. Для испытаний очень слабых грунтов текущей консистенции лучше использовать специальные сдвиговые приборы облегченной конструкции, позволяющие создавать небольшие вертикаль-



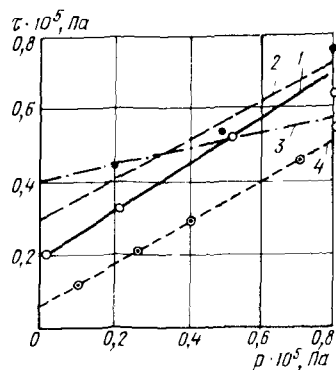
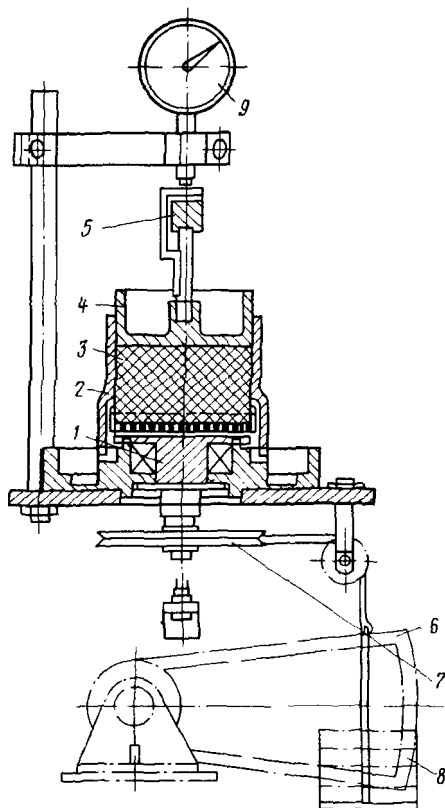


Рис. 33. Результаты сдвиговых испытаний сфагновых волокнистых торфов района г. Череповца
1, 2, 3 и 4 — с глубины соответственно 5,1; 5,6; 6,4 и 6,9 м

Рис. 32. Прибор СВ-1 для испытания волокнистых торфов вращательным срезом
1 — дно; 2 — обойма; 3 — грунт; 4 — верхний фильтр; 5 — коромысло; 6 — нагрузочное устройство; 7 — диск; 8 — груз; 9 — индикатор

ные нагрузки (порядка $0,05-0,1-0,2 \cdot 10^5$ Па), например приборы конструкции ЦНИИС, КПИ и т.д.

Для более точного определения сцепления рекомендуется одно из испытаний на сдвиг проводить без вертикальной нагрузки при $p = 0$.

Для испытания волокнистых торфяных грунтов малой и средней степени разложения целесообразнее применять приборы вращательного среза типа СВ-1 (рис. 32). Наилучшая воспроизводительность опытов наблюдается при стабилизированных испытаниях, когда скорость затухания деформаций образца при каждой ступени вертикальной нагрузки составляет не более $0,01$ мм за 4 ч. По результатам испытаний строят график изменения сопротивления сдвигу τ от внешнего давления p и определяют параметры прочностных характеристик (сцепление c и угол внутреннего трения φ) графоаналитическим методом (рис. 33).

В то же время следует учитывать, что результаты стабилизированных испытаний торфов обычно дают несколько завышенные значения угла внутреннего трения, и их следует корректировать по данным стабилометрических испытаний или по корреляционным зависимостям, рекомендуемым Л.С. Амаряном (1977 г.):

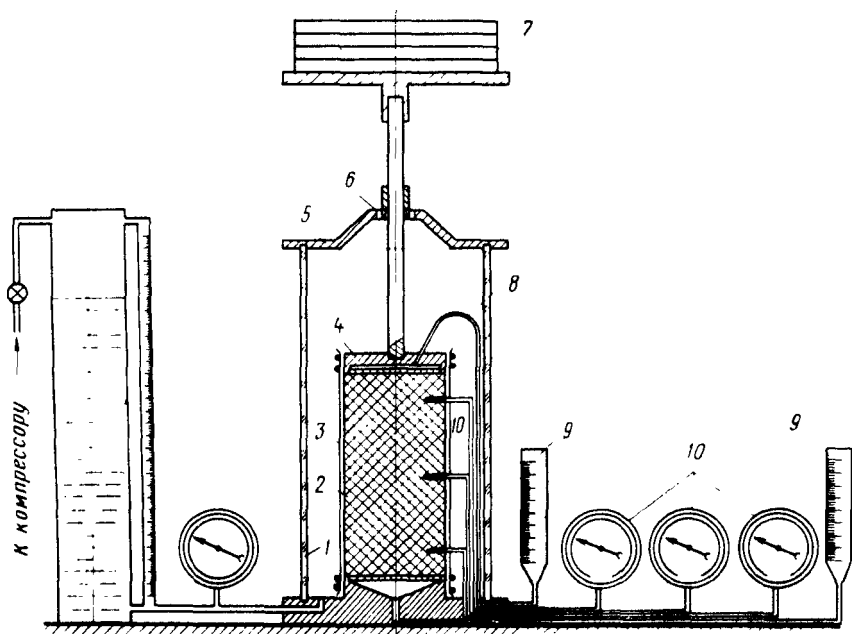


Рис. 34. Универсальный стабилометр СТ-3У

1 — камера; 2 — образец грунта; 3 — оболочка; 4 — штамп; 5 — крышка; 6 — клапаны; 7 — груз; 8 — трубка; 9 — пьезометры; 10 — динамометры

$$\operatorname{tg} \varphi_e = \operatorname{tg} \varphi_0 / (1 + e), \quad (36)$$

где $\operatorname{tg} \varphi_0 = 0,14 + 0,314e$; e — коэффициент пористости.

Стабилометр СТ-3У (рис. 34) разработан Калининским политехническим институтом для трехосных испытаний сильносжимаемых слабых грунтов. По результатам испытаний определяют модуль деформации E , коэффициент поперечного расширения μ , сцепление c , угол внутреннего трения φ и поровое давление u при дренированных и недренированных испытаниях.

С целью получения достоверных данных трехосные испытания слабых грунтов рекомендуется проводить на крупных монолитах диаметром 200–250 мм и высотой 400–500 мм. При этом необходимо исключить возможность отжатия влаги в полость резиновой оболочки, что обеспечивается при дренированных или весьма быстрых испытаниях (2–3 мин), которые в данном случае являются предпочтительными.

3.5.3. Определение коэффициента фильтрации слабых грунтов

Коэффициент фильтрации является одним из основных показателей проницаемости слабых грунтов. Он необходим для расчетов осадок

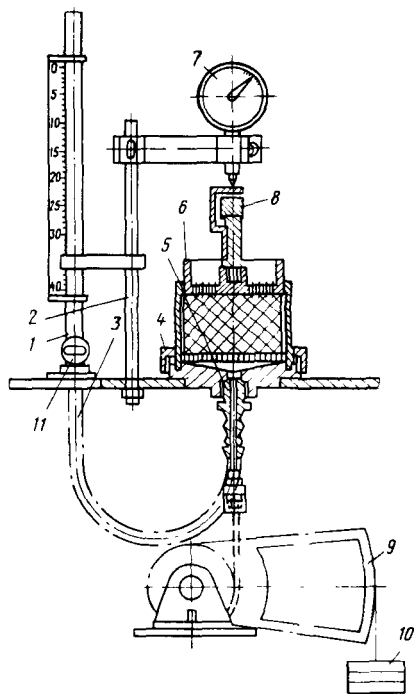


Рис. 35. Компрессионно-фильтрационный прибор КФП-1

1 — трубка; 2 — кронштейн; 3 — шланг; 4 — кольцо; 5 — патрубок; 6 — верхний фильтр; 7 — индикатор; 8 — коромысло; 9 — рычаг; 10 — груз; 11 — кран

фундаментов и сооружений, вертикальных песчаных и известковых дренажей, а также песчаных свай.

Фильтрационная способность грунтов зависит главным образом от состава слабых грунтов, степени их уплотненности и градиента напора; она изменяется в процессе консолидации грунтов нередко в 100 и 1000 раз. Для расчетов нужно знать характеристику фильтрационной способности грунтов до и после уплотнения основания, а также закономерность изменения коэффициента фильтрации в процессе уплотнения.

Коэффициент фильтрации определяют с помощью фильтрационных приборов КФП-1

(рис. 35). Значения коэффициента рассчитывают по формуле Г. Н. Каменского:

$$\kappa_{\phi} = \frac{hd^2 l n(1 - \delta/H)}{t\tau D^2}, \quad (37)$$

где h — высота образца, см; d — диаметр мерной трубки, см; δ — падение напора, см (за время l); H — начальная величина напора, см; t — время фильтрации, с; $\tau = 0,7 + 0,03T$ — температурная поправка (здесь T — температура фильтруемой воды, °C); D — диаметр образца, см.

Для определения зависимости коэффициента κ_{ϕ} от коэффициента пористости e необходимо провести не менее пяти опытов при разной степени уплотнения образцов грунтов. Первый опыт проводят при отсутствии внешней нагрузки, а последний — при давлении около $1,5 \cdot 10^5$ Па. По результатам испытаний строят зависимость $\kappa_{\phi} = \varphi(e)$.

Фильтрацию по мере необходимости создают по схемам "сверху вниз" или "снизу вверх" при постоянном или переменном напорах, моделируя условия работы оснований проектируемых фундаментов.

В процессе испытаний необходимо обеспечить плотность соприкосновения образца грунта со стенками кольца фильтрационного прибора, для чего стенки кольца при подготовке к проведению испытаний обычно смазывают густым техническим маслом.

Для фильтрации чаще всего используют дистиллированную дегазированную воду, но в случае необходимости можно использовать и грунтовую воду, отобранную вместе с исследуемыми монолитами грунта для приближения лабораторных исследований к природной обстановке реальной работы сооружений.

Глава 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛАБЫХ ГРУНТОВ

4.1. МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ СЛОЕВ СЛАБЫХ ГРУНТОВ

Расчленение толщи слабых грунтов на отдельные элементы — слои и линзы — осуществляется в процессе полевых инженерно-геологических исследований и уточняется при камеральной обработке материалов. Для этого используют данные описаний естественных обнажений, стенок шурфов и керн скважин, а также результаты лабораторных и полевых испытаний.

На геолого-литологических разрезах и инженерно-геологических картах выделяют слои и линзы, различающиеся по составу, генезису, возрасту, структурным и текстурным особенностям. Затем полученные материалы уточняются и корректируются путем последовательного решения математическими методами следующих задач: а) проверки соответствия принятого геологического расчленения требованиям выполняемых расчетов; б) оценки однородности выделенных элементов разреза по учитываемым в расчете механическим свойствам; в) установления единых характеристик механических свойств грунтов в пределах выделенных инженерно-геологических элементов [9].

Для проверки соответствия принятого расчленения требованиям расчета используют в первую очередь показатели тех механических свойств, которые учитываются в расчетах (например, плотность сложения, модуль деформации и т.п.). Поскольку объем определений таких показателей не всегда бывает достаточным, для этой цели используют и другие косвенные показатели, связанные с ними надежными корреляционными зависимостями. Одними из таких простых нормативных и удобных для обработки показателей могут служить данные динамического или статического зондирования.

В соответствии с ГОСТ 20522—75 "за единый инженерно-геологический элемент допускается принимать грунты, представленные частосменяющимися тонкими (менее 20 см) слоями и линзами грунтов различного и номенклатурного вида. Слои и линзы, сложенные рыхлыми песками, глинистыми грунтами с консистенцией более 0,75 и заторфованными грунтами, следует рассматривать как отдельные инженерно-геологические элементы независимо от их толщины".

При наличии закономерности в изменении характеристик грунта по площади или глубине инженерно-геологического элемента дальнейшее расчленение его не проводят, если коэффициент вариации закономерно изменяющейся характеристики не превышает: для коэффициента пористости и влажности — 0,15; для модуля деформации, сопротивления срезу и других показателей механических свойств грунта — 0,3.

Для оценки уровня надежности выделения отдельных слоев в пределах разреза удобно пользоваться кривыми распределения показате-

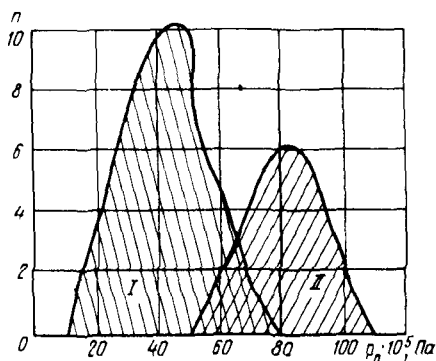


Рис. 36. Кривые распределения показателей динамического зондирования грунтов p_d ; I и II — номер слоя; n — частоты

телей зондирования. С этой целью по графикам рассеяния показателей зондирования определяют частоты их различных значений по каждому слою. При совмещении полученных для соседних слоев кривых распределения значений динамического или статического сопротивления определяется уровень надежности рас-

счленения выделенных слоев. Этот показатель рассчитывается как разность между всей площадью, охватываемой кривой распределения (она отвечает вероятности, равной единице), и площадью перекрытия двух соседних кривых распределения. Если кривые распределения перекрывают площадь, отвечающую вероятности, например 0,15, то это соответствует уровню надежности расчленения слоев, равному 0,85 (рис. 36). После уточнения правильности выделения инженерно-геологических элементов определяют расчетные числовые характеристики физико-механических свойств грунтов в пределах каждого слоя и оценивают однородность выделенных расчетных слоев с точки зрения инженерно-геологических свойств грунтов.

4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАТИСТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Показатели, установленные в результате единичных определений в лабораторной или полевой обстановке, под влиянием неоднородности, свойственной в той или иной степени всем породам, и погрешностей измерений всегда заметно различаются по абсолютным значениям. Для того чтобы устранить или снизить влияние этих факторов при расчете оснований обычно используются обобщенные (нормативные, расчетные) значения показателей свойств грунтов.

Статистическая обработка результатов определений характеристик грунтов, используемых при проектировании оснований и фундаментов зданий и сооружений, производится по ГОСТ 20522-75. Статистическую обработку физических и механических характеристик проводят для вычисления нормативных и расчетных значений грунтов строительной площадки, ее отдельных участков или оснований зданий и сооружений.

Нормативное значение всех характеристик грунтов, за исключением удельного сцепления c^H и угла внутреннего трения φ^H принимают равным среднему арифметическому значению. Нормативные значения $\text{tg}\varphi^H$ и c^H вычисляют по формулам:

$$\text{tg}\varphi^H = \frac{1}{\Delta} (n\sum \tau_i p_i - \sum \tau_i \sum p_i); \quad (38)$$

$$c^H = \frac{1}{\Delta} (\sum \tau_i \sum p_i^2 - \sum p_i \sum \tau_i p_i), \quad (39)$$

где $\Delta = n \sum p_i^2 - (\sum p_i)^2$; τ_i и p_i — частные значения сопротивления срезу и нормального давления; n — число определений величин τ .

Нормативные и расчетные характеристики слабых грунтов, входящие в расчеты оснований, определяются с учетом природного напряженно-го состояния грунта, а также возможного его изменения в процессе строительства и эксплуатации по данным непосредственных исследований грунтов на выбранном участке строительства.

Слабые грунты довольно разнообразны и изменчивы по своим физико-механическим свойствам даже в пределах одной строительной площадки, поэтому прогнозирование значений расчетных показателей и их разнородности по отдельным характеристикам физических свойств весьма затруднительно. Но для некоторых хорошо изученных типов слабых грунтов получены обобщенные данные, которые можно использовать для предварительных расчетов.

Для наиболее распространенных водонасыщенных глинистых грунтов с небольшим содержанием органических веществ обобщенные ориентировочные деформативные характеристики приведены в табл. 35. Для глинистых грунтов Среднего Приобья с примесью растительных остатков до 10% имеются нормативные сдвиговые характеристики П.А. Коновалова [10] — табл. 36. Для морских глинистых илов северных бассейнов нормативные и расчетные характеристики параметров сдвига определила Г.В. Сорокина — табл. 37. Л.С. Амарян и другие деформативные характеристики для некоторых категорий торфов приводят в зависимости от нагрузки (табл. 38).

4.3. ВЫБОР НОРМАТИВНЫХ И РАСЧЕТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ

Все здания и сооружения, возводимые на слабых грунтах, рассчитываются на устойчивость и деформацию. Для обоснования проекта строительства необходимо знать показатели физических свойств грунтов (плотность, влажность, пластичность, гранулометрический состав, содержание органических веществ), а также значения нормативных характеристик механических свойств (сцепление, угол внутреннего трения, модуль деформации, коэффициент фильтрации).

Физические свойства грунтов, как показано выше, определяются в результате лабораторных исследований образцов с нарушенной структурой, а физико-механические свойства оцениваются по данным полевых испытаний слабых грунтов в условиях их естественного залегания и по результатам лабораторных сдвиговых и компрессионных испытаний монолитов, отобранных в процессе горно-буровых работ.

При оценке инженерно-геологических свойств водонасыщенных органо-минеральных грунтов главную роль играют два показателя: содержание органического вещества и естественная влажность, которые определяют в общих чертах состав и состояние исследуемых грунтов. Установлено, что с увеличением содержания органического вещества Q в грунтах закономерно снижаются значения плотности частиц с 2,7—2,8 до 1,4—1,5 г/см³.

Выявлена весьма тесная корреляционная зависимость между этими показателями. При машинной обработке имевшихся данных получены два вида зависимости: прямолинейная ($\rho = 2,756 - 0,0138 Q$)

Таблица 35. Ориентировочные нормативные характеристики водонасыщенных глинистых грунтов
(по М. Ю. Абелеву, 1973 г.)

Влажность на границе рас- тывания, $W_p^{гг}$	Сцепление $c \cdot 10^5$, Па Угол внут- реннего трения φ , град	Значение c и φ при коэффициенте пористости e							
		0,71-0,8	0,81-0,9	0,91-1	1,01-1,1	1,11-1,2	1,21-1,3	1,31-1,6	1,61-2
18,5-22,4	$\frac{c}{\varphi}$	$\frac{0,25}{18}$	$\frac{0,25}{16}$	$\frac{0,20}{14}$	$\frac{0,25}{11}$	$\frac{0,20}{11}$	-	-	-
22,5-26,4	$\frac{c}{\varphi}$	-	-	-	$\frac{0,20}{12}$	$\frac{0,15}{12}$	$\frac{0,20}{11}$	-	-
26,5-30,4	$\frac{c}{\varphi}$	-	-	-	-	-	$\frac{0,17}{11}$	-	-
30,5-34,4	$\frac{c}{\varphi}$	-	-	-	-	-	-	$\frac{0,15}{10}$	$\frac{0,15}{8}$
34,5-38,4	$\frac{c}{\varphi}$	-	-	-	-	-	-	$\frac{0,10}{8}$	$\frac{0,16}{6}$

Примечание. Характеристики c и φ приведены по данным ускоренного неконсолидированного сдвига в одноплоскостных срезных приборах.

Таблица 36. Нормативные характеристики глинистых грунтов с примесью растительных остатков до 10% для Среднего Приуралья (по П.А. Коновалову и др., 1973 г.)

Глинистые грунты	Среднее $c \cdot 10^3$, Па, угол внутрен- него трения φ , град, модуль деформации $E \cdot 10^3$, Па	Значения c , φ и E при коэффициенте пористости e				
		0,41-0,5	0,51-0,6	0,61-0,7	0,71-0,8	0,81-0,95
При влажности на границе расхлы- пания $W_{\text{гг}}$, %: 12,5-15,4	c	0,27	0,25	0,22	-	-
	φ	26	24	22	-	-
	E	310	200	130	-	-
						0,96-1,10
15,5-18,4	c	0,30	0,27	0,25	0,22	0,20
	φ	27	25	23	21	19
	E	330	240	140	90	50
						-
22,5-26,4	c	-	0,29	0,27	0,26	0,24
	φ	-	29	26	25	22
	E	-	280	180	130	80
						0,18 20 50
26,5-30,4	c	-	-	-	0,29	0,25
	φ	-	-	-	26	24
	E	-	-	-	140	100
						0,20 22 70
При константной $B < 0$	c	0,33	0,31	0,30	-	-
	φ	30	29	26	-	-
	E	340	310	260	-	-
						-

Глинистые грунты	Сжатие $c \cdot 10^3$, Па, угол внутрен- него трения φ , град, модуль деформации $E \cdot 10^8$, Па	Значения c , φ и E при коэффициенте пористости e				
		0,41-0,5	0,51-0,6	0,61-0,7	0,71-0,8	0,81-0,95
$0 \leq B \leq 0,25$	c	0,33	0,30	0,29	0,28	
	φ	28	27	25	24	
	E	290	250	180	130	
$0,25 < B \leq 0,5$	c		0,29	0,28	0,28	0,25
	φ	-	25	24	23	21
	E		210	160	110	60
$0,5 < B \leq 0,75$	c		0,27	0,25	0,22	0,22
	φ	-	25	24	23	21
	E		190	130	80	50
$0,75 < B \leq 1$	c		0,23	0,21	0,20	0,19
	φ	-	23	23	22	21
	E		170	110	70	40
$B > 1$	c			0,19	0,18	0,18
	φ	-	-	23	22	20
	E			50	30	20

Таблица 37. Нормативные значения диаметров свай морских глинистых илов северных бассейнов
(по Г.В. Сорокиной, 1971 г.)

Число свай; пож.-теплица	Значения свайности с 10^5 угла внутреннего трения Фриш коэффициента пористости													
	4-3,5		3,5-3		3-2,5		2,5-2		2-1,8		1,8-1,6		1,6-1,4	
	с	φ	с	φ	с	φ	с	φ	с	φ	с	φ	с	φ
вск-та W, %														
φ														
2	-	-	-	-	-	-	0,07	4°30'	-	-	-	-	-	-
20	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0780	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,08	11°	-
0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,09	14°30'
2	-	-	-	-	0,075	4°	-	-	-	-	-	-	0,125	11°
1,5	-	-	-	-	-	-	0,09	6°30'	-	-	-	-	-	-
30	1	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1090	-	-	-	-
0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	0,08	3°30'	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	1,5	-	-	-	0,08	7°30'	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	0,09	7°30'	-	-	-	-	-	-
0,75	-	-	-	-	-	-	-	0,10	7°40'	-	-	-	-	-
2	0,085	2°30'	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	1,5	-	-	-	0,095	4°30'	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	0,105	6°	-	-	-	-	-	-
0,75	-	-	-	-	-	-	0,108	6°30'	-	-	-	-	-	-
2	0,09	1°40'	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,25	-	-	0,10	2°30'	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Т а б л и ц а 38. Нормативные характеристики торфяных грунтов под нагрузкой применительно к условиям одностороннего уплотнения (по Л.С. Амарину, 1972 г., и др.)

Категории торфяных грунтов	Модуль деформации $E \cdot 10^5$, Па, сцепление $c \cdot 10^5$, Па, угол внутреннего трения φ , град	Значения E, φ и c при нагрузке $P \cdot 10^5$, Па					
		0	0,1	0,2	0,5	1	1,4
Торфы: волокнистые	E	0,4	0,5	0,7	1,1	1,7	2,2
	φ	3	10	16	28	38	40
	c	0,08	0,09	0,1	0,14	0,18	0,2
нормальнозолистые	E	0,5	0,6	0,8	1,2	1,9	2,4
	φ	5	15	21	33	40	42
	c	0,13	0,15	0,17	0,22	0,27	0,3
высокосолистые	E	0,8	1	1,2	1,6	2,2	2,6
	φ	10	18	24	30	33	35
	c	0,16	0,19	0,21	0,28	0,35	0,4
Заторфованные грунты	E	1,3–5	—	—	—	—	—
	φ	20–30	—	—	—	—	—
	c	0,2–0,4	—	—	—	—	—

Рис. 37. Зависимость плотности частиц сапропелей $\rho_{уд}$ от содержания в них органического вещества Q — для прямолинейной зависимости $\rho_{уд} = 2,756 - 0,0138 Q$; 2 — для криволинейной зависимости $\rho_{уд} = 2,94 / (Q + 100)$; для сапропелей (по данным В.Е. Сеськова); 3 — органических $\rho_{уд} = 2,6 - 0,012 Q$; 4 — кремнеземистых $\rho_{уд} = 2,8 - 0,016 Q$; 5 — известковых $\rho_{уд} = 2,59 - 0,012 Q$; $\pm \sigma$ — среднеквадратичное отклонение

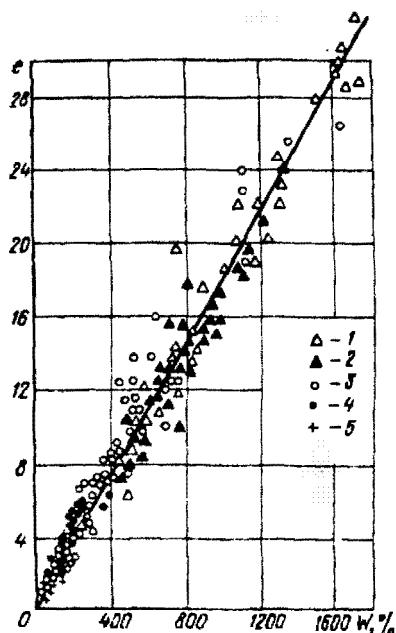
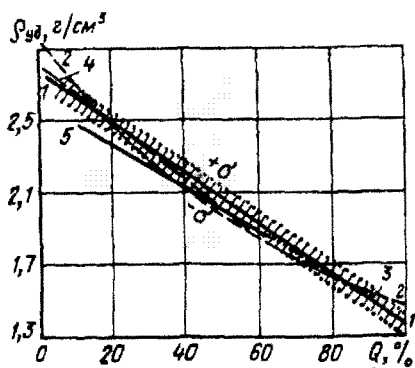


Рис. 38. Зависимость коэффициента пористости ϵ от влажности W . 1 — торфы слабоизложившиеся; 2 и 3 — сапропели органические и органо-минеральные; 4 — сапропели минерализованные; 5 — тонко-дисперсный ил

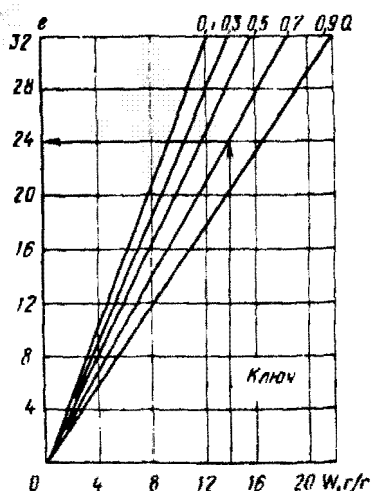


Рис. 39. Номограмма для определения коэффициента пористости ϵ по влажности W и относительному содержанию органического вещества Q для органо-минеральных грунтов

и криволинейная $\rho_{уд} = 294 / (Q + 100)$, которые достаточно хорошо согласуются одна с другой (рис. 37). Показатель тесноты связи составляет 0,97, а расхождения между показателями, вычисленными по этим двум уравнениям, находятся в пределах среднеквадратичного отклонения $\sigma = \pm 0,1$. Сходные результаты получены В.Е. Сеськовым (1977 г.) для органических, кремнеземистых и известковистых сапропелей, что подтверждает объективность выявленной взаимосвязи.

На наличие тесной взаимосвязи плотности и естественной влажности грунта в широком диапазоне изменения состава различных водонасыщенных пород указывала И.М. Горькова [5]. Наши исследования разнообразных озерно-морских отложений также подтверждают наличие указанной взаимосвязи (рис. 38). А.Я. Рубинштейном получена формула для расчета плотности сухого грунта $\rho_{сг}$ исходя из значений влажности W :

$$\rho_{сг} = 1 / (0,39 + 0,01W). \quad (40)$$

Обобщение имеющихся данных позволило составить номограмму для определения коэффициента пористости органо-минеральных грунтов озерно-морского генезиса по влажности и содержанию органического вещества (рис. 39). Имея значения коэффициента пористости и влажности грунтов, можно ориентировочно определить и другие показатели их прочности и деформационных свойств.

Выполненная статистическая обработка многочисленных экспериментальных данных показала, что значения модуля деформации хорошо коррелируются с коэффициентом пористости (рис. 40).

Величины сцепления и угла внутреннего трения имеют тесную ($\eta = 0,65 \div 0,8$) прямую связь с влажностью грунтов (рис. 41), которая выражается эмпирическими зависимостями, приведенными в табл. 39.

Известно также, что отдельные показатели физико-механических свойств грунтов хорошо согласуются с результатами динамического и статического зондирования и вращательного среза, что нашло отражение в многочисленных статьях и ряде нормативных документов. Например, согласно СН 448-72, данные зондирования допускается использовать для приближенной количественной оценки плотности, угла внутреннего трения, модуля деформации, нормативного давления и т.п. Общее сопротивление сдвигу при вращательном срезе взаимосвязано с показателями плотности и влажности слабых грунтов и используется в расчетах оснований как комплексная величина. Удовлетворительного приема разделения значения общего сопротивления сдвигу на сцепление и угол внутреннего трения грунтов по данным обычных испытаний вращательным срезом пока не найдено. Однако совместное использование результатов зондировочных и сдвиговых испытаний дает более точные и надежные данные. Это было наглядно показано Л.С. Амаряном применительно к определению критических нагрузок в торфяных грунтах по результатам статического зондирования и вращательного среза.

А.Я. Рубинштейном (1977 г.) установлена аналогичная корреляционная зависимость между несущей способностью слабых грунтов Φ и показателями статического зондирования q и вращательного среза τ (рис. 42). Сопоставление проводилось для характерных разновидностей слабых грунтов (торф, сапропели, илы, иловатые грунты) в ши-

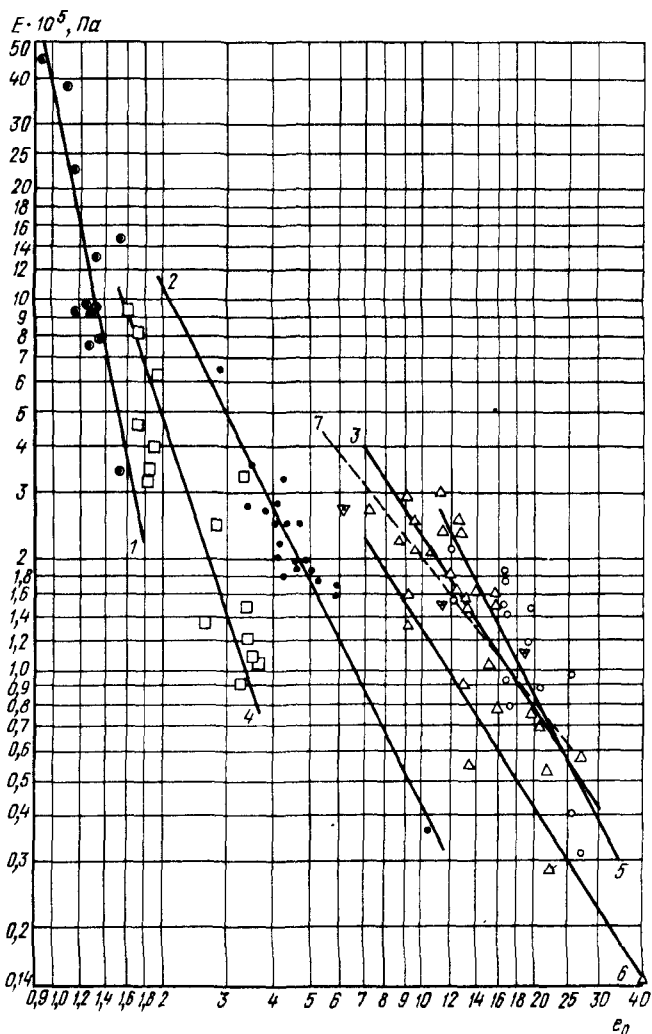


Рис. 40. Зависимость модуля деформации E от начального коэффициента пористости e_0
 1 — глинистые грунты ($E = 40/e_0^5$); 2 — сапрпели минерализованные ($E_0 = 43/e_0^2$); 3 — торфы дренажированные ($E = 76/\sqrt{e_0^3}$); 4 — лиманно-морские илы ($E = 45/e_0^3$); 5 — сапрпели органические ($E = 360/e_0^4$); 6 — торфы недренированные (по Л.С. Амаряну; $E = 41/\sqrt{e_0^3}$); 7 — торфы Западной Сибири (по А.И. Сергееву; $E = 37/\sqrt[4]{e_0^3}$)

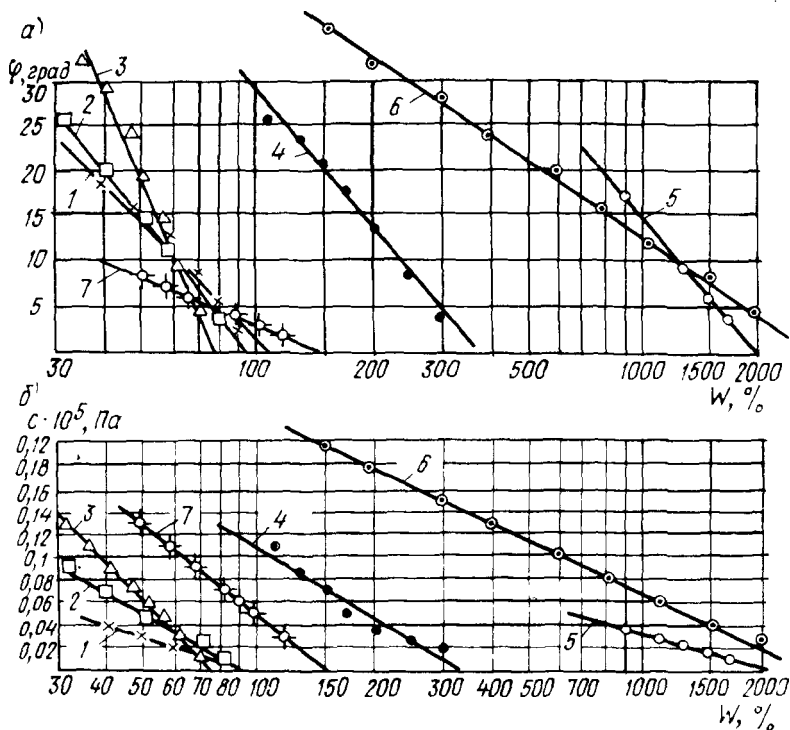


Рис. 41. Зависимость угла внутреннего трения φ (а) и сцепления c (б) от влажности W
 1 – тонкодисперсный ил (намывные грунты); 2 – глинистые илы; 3 – иловатые суглинки; 4 – минерализованные сапропели; 5 – органические сапропели; 6 – торфы; 7 – лиманно-морские илы

роком диапазоне изменения их прочностных характеристик и несущей способности.

Полевые испытания грунтов статическим зондированием выполнялись с помощью пенетromетра П-5, вращательный срез осуществлялся сдвигомером-крыльчаткой СК-10 конструкции Л.С. Амаряна. Удельная несущая способность Φ рассчитывалась по формуле (28) СНиП II-15-74 для нормализованных условий (при ширине фундамента 1 м и глубине заложения 1,2 м) исходя из результатов сдвиговых испытаний грунтов по методике ускоренного неконсолидированного сдвига и лабораторных определений плотности отобранных образцов.

Математическая обработка данных выполнена в лаборатории математических методов ПНИИИС с помощью ЭВМ "Наири". Показатель тесноты связи $\eta = 0,88$; среднеквадратичное отклонение $\sigma = \pm 16$ КПа.

Для практического использования рекомендуется формула

$$\Phi = 0,06q + 1,49\tau. \quad (41)$$

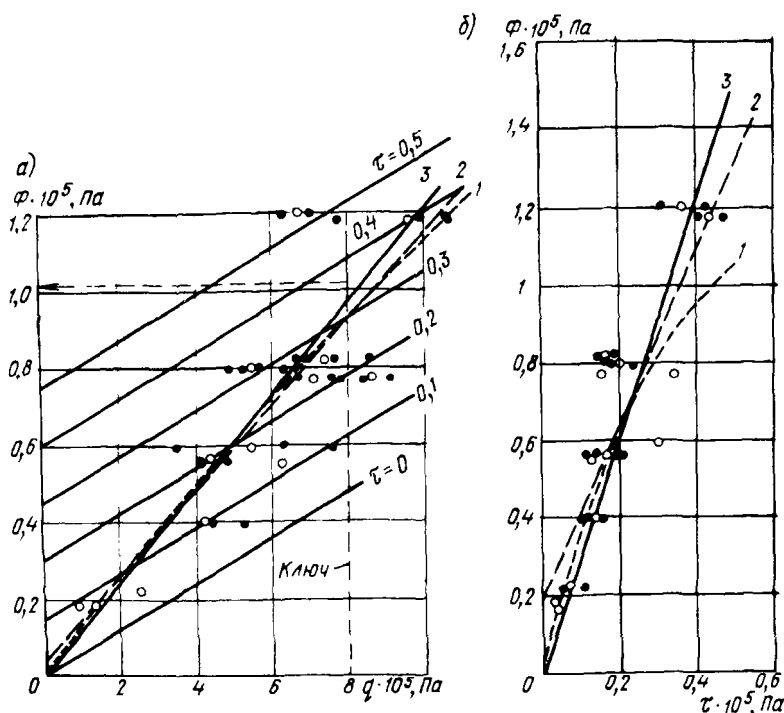


Рис. 42. Номограмма для определения несущей способности слабых грунтов Φ по значению лобового сопротивления внедрению конуса q (а) и сопротивления сдвига τ (б)

1 — криволинейная зависимость; 2 — прямолинейная зависимость; 3 — прямолинейная, проходящая через начало координат

Таблица 39. Зависимость прочностных показателей слабых грунтов от влажности

Разновидности слабых грунтов	Уравнения регрессии для расчета	
	угла внутреннего трения φ , град	сцепления $c \cdot 10^5, \text{Па}$
Намывные глинистые	$\varphi = 88 - 43 \lg W$	$c = 0.2 - 0.1 \lg W$
Глинистые илы	$\varphi = 107 - 54 \lg W$	$c = 0.39 - 0.2 \lg W$
Иловатые суглинки	$\varphi = 190 - 100 \lg W$	$c = 0.66 - 0.35 \lg W$
Минерализованные сапропели	$\varphi = 133 - 52 \lg W$	$c = 0.51 - 0.2 \lg W$
Органические сапропели	$\varphi = 156 - 47 \lg W$	$c = 0.33 - 0.1 \lg W$
Лиманно-морские илы	$\varphi = 39 - 18 \lg W$	$c = 0.59 - 0.27 \lg W$
Торфы	$\varphi = 97 - 28 \lg W$	$c = 0.58 - 0.17 \lg W$

Для удобства можно пользоваться номограммами, показанными на рис. 42.

Совокупность приведенных уравнений и найденные корреляционные зависимости дают возможность рассчитать ориентировочные значения основных показателей физико-механических свойств наиболее характерных разновидностей органо-минеральных грунтов, что позволяет наметить рациональную методику инженерно-геологического опробования и полевых исследований грунтов, сократить число требуемых испытаний, выбрать наиболее рентабельный тип фундаментов и технологию производства строительных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абелев М.Ю. Слабые водонасыщенные глинистые грунты как основания сооружений. — М.: Стройиздат, 1973, 286 с.
2. Амарян Л.С. Прочность и деформируемость торфяных грунтов. — М.: Недра, 1961, 191 с.
3. Андерсон Г.К., Тригг К.Ф. Интересные случаи из практики инженерной геологии. — М.: Недра, 1981, 212 с.
4. Вихляев Н.Н. Торф в гидротехническом строительстве. — М.—Л.: Энергия, 1965, 195 с.
5. Горькова И.М. Структурные и деформационные особенности осадочных пород различной степени уплотнения и литификации. — М.: Наука, 1965, 128 с.
6. Гудилин И.С., Комаров И.С. Применение аэрометодов при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях. — М.: Недра, 1978, 318 с.
7. Деркация А.К., Васильев Н.П. Строительство трубопроводов на болотах и милоглетнемерзлых грунтах. — М.: Недра, 1978, 105 с.
8. Иванов П.Л. Разжижение песчаных грунтов. — М.—Л.: Стройиздат, 1962, 260 с.
9. Комаров И.С. Накопление и обработка информации при инженерно-геологических исследованиях. — М.: Недра, 1972, 294 с.
10. Коновалов П.А. Устройство фундаментов на заторфованных грунтах. — М.: Стройиздат, 1980, 161 с.
11. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология: Специальная инженерная геология. — М.: Недра, 1978, 495 с.
12. Найфельд Л.Р. Инженерная подготовка пойменных и заболоченных территорий для градостроительства. — М.: Стройиздат, 1974, 183 с.
13. Радченко В.Г., Заирова В.А. Каменно-земляные и каменно-набросные плотины. — Л.: Энергия, 1971, 166 с.
14. Рубинштейн А.Я. Инженерно-геологические особенности сапропелевых отложений. — М.: Наука, 1971, 128 с.
15. Рубинштейн А.Я., Миндель И.Г. Исследование динамического воздействия на грунты при динамическом зондировании. — В кн.: Техника и технология инженерно-геологических изысканий. — М.: Стройиздат, 1980, с. 74—86.
16. Хазанов М.И. Искусственные грунты, их образование и свойства. — М.: Наука, 1975, 134 с.
17. Шапошников М.А. Геотехнические исследования болотных грунтов для строительства. — Л.: Стройиздат, 1977, 128 с.
18. Borgaru J., Bally R.I. Behaviour of Earth structures founded on very compressible soils studi de Geotehnica, fundatiis constructii hidrotehnice, XIII. Bucuresti, 1968, pp. 43—53.
19. Engineering news Record, 1972, patent CIIA. 3626702, кл. 61—50, 1971; Roads and Streets, 1973, V. 116, № 2, p. 90.
20. Morija M., Ukaju F. Design example of stability of fill dam construction on soft foundation. IX Congres des Grands Barrages, 1967. Q. 32, R. I, pp. 201—233.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Глава 1. Слабые грунты как основания зданий и сооружений	4
1.1. Номенклатура и классификация слабых грунтов	4
1.2. Опыт сооружения различных объектов на слабых грунтах в СССР и за рубежом	11
Глава 2. Состав, свойства, условия залегания и формирования слабых грунтов	17
2.1. Торф и заторфованные грунты	17
2.2. Морские илы	24
2.3. Озерные отложения	29
2.4. Водонасыщенные глинистые грунты	39
2.5. Рыхлые пески	46
2.6. Искусственные грунты	50
Глава 3. Инженерно-геологические исследования	54
3.1. Состав и объем инженерно-геологических изысканий	54
3.2. Инженерно-геологическая съемка	57
3.3. Особенности производства изыскательских работ	62
3.4. Полевые методы исследования слабых грунтов	67
3.5. Лабораторные методы определения свойств слабых грунтов	85
Глава 4. Определение расчетных значений физико-механических характеристик слабых грунтов	95
4.1. Методика выделения расчетных слоев слабых грун- тов	95
4.2. Определение числовых характеристик статистического распределения	96
4.3. Выбор нормативных и расчетных показателей физико- механических характеристик слабых водонасыщенных грунтов	97
Список литературы	108

АБРАКИМ ЯКОВЛЕВИЧ РУБИНШТЕЙН
ФЕДОР СЕРГЕЕВИЧ КАНАЕВ

*Инженерно-геологические изыскания для строительства
на слабых грунтах*

Редакция литературы по инженерному оборудованию
Зав. редакцией И.В. С о б о л е в а
Редактор С.И. П о г у д и н а
Младший редактор А.А. М и н а е в а
Внешнее оформление художника А.А. О л е н д с к о г о
Технический редактор Р.Я. Л а в р е н т ь е в а
Корректор Н.С. С а ф р о н о в а
ИБ № 2951

Подписано в печать 15.03.84. Т-08204 Формат 60х90 1/16
Набор машинописный Печать офсетная Бумага офсетная № 2
Печл. 6,75 Усл.кр.-отт. 7,13 Усл.печл. 8,34 Тираж 2725 экз.
Изд. № АУ1-9191 Зак. № 594. Цена 40 коп.

Стройиздат, 101442, Москва, Калевская, 23а

Тульская типография Союзполиграфпрома при
Государственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли
г. Тула, пр. Ленина, 109