

СРЕДНЕАЗИАТСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ИРРИГАЦИИ
„САНИРИ“

А.И.ГРОТ и В.П.ШУЛЬГИНА

СТРОИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЗАСОЛЕННЫХ ГРУНТОВ



ГОСИЗДАТ УЗССР

ТРУДЫ
СРЕДНЕАЗИАТСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ИРРИГАЦИИ

Выпуск 78

А. И. ГРОТ и В. П. ШУЛЬГИНА
Кандидаты технических наук

СТРОИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЗАСОЛЕННЫХ ГРУНТОВ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО УЗБЕКСКОЙ ССР
ТАШКЕНТ — 1956

ВВЕДЕНИЕ

На территории Средней Азии широко распространены засоленные почвы и грунты, образовавшиеся под влиянием местных естественно-исторических факторов и частично в результате хозяйственной деятельности человека (в условиях индивидуального землепользования).

Засоленные почво-грунты обычно развиваются в низовьях речных и ирригационных систем, а также в средней части как современных, так и древних речных долин. В этих случаях образование их связано с неглубоким залеганием минерализованных грунтовых вод. В составе таких грунтов содержатся преимущественно легкорастворимые соли, сосредоточенные главным образом в верхних горизонтах, степень засоления которых колеблется от 1 до 10%, а в поверхностных солевых корках достигает 20% и более.

Грунты, содержащие легкорастворимые соли, встречаются и в области предгорий — в зонах выклинивания минерализованных грунтовых вод.

На территории пустынь часто встречаются засоленные грунты, происхождение которых связано с неглубоким залеганием соленосных коренных пород. В составе этих грунтов чаще встречается гипс и реже — легкорастворимые соли. Широко распространены гипсированные грунты в полосе предгорий и равнинных покатостей, окаймляющих горные массивы, сложенные гипсоносными коренными породами. Содержание гипса широко варьирует в пределах до 30 и даже до 50%; характер его залегания зависит от условий генезиса местных грунтов. В третичных глинистых породах гипс залегает в виде линз различной толщины (10 — 20 см) или в виде более тонких прослоек (2 — 5 мм), заполняющих трещины.

В толще пролювия предгорных возвышенностей (в адырах) гипс распределяется более или менее равномерно, в виде обломков гипсовых кристаллов; реже встречаются крупные обломки гипсовых линз. В полосе равнинных покатоствей, граничащих с адырами, наряду с значительным содержанием гипсовых кристаллов встречаются и более дисперсные его формы вторичного происхождения — в виде мелких прожилок или очень тонкого порошка, приуроченные к определенным почвенно-генетическим горизонтам.

Ориентировочный подсчет площадей, занятых различными засоленными грунтами, показывает, что последние на территории Средней Азии распространены так же широко, как и лёссы или лессовидные суглинки, и по праву должны считаться одной из наиболее типичных разновидностей среднеазиатских грунтов.

Строительные свойства засоленных грунтов до последнего времени оставались почти неизученными. Это обстоятельство, повидимому, нашло свое отражение и в нормах Технических Условий (ТУ) на возведение земляных гидротехнических сооружений, допускающих в качестве безусловно годных для отсыпки основного тела плотины грунты, содержащие не свыше 3% растворимых солей. Более засоленные грунты считаются недостаточно надежными и требующими специальных обоснований для использования в смоченной зоне плотины [10]. Согласно Техническим Указаниям других ведомств, для отсыпки земляных сооружений допускаются грунты, содержащие не свыше 5% растворимых солей [11].

В условиях Средней Азии эти ограничения нередко могут вызывать необходимость замены местных грунтов привозными или постановки в каждом отдельном случае специальных исследований, вследствие чего удорожается стоимость строительства, усложняется его организация и удлиняются сроки окончания работ. Такое положение нельзя считать нормальным тем более, что все существующие ограничения не имеют под собой должного теоретического обоснования и не подтверждаются производственным опытом.

Широкое развитие гидротехнического строительства возможно при условии максимального использования местных грунтов в качестве строительных материалов. С этой целью необходимо всесторонне изучить строитель-

ные свойства местных, в частности засоленных, грунтов, и на основе этого уточнить Технические Условия и Нормы на их применение.

В этой работе излагаются результаты исследований грунтовой лаборатории Среднеазиатского научно-исследовательского института ирригации (САНИИРИ), посвященные вопросу о строительных свойствах различных засоленных грунтов.

Поскольку солевой состав естественных засоленных грунтов характеризуется исключительным разнообразием как в количественном, так и в качественном отношении, на первом этапе исследований необходимо было установить характер влияния на свойства грунтов каждой соли в зависимости от ее количественного содержания. Для этого изучались свойства искусственных смесей, приготовленных из незасоленных лессовидных грунтов с добавкой той или иной соли в различных количествах¹.

На основании результатов этих исследований, опубликованных в статье Е. Д. Рождественского [6], было установлено, что характер и степень влияния различных солей на свойства грунтов определяются прежде всего их растворимостью.

В присутствии легкорастворимых солей во влажном грунте образуются растворы различной концентрации, под влиянием которых коллоидные частицы грунта претерпевают физические и физико-химические превращения, обуславливающие разнообразные изменения строительных свойств грунтов.

Влияние гипса, в отличие от легкорастворимых солей, носит совершенно иной характер: вследствие малой растворимости этой соли, последняя выступает главным образом в качестве инертной составляющей твердой фазы грунта, усиливая свойства, присущие его скелетным (песчаным) фракциям.

Следовательно, при нормировании допускаемого содержания солей в грунтах необходимо, прежде всего, учитывать качественный состав солей. Предварительные выводы, полученные на искусственных солевых смесях, были проверены и дополнены путем изучения свойств естественных засоленных грунтов двух типов содер-

¹ Исследования проводились в грунтовой лаборатории САНИИРИ и в Институте сооружений АН УзССР.

Таблица 1

Гранулометрический и солевой состав исследованных грунтов, %

Солевой состав																				
Гранулометрический состав							по водной вытяжке													
№ грунта	песчаные		пылеватые		глинистые		по солянокислой вытяжке			по водной вытяжке										
	крупнее 0,1 мм	0,1-0,05 мм	0,05-0,01 мм	0,01-0,005 мм	0,005-0,001 мм	меньше 0,001 мм	SO ₄ ^{''}	Ca ^{''}	Mg ^{''}	CO ₃ ^{''}	HCO ₃ [']	Cl [']	SO ₄ ^{''}	Ca ^{''}	Mg ^{''}	K+Na (по разности)				
																	плотный остаток	содержание гипса CaSO ₄ ·2H ₂ O		
48	1	2	23	27	16	31	0,72	3,64	0,68	—	—	—	—	—	—	0,2			1,3	Глинистый грунт, незасоленный
46	8	9	46	12	15	10	0,20	7,74	0,65	—	—	—	—	—	—	—	—	0,12	<1	Тяжелый пылеватый суглинок, незасоленный (лессовидный)
47	3	8	54	23	6	6	0,19	7,80	0,50	—	—	—	—	—	—	—	—	0,22	<1	Легкий пылеватый суглинок, незасоленный (лессовидный)
4	—	5	54	24	9	8	0,77	7,90	0,19	—	0,05	0,45	0,43	0,14	0,08	0,20	2,0	1,4	Средний пылеватый суглинок, слабозасоленный	
14	—	—	—	—	6	6	—	—	—	—	0,03	1,52	0,58	0,43	0,12	0,56	3,80	—	Легкий пылеватый суглинок, сульфатно-хлоридный	
10	—	—	—	—	7	5	—	—	—	—	0,03	2,23	0,66	0,57	0,22	0,71	5,20	—	Легкий пылеватый суглинок, сульфатно-хлоридный	
2	—	2	42	31	14	11	1,99	8,18	2,62	—	0,04	3,25	1,86	0,86	0,57	0,95	7,53	3,5	Тяжелый пылеватый суглинок, сульфатно-хлоридный	

6	—	1	54	29	7	9	1,55	7,05	0,27	—	0,04	3,83	1,66	0,97	0,46	1,30	9,93	<1,0	Средний пылеватый суглинок, сульфатно-хлоридный
9	3	19	52	15	5	6	3,25	6,46	0,22	0,003	0,05	3,45	3,00	0,52	0,45	2,23	10,0	2,0	Легкий пылеватый суглинок, смешанный
3	—	2	60	24	8	6	6,21	6,11	0,27	0,002	0,04	5,48	5,08	0,68	0,62	4,05	16,6	2,3	Легкий пылеватый суглинок, смешанный
11					6	4				0,004	0,02	7,64	3,50	0,44	0,59	5,02	18,5		Легкий пылеватый суглинок, сульфатно-хлоридный
5	—	5	49	27	9	11	3,80	6,83	2,10	0,004	0,03	1,93	2,91	0,29	0,22	1,91	7,2	3,0	Тяжелый пылеватый суглинок, хлоридно-сульфатный
19	—	1	13	43	23	20	7,53	7,92	3,05	—	0,08	0,161	2,66	0,51	0,13	0,57	4,57	10,9	Глинистый грунт, гипсованный
17	53	8	23	8	7	1	10,33	8,65	2,07	—	0,08	0,97	3,92	0,54	0,38	1,21	7,86	13,8	Супесь гипсованная
15	2	2	41	32	18	5	20,64	15,99	1,97	—	0,07	0,02	1,59	0,61	0,04	0,04	2,38	37	Тяжелый пылеватый суглинок, гипсованный
22	4	7	41	26	10	12	23,43	18,44	0,77	—	0,08	0,03	1,64	0,59	0,04	0,07	2,61	42	Тяжелый пылеватый суглинок, гипсованный
28				27	14	9	14,60	7,22	4,73	—	0,04	0,45	5,81	0,54	0,69	1,17	10,40	18,1	Тяжелый пылеватый суглинок, гипсованный
23	3	6	63	16	5	7	18,58	12,93	1,22	—	0,09	0,01	1,36	0,58	0,01	—	2,13	33,4	Легкий пылеватый суглинок, гипсованный

Примечания. 1. Гранулометрический анализ производился комбинированным методом Сабанина-Робинсона с предварительной отмывкой растворимых солей.

2. Водная вытяжка приготовлялась при соотношении $\frac{\text{грунт}}{\text{вода}} = 5$.

3. Солянокислая вытяжка готов лась с 5-процентной кислотой при 30-минутном кипячении.

жащих легкорастворимые соли и гипсированных грунтов различного гранулометрического состава.

Помимо лабораторных опытов, не позволяющих полностью воспроизвести те условия, в которых находятся грунты в теле гидротехнических сооружений, проводились натурные обследования нескольких сооружений, отсыпанных из грунтов с повышенным содержанием солей.

* * *

Объектами лабораторных исследований послужили несколько разновидностей солончаков, образовавшихся на аллювиальных наносах низовой реки Аму-Дарьи, а также гипсированные грунты из предгорий левобережной Ферганы.

Гранулометрический состав этих грунтов, состав и степень их засоления приведены в табл. 1.

Следует при этом отметить, что большинство грунтов относится к группе наиболее распространенных на территории Средней Азии пылеватых суглинков; образцы № 9 и, особенно, № 17 отличаются от остальных повышенным содержанием песчаных фракций, а образцы № 19 и № 48 являются более глинистыми.

Учитывая разнообразный количественный и качественный состав засоления, в исследованных грунтах можно выделить несколько групп:

1. Незасоленные или слабозасоленные грунты, содержащие меньше 3% растворимых солей — образцы № 46, 47, 48 и 4. Последние, согласно нормам, предусматриваемым Техническими Условиями, считаются пригодным строительным материалом для отсыпки земляных гидротехнических сооружений; в связи с этим показатели свойств таких грунтов были использованы в качестве эталона при количественной оценке влияния солей.

2. Грунты, содержащие легкорастворимые соли — образцы № 2, 6, 9, 3, 10, 5, 11, 14.

3. Гипсированные грунты — образцы № 15, 23 и 22.

4. Грунты, содержащие гипс и легкорастворимые соли, при их различном количественном соотношении — образцы № 17, 28 и 19.

В естественных засоленных грунтах различного состава исследовались характерные пределы влажности,

динамика фильтрационных свойств в процессе солевой суффозии, сопротивление сдвигу, уплотняемость, усадочные свойства и набухание — в исходном состоянии грунтов и после их частичного или полного рассоления. Исследования в основном проводились по общепринятым методикам.

ПРЕДЕЛЫ ПЛАСТИЧНОСТИ

На основании характерных пределов влажности и числа пластичности можно судить о том, насколько резко снижаются прочностные свойства грунтов по мере их увлажнения.

Величины характерных пределов влажности зависят от степени дисперсности грунта и условий окружающей среды (в данном случае — концентрации электролитов в растворе, заполняющем грунтовые поры).

В. А. Приклонский [5], ссылаясь на исследования И. А. Попова, пишет, что в глинистых грунтах, обладающих высокой емкостью поглощения, наблюдается снижение характерных пределов влажности под влиянием растворов электролитов высокой концентрации.

Исследованиями Е. Д. Рождественского и А. Н. Обельченко [7], проводившимися на искусственных смесях лессовидных грунтов с различными солями или их растворами, установлено, что влияние электролитов на характерные пределы влажности сказывается не только в глинистых грунтах, но и в более легких разновидностях — в лессовидных суглинках; степень и даже характер этого влияния могут быть неодинаковыми в зависимости от качественного состава соли, ее дозировки и концентрации солевого раствора.

Сопоставляя данные табл. 2, следует отметить, что слабозасоленный грунт № 4, содержащий меньшее количество легкорастворимых солей, отличается от всех остальных повышенными показателями характерных пределов влажности, которые снижаются в сильнозасоленных грунтах, содержащих как легкорастворимые соли, так и гипс. Число пластичности изменяется в зависимости от гранулометрического состава грунтов: в наиболее тяже-

**Пределы влажности в естественных засоленных грунтах
различного гранулометрического состава**

№ грунта	Содержание частиц <0,005 мм	Название грунтов по гранулометрическому составу	Содержа- ние солей, %		Влажность пределов пластичн., %		Число пластичности
			легкораство- римых	гипса	верхнего	нижнего	
4	17	Средний пылеватый суглинок	2	—	31	25	6
2	25	Тяжелый пылеватый суглинок	7	—	29	22	7
5	20	Тяжелый пылеватый суглинок	7	—	26	19	7
6	16	Средний пылеватый суглинок	10	—	27	21	6
3	15	Средний пылеватый суглинок	16	—	27	21	6
10	12	Легкий пылеватый суглинок	5	—	26	23	3
11	11	Легкий пылеватый суглинок	18	—	27	23	4
9	11	Легкий суглинок	10	—	22	19	3
19	33	Глинистый грунт	4	11	29	23	6
28	25	Тяжелый пылеватый суглинок	10	18	24	17	7
15	23	Тяжелый пылеватый суглинок	2	37	24	21	3
23	12	Легкий пылеватый суглинок	2	33	24	21	3
17	8	Супесь	8	14	19	17	2

лых разновидностях — в средних и тяжелых суглинках и даже в глинистом грунте оно равно 6—7, в легких суглинках и в супеси уменьшается до 4—2.

Снижение характерных пределов влажности и уменьшение числа пластичности в сильнозасоленных грунтах указывает на то, что ослабление их прочностных свойств с повышением влажности происходит в меньшем диапазоне последней и более резко по сравнению с слабозасоленными или незасоленными грунтами.

В классификации грунтов по числу пластичности к классу супесей относятся все грунты, у которых число пластичности менее 7. Данные табл. 2. показывают, что упомянутая классификация, разработанная на основании исследований свойств грунтов из районов Европейской части СССР, нуждается в уточнении применительно к засоленным грунтам, у которых число пластичности меньше 7, свойственно не только супесчаным, но и пылеватосуглинистым разностям, содержащим до 20% глинистых частиц.

Засоленные грунты, уложенные в тело земляных гидротехнических сооружений в зоне ниже депрессионной кривой, подвергаются длительному воздействию тока фильтрующейся воды; при этом происходит растворение и выщелачивание солей — солевая суффозия, сопровождающаяся изменениями в структурном сложении рассоляющихся грунтов. В связи с этим могут изменяться и их строительные свойства. Так, в результате выщелачивания легкорастворимых солей повышаются верхний и нижний пределы пластичности, что является одним из признаков усиления гидрофильных свойств в рассоляющихся грунтах.

ДИНАМИКА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ В ПРОЦЕССЕ СОЛЕВОЙ СУФФОЗИИ

Наиболее существенные изменения вследствие солевой суффозии возможны в фильтрационной способности грунтов, которая в решающей мере определяется сложением грунта, а именно — характером и размерами свободных пор.

Долгое время строители-гидротехники считали, что выщелачивание солей будет «изрешечивать» грунт, увеличивая его пористость на величину объема выщелоченной соли, в результате чего водопроницаемость грунта станет непрерывно увеличиваться.

В настоящее время экспериментально и теоретически доказано, что вопрос о конечных изменениях плотности и фильтрационных свойств рассоляющегося грунта значительно более сложен, чем это представлялось первоначально. Так, установлено, что в рассоляющемся грунте изменяется не только величина, но и характер пористости, поскольку при этом может изменяться степень дисперсности, характер связей между частицами грунта и состав поглощенных катионов [3]. Кроме того, на формирование фильтрационных свойств рассоляющегося грунта влияет осадка его в сооружении под давлением веса вышележащих слоев грунта. Сопровождая процесс выщелачивания, осадка эта в известной мере компенсирует увеличение пористости рассоляющегося грунта.

Вопросу динамики фильтрационных свойств засоленных грунтов посвящен ряд работ [3, 4, 9 и др.], но все

они содержат материалы исследований грунтов с ненарушенным сложением.

Поскольку в задачу наших исследований входило изучение свойств засоленных грунтов, как строительных материалов, соответственные фильтрационные исследования проведены на образцах с нарушенным сложением при плотности, равной $1,60 \text{ г/см}^3$.

Изучались следующие вопросы:

1) Динамика фильтрационной способности засоленных грунтов в различных условиях опыта.

2) Изменение плотности засоленных грунтов в процессе их рассоления.

3) Формирование процесса солевой суффозии в грунтах, имеющих различный характер засоления.

Исходя из этих задач, были поставлены две серии опытов: первая — по обычной методике, не учитывающей давления на грунт; во второй — исследуемые образцы находились под давлением 1 кг/см^2 .

Результаты первой группы опытов применимы к оценке фильтрационных свойств грунтов, уложенных в небольшие гидротехнические сооружения, для которых можно пренебречь давлением веса вышележащих слоев. Понятие о динамике фильтрационной способности засоленных грунтов в более крупных гидротехнических сооружениях дают материалы второй группы опытов.

В результате исследований установлена тесная взаимообусловленность процессов фильтрации и солевой суффозии и зависимость их от внешних условий — наличия или отсутствия давления на грунт.

Эта зависимость отражается на фильтрационной способности грунтов, значительно сниженной в условиях сжатия их нормальными силами, о чем свидетельствуют данные, приведенные в табл. 3.

Различная фильтрационная способность грунтов обусловлена разной степенью разуплотнения их в процессе фильтрации и солевой суффозии, что подтверждается уменьшением объемного веса грунтов (принятого за критерий плотности), особенно заметным в опытах без давления (табл. 3).

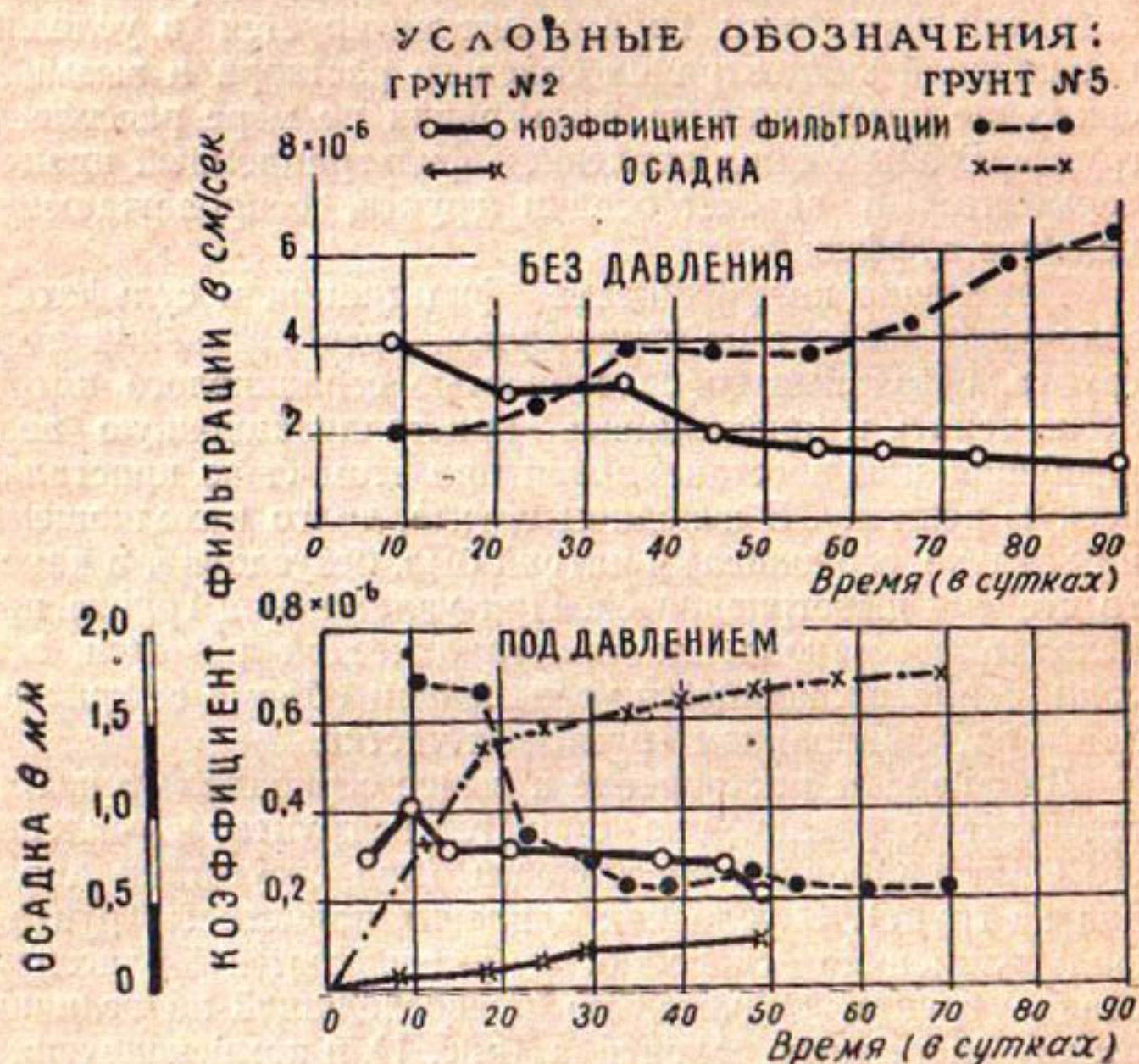
Причиной разуплотнения грунтов, свободных от давления, является повышение их пористости вследствие выщелачивания солей и набухание (пример: разуплотнение незасоленного грунта № 46). В грунтах, находящихся

Таблица 3

Изменение коэффициента фильтрации и объемного веса грунтов в различных условиях опыта

№ грунта	Средний коэффициент фильтрации, см/сек		Пределы изменения коэффициента фильтрации		Объемный вес грунтов, г/см ³				Количество выщелоченных солей на 1 г грунта			
	в опытах под давлением	в опытах без давления	в опытах под давлением	в опытах без давления	в опытах под давлением		в опытах без давления		в опытах под давлением	в опытах без давления	в опытах под давлением	
					исходный	конечный	исходный	конечный			в граммах	% от исходного
5	$0,3 \times 10^{-6}$	$3,7 \times 10^{-6}$	$0,2-0,7 \times 10^{-6}$	$2-6 \times 10^{-6}$	1,60	1,61	1,60	—	0,02	27,0	0,05	74,0
15	$1,0 \times 10^{-6}$	$28,4 \times 10^{-6}$	$0,7-1,4 \times 10^{-6}$	$11-45 \times 10^{-6}$	1,60	1,59	1,60	1,49	0,02	4,4	0,15	40,0
23	$2,8 \times 10^{-6}$	$12,8 \times 10^{-6}$	$1,6-3,9 \times 10^{-6}$	$3,2-23,4 \times 10^{-6}$	1,60	1,57	1,60	1,54	0,03	7,9	0,08	21,0
46	$0,5 \times 10^{-6}$	$14,1 \times 10^{-6}$	$0,3-1,1 \times 10^{-6}$	$10,0-25,0 \times 10^{-6}$	1,60	1,69	1,60	1,54	—	—	—	—

под давлением, оба эти фактора подавлены сжимающими усилиями и осадкой грунта, сопровождающей процесс солевой суффозии; поэтому и пористость и фильтрационная способность грунтов в этих условиях снижены.



Р и с. 1. Динамика коэффициента фильтрации и осадки грунтов, содержащих легкорастворимые соли.

В процессе солевой суффозии происходит изменение фильтрационной способности грунтов, зависящее как от характера их засоления, так и от внешних условий.

Коэффициент фильтрации в грунтах, содержащих легкорастворимые соли — хлориды и сульфаты и находящихся под давлением, с течением времени снижается. При отсутствии давления фильтрационная способность этих грунтов изменяется различно: в хлоридных солончаках коэффициент фильтрации со временем снижается, в сульфатных — возрастает (рис. 1).

Снижение фильтрационной способности хлоридных

солончаков можно объяснить тем, что преобладание в них хлористого натрия обусловило наличие обменного натрия в составе поглощенных оснований. Влияние последнего, направленное на повышение степени дисперсности грунта, увеличение количества связанной воды и уменьшение активной пористости грунта, активизируется в условиях пониженной концентрации солевого раствора и вызывает снижение коэффициента фильтрации по мере рассоления грунта. В опытах под давлением фильтрационный процесс тормозится и за счет осадки грунта, сопровождающей солевую суффозию.

Изменение коэффициента фильтрации в сульфатном солончаке зависит от структурных преобразований этого грунта, связанных со способностью сернокислого натрия легко терять и присоединять кристаллизационную воду, разрушая или восстанавливая при этом свою кристаллическую решетку. В исходном грунте, долго находившемся на воздухе, сернокислый натрий был, безусловно, в какой-то степени выветрившимся. При увлажнении грунта происходит восстановление кристаллической решетки этой соли, сопровождающееся увеличением объема ее кристаллов и расклиниванием грунтовых частиц.

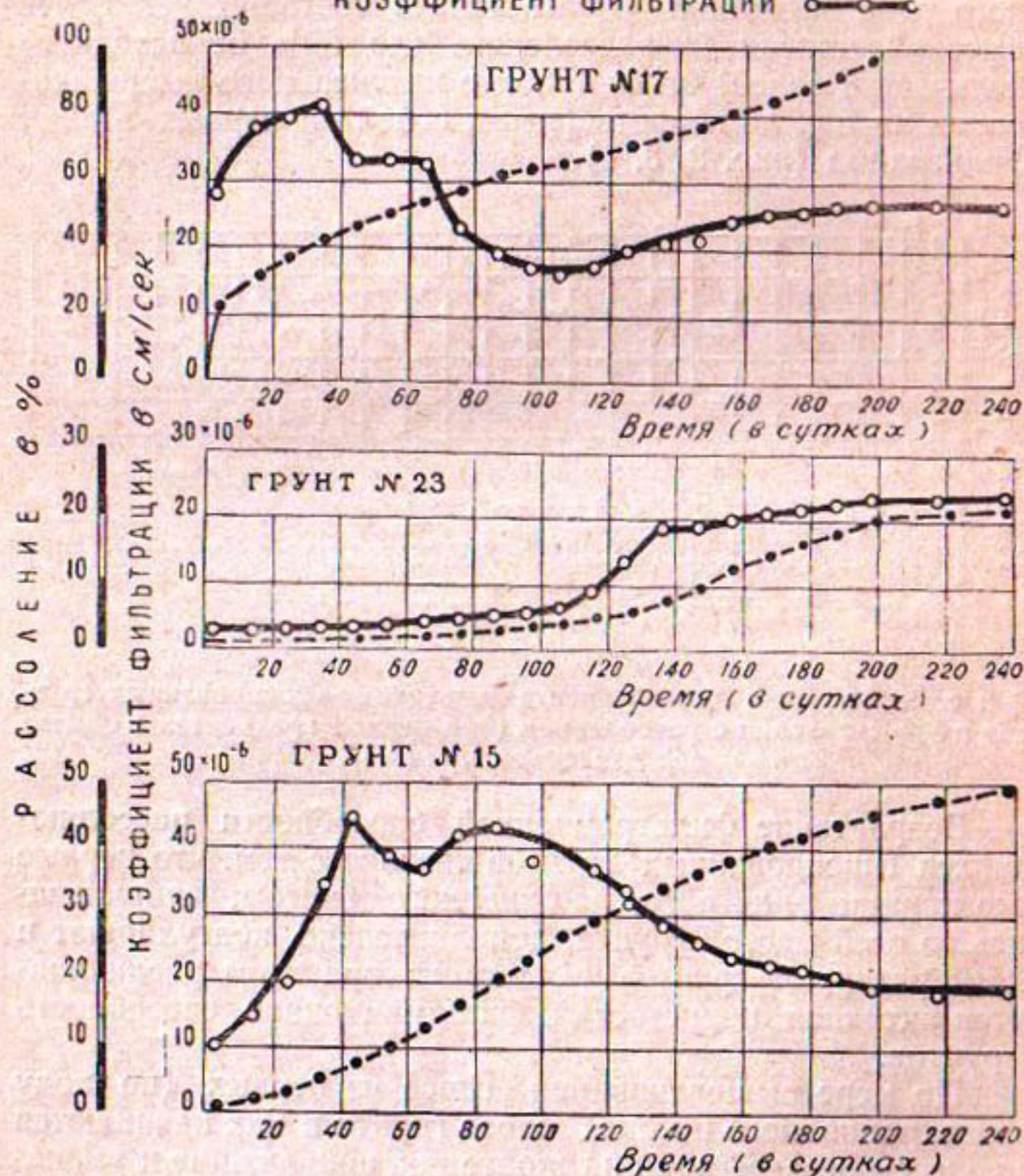
Дальнейшее растворение и вынос сернокислого натрия приводят к увеличению пористости грунта и усилению его фильтрационной способности (при отсутствии давления на грунт). В условиях давления пористость грунта и фильтрационная способность уменьшаются благодаря осадке грунта, значительно превосходящей по величине осадку хлоридного солончака (рис. 1) и компенсирующей приращение его пористости.

Фильтрационные свойства гипсированных грунтов изучались при наличии и отсутствии давления и при различных градиентах. Несмотря на то, что наблюдения продолжались в течение 250—500 дней, динамика фильтрационных свойств гипсированных грунтов в ряде случаев проявилась недостаточно отчетливо, что связано с медленным выщелачиванием гипса из грунтов. Тем не менее, ориентируясь на опыты, в которых рассоление грунтов шло наиболее интенсивно (грунт 15 при высоких градиентах и грунт 17) без давления, можно прийти к выводу, что фильтрационная способность гипсированных грунтов, независимо от условий работы их в сооружении, на первом этапе солевой суффозии возрастает, а при дальнейшем рассоле-

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

РАССОЛЕНИЕ ● — ●

КОЭФФИЦИЕНТ ФИЛЬТРАЦИИ ○ — ○

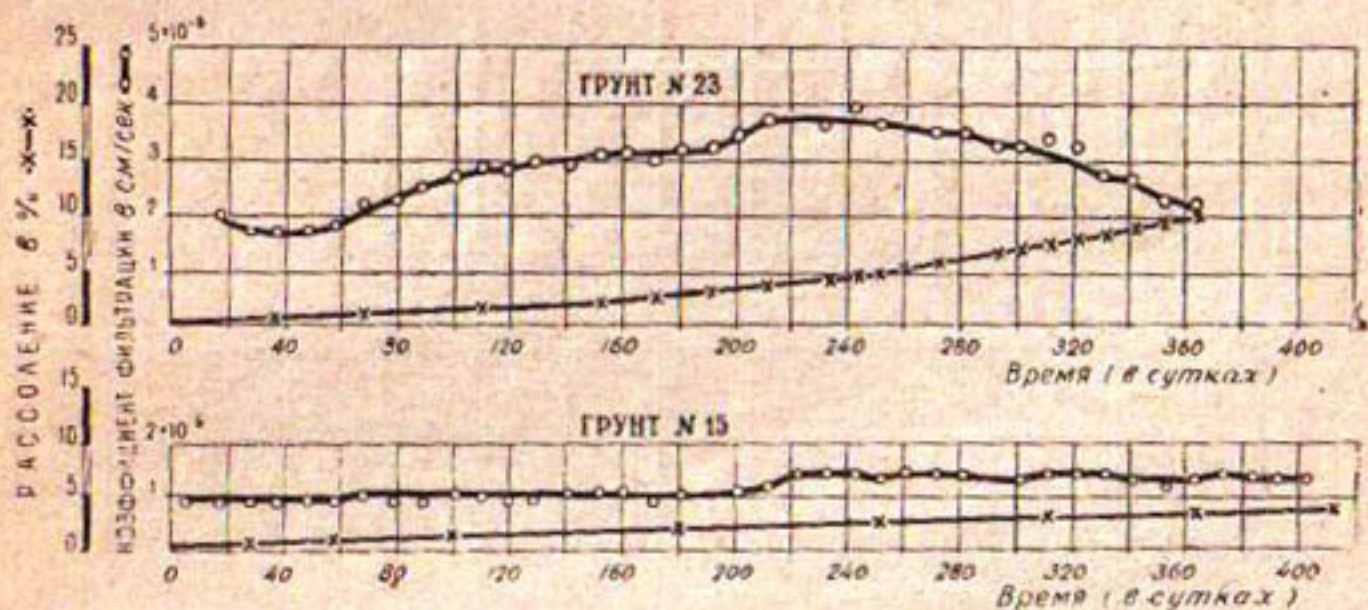


Р и с. 2. Динамика коэффициента фильтрации в гипсированных грунтах в сопоставлении с рассолением (опыты без давления, при $I=1$).

нии снижается, стремясь к некоторой постоянной величине (рис. 2, 3, 4).

В грунтах, исследуемых под давлением, снижение фильтрационной способности начинается после выщелачивания из них 5—10%, а при отсутствии давления — при-

мерно 20% исходного количества солей. Максимальное развитие фильтрационной способности грунтов смешанного типа засоления (грунт № 17) соответствует более высокой степени их рассоления (до 50% от исходного количества солей) за счет более интенсивного выщелачивания из них легкорастворимых солей на первых этапах фильтрации (рис. 2, 3, 4).



Р и с. 3. Динамика коэффициента фильтрации гипсированных грунтов в сопоставлении с рассолением (при низких градиентах в опытах под давлением при $I=1$).

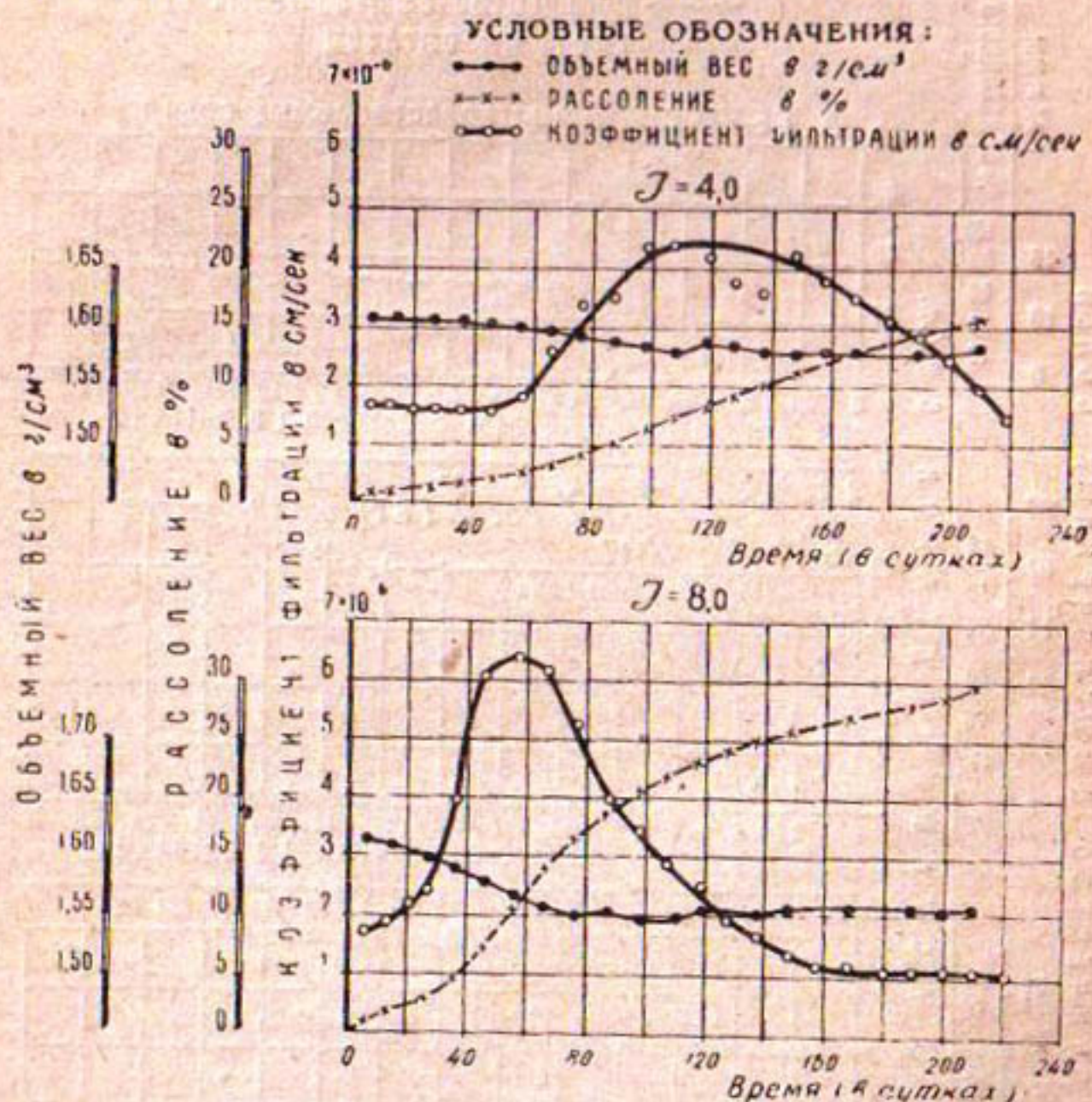
Возрастание фильтрационной способности рассоляющихся гипсированных грунтов связано с тем, что первые же порции фильтрата, насыщенного гипсом, соприкасаясь со всей массой грунта, дополнительно коагулируют и дегидратируют грунтовые частицы; при этом увеличивается активная пористость и фильтрационная способность грунтов.

По мере выщелачивания гипса из первых (по ходу фильтрационного потока) слоев грунта в них начинаются процессы дезагрегации и гидратации, приводящие к уменьшению активной пористости грунта. А так как водопроницаемость грунтового монолита определяется наименее проницаемым слоем, который является противofильтрационным экраном, понижение фильтрационной способности гипсированных грунтов происходит задолго до полного их рассоления.

Степень изменения фильтрационной способности гипсированных грунтов определяется режимом фильтрации. При низких градиентах ($I=1,0$) и наличии давления на грунт изменение коэффициента фильтрации значительно

растянуто во времени; с увеличением градиента период изменения коэффициента фильтрации сокращается, а величина его максимального значения возрастает (рис. 3, 4).

Процесс солевой суффозии в гипсированных грунтах характеризуется прямой зависимостью между количест-

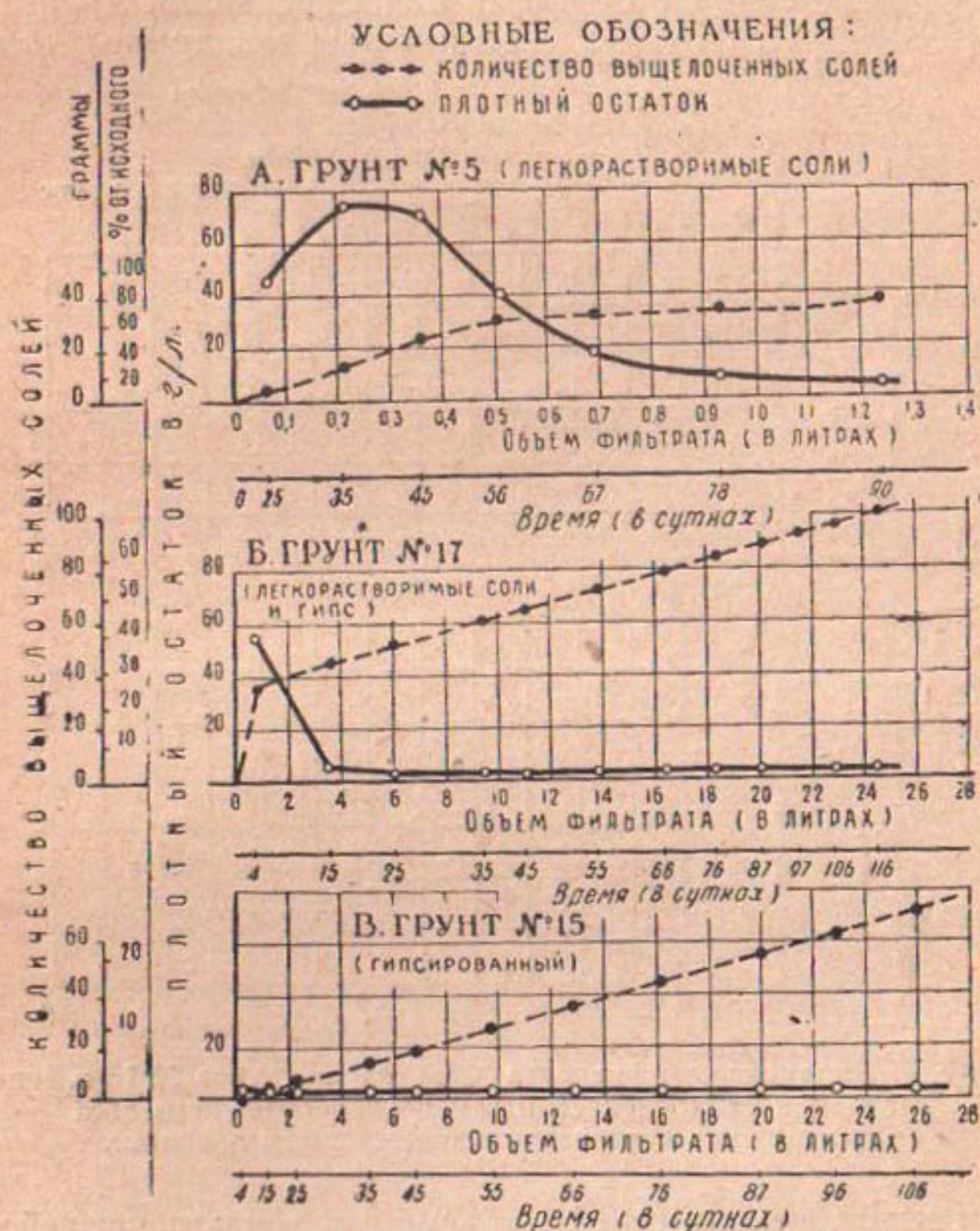


Р и с. 4. Динамика коэффициента фильтрации грунта №15 в сопоставлении с рассолом и изменением объемного веса (при высоких градиентах в опытах под давлением).

вом выщелоченных солей и объемом профильтровавшейся воды вследствие почти постоянной величины плотного остатка в фильтрах, близкой к предельной растворимости гипса (рис. 5). Невысокая величина последней (около 2 г/л) и относительно низкая фильтрационная способность гипсированных грунтов обуславливают медленное развитие их рассоления.

В этом отношении гипсированные грунты отличаются от грунтов, содержащих легкорастворимые соли. Процесс

солевой суффозии в последних имеет наибольшее развитие в начальной своей стадии, характеризующейся более высокими значениями плотного остатка фильтратов



Р и с. 5. Динамика выщелачивания солей из грунтов (в опытах без давления).

(рис. 5 А). По мере вымывания солей из грунта концентрация их в фильтрате уменьшается и интенсивность рассоления грунтов затухает независимо от их фильтрационной способности.

В грунтах, содержащих легко- и труднорастворимые соли, процесс солевой суффозии носит промежуточный характер: первая стадия рассоления проходит в них как в грунтах, содержащих легкорастворимые соли, последующие — как в гипсированных грунтах (рис. 5 Б).

Что касается количественной оценки фильтрационных свойств исследованных нами грунтов различного солевого состава, следует сказать, что в среднем она оказалась невысокой ($K = n \times 10^{-6}$ см/сек в опытах под давлением и $K = n \times 10^{-5}$ см/сек без давления).

В процессе рассоления коэффициент фильтрации грунтов увеличивался в три-семь раз, не превышая, однако величин, характерных для незасоленных суглинков ($1 \times 10^{-4} \div 1 \times 10^{-6}$ см/сек) [5], возможность применения которых в гидротехнических сооружениях не вызывает сомнения. Добавим к этому, что коэффициент фильтрации исследованного нами эталонного грунта № 46 — незасоленного лессовидного суглинка — был равен в среднем $0,5 \times 10^{-6} \div 14 \times 10^{-6}$ см/сек (соответственно под давлением и без него), то есть величина его имела тот же порядок, что и коэффициенты фильтрации засоленных грунтов.

Таким образом, результаты исследований в отношении фильтрационной способности засоленных грунтов и динамики ее изменения в процессе солевой суффозии не дают оснований к запрещению использования их в качестве строительных материалов для гидротехнических сооружений. В сооружениях, возведенных из гипсированных грунтов, процесс рассоления будет значительно более продолжительным. Произведенный нами расчет, а также обследование сооружений, возведенных из сильно гипсированных грунтов (по истечении 10—15-летней эксплуатации их) показали, что период первого этапа рассоления, соответствующего выщелачиванию из грунтов около 20% исходного содержания гипса, может исчисляться сотнями лет.

Остановимся еще на одном важном моменте, связанном с процессом солевой суффозии — величине и динамичности осадки рассоляющегося грунта под давлением.

В табл. 4 приведены данные об осадке, наблюдавшейся в условиях различной интенсивности развития солевой суффозии в грунте № 15.

Согласно этим данным, максимальное развитие

Осадка грунтов в процессе фильтрации

№ грунта	Градиент	Продолжительность опыта (в сутках)	Количество выщелоченной соли		Исходная высота образца, см	Осадка		Конечная высота образца, см	Изменение объемного веса	
			в граммах	от исходного содержания, ‰		см	от исходной высоты, ‰		исходный, г/см ³	конечный, г/см ³
15	1,0	180	6,7	2,3	8,0	0,181	2,2	7,819	1,60	1,61
15	4,0	210	42,1	16,0	8,0	0,395	5,0	7,605	1,60	1,59
15	8,0	210	81,3	31,0	8,0	0,572	7,2	7,428	1,60	1,55
46	1,0	180	—	—	8,0	0,486	6,1	7,514	1,60	1,68

осадки гипсированного грунта соответствует наибольшей интенсивности суффозионного процесса, наблюдавшейся при фильтрации под большим напором. В этих условиях осадка в период первого этапа рассоления достигает 5—7% от исходной высоты слоя грунта. Учитывая, что период этот в сооружениях будет растянут на сотни лет, а изменение плотности грунтов во времени происходит довольно плавно (рис. 4), можно считать, что солевая суффозия не вызовет таких резких просадок грунта, которые могли бы нарушить монолитность сооружения.

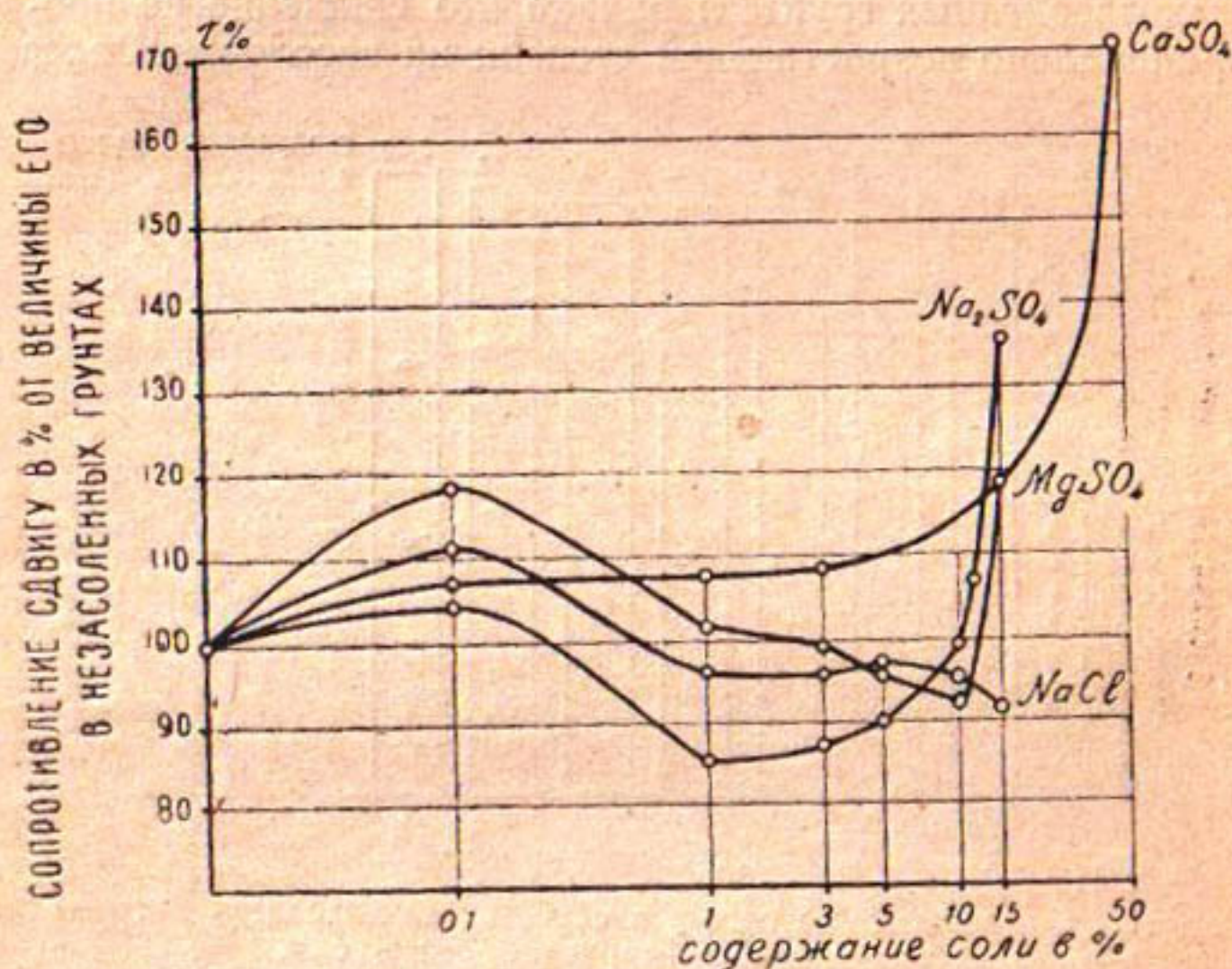
В подтверждение сказанного можно отметить, что в аналогичных условиях опыта в гипсированных грунтах осадка была меньше, чем в незасоленных.

Таким образом, и с точки зрения просадочности нег оснований опасаться применения гипсированных грунтов в гидротехнических сооружениях.

СОПРОТИВЛЕНИЕ СДВИГУ

Сопротивление связных грунтов сдвигу, как результат проявления сил внутреннего трения и сцепления при нормальном давлении, определяется количеством и качеством контактов между грунтовыми частицами и их агрегатами, клеящей способностью водно-коллоидных пленок на

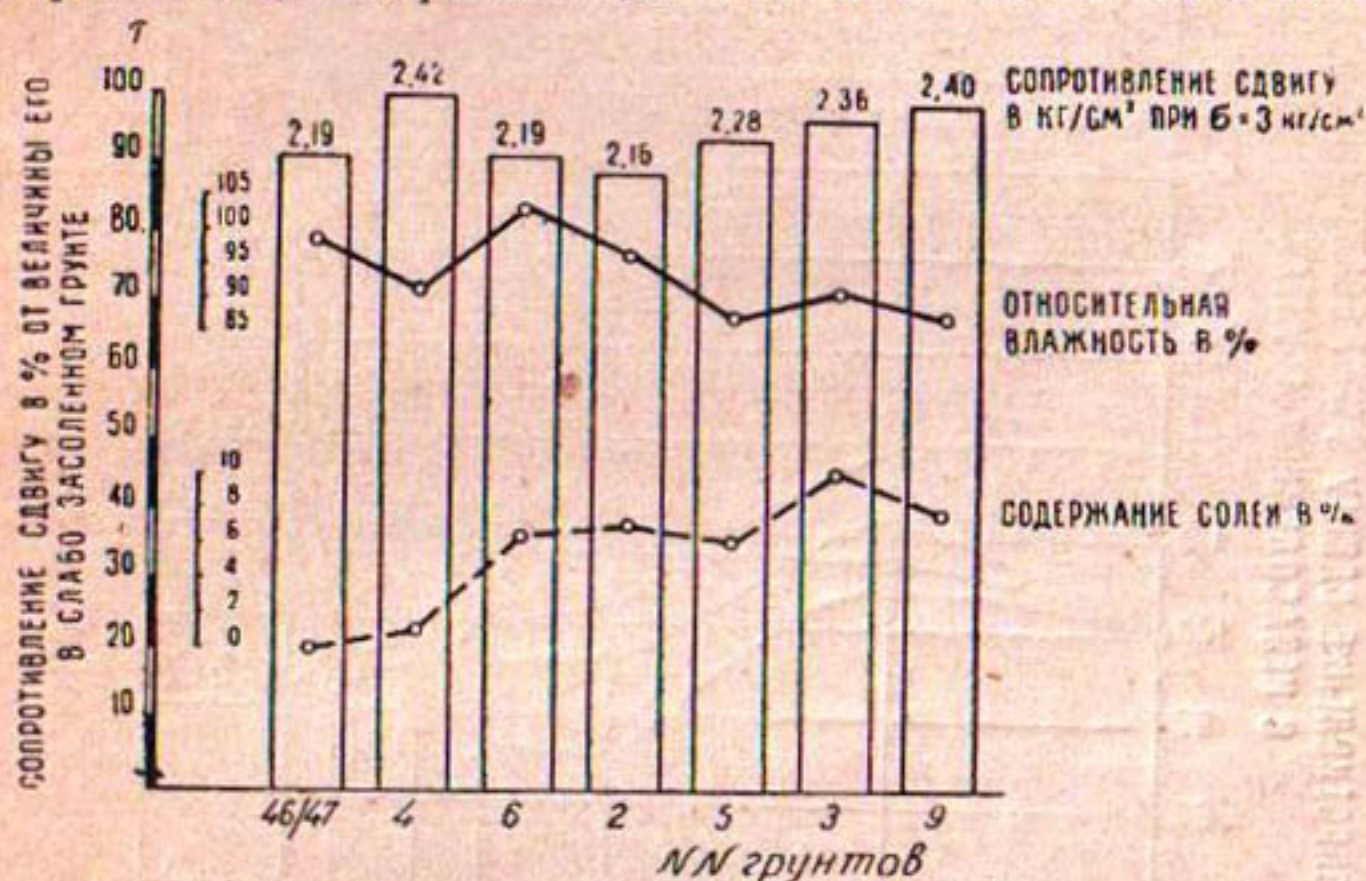
поверхности грунтовых частиц, а также интенсивностью проявления молекулярных сил. Величины трения и сцепления могут изменяться в зависимости от физического состояния грунта: плотности, влажности и прочности структурных агрегатов.



Р и с. 6. Влияние солей на сопротивление лессовидных грунтов сдвигу (при $\sigma = 1 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$).

Растворимые соли, вызывающие дегидратацию и коагуляцию грунтовых частиц, могут влиять и на сопротивление грунтов сдвигу. Исследование последнего в искусственно засоленных грунтах заданного состава позволило установить направление и степень этого влияния. Выявленные закономерности показаны на рис. 6. Наибольшее сопротивление сдвигу наблюдается во всех солевых растворах слабой концентрации (0,1—0,01 N). С повышением ее сопротивление сдвигу падает, достигая минимальной величины в насыщенных солевых растворах, когда в грунтах содержится 3—10% легкорастворимых солей. В смесях, содержащих нерастворившийся остаток соли, сопротивление сдвигу вновь возрастает,

Настоящие закономерности подтверждаются и результатами исследований естественных засоленных грунтов. Из рис. 7 видно, что при наличии легкорастворимых солей сопротивление сдвигу увеличивается в слабозасоленном грунте по сравнению с незасоленным и снижается в сильнозасоленных грунтах; однако это снижение не пропорционально возрастающей степени их засоления. Более



Р и с. 7. Сопротивление сдвигу в естественных засоленных грунтах, содержащих легкорастворимые соли.

значительно снижение в грунтах хлоридного типа засоления (№ 2 и 6), отличающихся от остальных высокой относительной влажностью¹ (следовательно, и меньшей плотностью) и отсутствием в составе твердой фазы грунта нерастворившегося остатка соли. В других, более засоленных, но менее влажных грунтах, имеющих большую плотность, отрицательное влияние солей на сопротивление сдвигу практически сводится к нулю, несмотря на то, что количество их составляет 6—10%.

Данные табл. 5 показывают, что при влажности, не превышающей максимальную молекулярную влагоемкость грунта, то есть при отсутствии в нем свободной воды,

¹ Под относительной влажностью понимается влажность, выраженная в процентах от нижнего предела пластичности данного грунта.

Таблица 5

Влияние солей на сопротивление сдвигу (τ) пылеватой супеси, уплотненной при оптимальной влажности (W)

Состав грунта									
незасоленный грунт		грунт с добавкой гипса		грунт с добавкой сернокислого магния		грунт с добавкой сернокислого натрия		грунт с добавкой хлористого натрия	
$\tau \frac{кг}{см^2}$	$W \%$	$\tau \frac{кг}{см^2}$	$W \%$	$\tau \frac{кг}{см^2}$	$W \%$	$\tau \frac{кг}{см^2}$	$W \%$	$\tau \frac{кг}{см^2}$	$W \%$
1,98 100%	16	2,29 116%	17	2,32 117%	13	2,71 137%	14	2,81 142%	13

растворимые соли значительно повышают сопротивление грунта сдвигу.

Следовательно, сопротивление сдвигу в сильнозасоленных грунтах нельзя рассматривать только в зависимости от степени их засоления; необходимо учитывать особенности структурного сложения засоленных грунтов и степень их увлажнения.

Закономерности, наблюдавшиеся в изменении сопротивления сдвигу в присутствии солевых растворов различной концентрации или в грунтах, содержащих различное количество легкорастворимых солей, можно рассматривать в связи с изменениями состояния коллоидных частиц под влиянием электролитов.

Очень слабые растворы солей являются пептизаторами. С повышением концентрации большинство электролитов оказывает дегидратирующее влияние на коллоидные частицы, а по достижении определенного предела концентрации начинается коагуляция последних.

В процессе пептизации и дегидратации коллоидных частиц активизируется взаимодействие молекулярных сил, увеличивается количество межчастичных контактов и усиливается клеящая способность водноколлоидных пленок на поверхности частиц. Все эти явления должны способствовать повышению сопротивления сдвигу, что и наблюдается в присутствии всех солевых растворов, имеющих концентрацию до 0,1N, а также в слабозасоленном грунте № 4.

При коагуляции коллоидных частиц взаимодействие молекулярных сил сосредоточивается главным образом в сфере каждого структурного агрегата. С укрупнением их уменьшается количество контактов в данном объеме грунта и увеличиваются размеры межагрегатных пор. При влажности, превышающей максимальную молекулярную влагоемкость, коагуляция должна сопровождаться ослаблением межагрегатных связей, следствием чего является снижение прочностных свойств, выраженное тем более резко, чем выше его влажность и чем меньше плотность грунта.

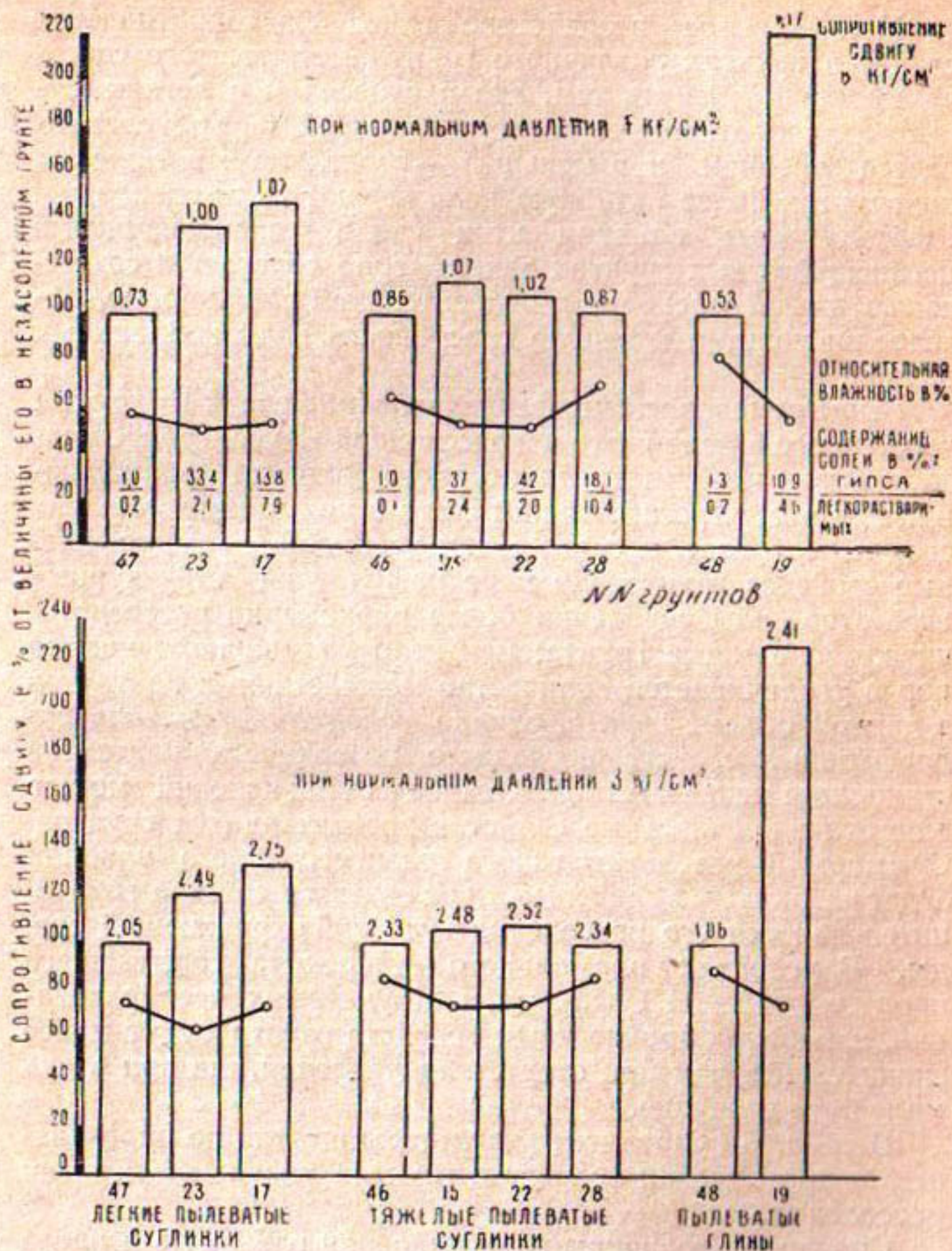
Усиление сопротивления сдвигу в грунтах, не содержащих свободной воды, является следствием повышенной жесткости контактов на дегидратированной поверхности частиц и наличия дополнительных цементационных связей между грунтовыми частицами и кристаллами соли.

Под воздействием электролитов изменяется не только состояние, но и состав водноколлоидных пленок, что также должно соответствующим образом отразиться на их клеящей способности и повлиять на прочность засоленных грунтов. Более конкретно об этом можно было бы судить при наличии экспериментальных данных.

Положительное влияние гипса на сопротивление сдвигу в искусственно засоленных смесях также подтверждается исследованиями естественных гипсированных грунтов. Результаты этих исследований показаны на рис. 8, где сравнивается сопротивление сдвигу гипсированных и незасоленных грунтов близкого гранулометрического состава.

Гипсированные грунты отличаются от незасоленных повышенным сопротивлением сдвигу. Влияние гипса более резко выражено в супеси, в легком пылеватом суглинке и в глинистом грунте; в тяжелых пылеватых суглинках оно проявляется значительно слабее. В более тяжелых грунтах величины сопротивления сдвигу закономерно изменяются в соответствии с относительной влажностью грунтов, в то время как в легких суглинках этой закономерности не отмечено.

Влияние труднорастворимого гипса на сопротивление сдвигу можно объяснить тем, что при наличии этой соли в составе твердой фазы грунта создаются дополнительные цементационные связи между его частицами и увеличивается количество межчастичных контактов в едини-



Р и с. 8. Сопротивление сдвигу в гипсированных грунтах.

це объема. Незначительная часть соли представлена в виде раствора слабой концентрации, вызывающего дегидратацию коллоидных частиц, положительное влияние которой более резко сказывается в дисперсных грунтах.

Неодинаковое воздействие гипса на сопротивление сдвигу в грунтах различного гранулометрического состава можно объяснить тем, что в супесях и в легких суглинках сопротивление сдвигу в большей мере обуславливается трением и в меньшей — сцеплением; в тяжелых же грунтах более активную роль играют силы сцепления. Эффективность влияния этих сил в гипсированных и негипсированных грунтах закономерно сочетается со степенью их дисперсности и относительной влажностью, обуславливающими клеящую способность водноколлоидных пленок.

Выше отмечалось, что выщелачивание солей из грунта, уложенного в зоне ниже депрессионной кривой, сопровождается изменениями их структурного состояния, выражающимися в дезагрегировании грунта и повышении степени его дисперсности, в связи с чем усиливаются гидрофильные свойства грунта. По мере разрушения структурных агрегатов силы сцепления более равномерно рассредоточиваются в массе грунта; при этом уменьшается размер пор и увеличивается количество межчастичных контактов в данном объеме грунта, однако вследствие усиления гидрофильных свойств последнего поверхность контактов становится менее жесткой. Каждое из этих явлений может влиять на прочностные свойства рассоляющихся грунтов. Суммарный результат такого разностороннего влияния будет различным в зависимости от солевого состава грунта, интенсивности его рассоления и условий окружающей среды. В условиях нормального давления, тормозящего процессы солевой суффозии и структурных преобразований, изменения прочностных свойств грунта будут менее значительны, чем при отсутствии давления или при очень малой его величине.

В табл. 6 приводятся результаты опытов по определению сопротивления сдвигу в грунтах различной степени рассоления.

Сравнивая величины сопротивления сдвигу до и после рассоления, можно отметить, что характер изменения этих величин определяется относительной влажностью данного грунта в его исходном состоянии и после рассоления и в меньшей мере зависит от количества вымытых солей. В образцах № 9, 2, 19 и 22, которые до рассоления и после него испытывались при одинаковой или очень близкой относительной влажности, сопротивление сдвигу

Соппротивление сдвигу в засоленных грунтах
до и после их рассоления

№ грунта	Тип засоления	Состояние грунта	Содержан. солей, %	Отн. влажн. (после среза)	Сопр. сдвигу		Условия опыта
					τ $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$	$\frac{v}{v_0}$ от исход.	
4	Смешанный	Исходное	1,3	92	2,42		При $\sigma = 3 \text{ кг/см}^2$
	"	После рас- соления	0,3	100	2,42	100	" "
9	Хлоридно- сульфатный	Исходное	8,0	88	2,40		" "
	"	После рас- соления	1,5	88	2,45	102	" "
2	Сульфатно- хлоридный	Исходное	7,2	97	2,16		" "
	"	После рас- соления	6,0	97	2,25	104	" "
3	Сульфатно- хлоридный	Исходное	10,3	92	2,36		" "
	"	После рас- соления	1,9	100	2,34	99	" "
5	Хлоридно- сульфатный	Исходное	6,4	88	2,28		" "
	"	После рас- соления	4,9	92	2,16	94	" "
6	Сульфатно- хлоридный	Исходное	6,7	104	2,19		" "
	"	После рас- соления	1,7	107	2,04	93	" "
19	Гипсовый с легкорас- твор. солями	Исходное	10,9/4,6 ¹	99	0,92		При $\sigma = 1 \text{ кг/см}^2$
	"	После рас- соления	≈ 14	98	0,98	106	" "
22	Гипсовый	Исходное	42,0/2,3	93	1,65		$\sigma = 2 \text{ кг/см}^2$
	"	После рас- соления	≈ 42	90	1,72	104	" "
22	Гипсовый	Исходное	42,0/2,3	92	2,53		$\sigma = 3 \text{ кг/см}^2$
	"	После рас- соления	≈ 42	97	2,46	97	" "
23	Гипсовый	Исходное	33,4/2,1	80	1,18		" "
	"	После рас- соления	≈ 33	84	1,13	95	$\sigma = 1 \text{ кг/см}^2$
17	Гипсовый с легкорас- твор. солями	Исходное	13,8/7,9	90	2,75		$\sigma = 3 \text{ кг/см}^2$
	"	После рас- соления	≈ 5	107	2,39	87	" "
	"	"	"	150	2,27	82	" "

Примечание. Над чертой показано содержание гипса, под чертой — содержание легкорастворимых солей.

после рассоления было несколько выше, чем до него. Незначительное его снижение (на 3—7% от исходной величины) наблюдалось во всех тех случаях, когда влажность рассоленного грунта была на 3—5% выше, чем в исходном состоянии.

Аналогичные данные приводятся в работе Л. Н. Ломидзе [3]: в результате рассоления грунтов, содержавших 2—14% легкорастворимых солей, угол внутреннего трения снижается не более чем на 7% от его исходного значения; величина сцепления остается без изменения.

Данные табл. 6 показывают, что при большем повышении относительной влажности в рассоленном супесчаном грунте № 17 сопротивление сдвигу снижается на 13—18%; в суглинистых грунтах это снижение может достигать примерно 20—25%.

Заканчивая рассмотрение вопроса о сопротивлении сдвигу в засоленных грунтах, следует еще раз подчеркнуть, что показатели последнего будут определяться не количественным содержанием солей, а их качественным составом и еще в большей мере сложением грунта, его плотностью и влажностью, которые будут зависеть от условий работы засоленного грунта в теле сооружения.

Эти условия могут быть наиболее неблагоприятными, когда небольшая исходная плотность грунта может снижаться в процессе выщелачивания солей или когда будет затруднен отток воды из грунта в зоне ниже депрессионной кривой. В этих случаях устойчивость сооружений, отсыпанных из засоленных грунтов, может быть обеспечена соответствующим усилением откосов, а также мероприятиями, направленными на снижение интенсивности выноса солей током фильтрующейся воды.

При усиленной работе дренирующих устройств и при воздействии нормального давления, уравнивающего достаточно высокую (не ниже 1,7—1,8 т/м³) исходную плотность грунта, наличие растворимых солей не может оказать существенного влияния на снижение прочностных свойств грунта.

Мы располагаем материалами эпизодических наблюдений за состоянием небольшой плотины, отсыпанной из грунтов, содержащих 10% солей. Неудовлетворительное состояние последней в первые два года эксплуатации значительно улучшилось в последующий период. Однако это улучшение нельзя отнести только за счет рассо-

ления грунта; не менее существенное значение имело и понижение депрессионной кривой, наблюдавшееся после устройства гравийной присыпки в основании низового откоса (вместо дренажной призмы).

УПЛОТНЯЕМОСТЬ

При возведении земляных гидротехнических сооружений методом укатки большое практическое значение имеют вопросы, связанные с уплотняемостью грунтов.

Уплотнение грунта происходит за счет разрушения крупных его комьев и более компактного расположения грунтовых частиц и мелких структурных агрегатов в единице объема под воздействием приложенных извне сил. Уплотняемость грунтов можно характеризовать предельной величиной объемного веса, достигаемой в тех или иных условиях уплотнения, и количеством затрачиваемой при этом работы.

Известно, что способность различных грунтов к уплотнению зависит от их гранулометрического и структурного состава, прочности структурных агрегатов, степени увлажнения грунта и способа приложения уплотняющей нагрузки.

Результаты наших исследований, проводившихся на искусственно засоленных лессовидных суглинках, показывают, что уплотняемость последних при воздействии на грунт ударных нагрузок изменяется под влиянием находящихся в них солей. Характер этих изменений определяется степенью растворимости солей и их качественным составом: все легкорастворимые соли повышают способность лессовидных грунтов к уплотнению и снижают пределы оптимальной влажности; особенно активное влияние наблюдается со стороны сернокислого магния — наиболее растворимой из всех солей, образованных двувалентными ионами. Труднорастворимый гипс, наоборот, значительно понижает уплотняемость лессовидных грунтов. То же самое наблюдается и при уплотнении естественных засоленных грунтов различного солевого состава. Результаты этих исследований показаны в табл. 7.

При рассмотрении приведенных данных отмечается неодинаковая уплотняемость слабозасоленного грунта (№ 4) и незасоленного лессовидного суглинка (№ 46), с которыми сопоставляются результаты исследования засо-

Таблица 7

**Результаты опытов по исследованию уплотняемости
в грунтах различного солевого состава**

Объемный вес, в т/м ³ (заданная плотность)	№ грунта	Количество работы (кдж), потребное для достижения заданной плотности, при различной влажности			
		максимальная молекулярная влажность минус 2 %	максимальная молекулярная влажность	нижний предел пластичности	верхний предел пластичности
1,55	4	75	43	28	14
	6	14	14	12	9
	3	7	4,5	5	3,5
	9	7	5	4,7	2,3
	46	15	6	3	1,5
	23	18	12	6	3
	22	17	15	7,5	3
	19	17	16	9,5	—
	17	9	9	5	3
	4	— ¹	90	50	—
1,60	6	22	22	24	—
	3	10	6,5	6,5	—
	9	10	7	5,5	3,5
	46	27	12	7	1,5
	23	33	23	15	—
	22	25	21	14	7
	19	27	25	22	—
	17	13	16	7,5	3
	4	—	—	—	—
	6	52	75	—	—
1,70	3	18	17	—	—
	9	18	15	—	—
	46	53	30	12	—
	23	75	60	—	—
	22	60	45	37	—
	19	45	45	—	—
	17	38	30	13	—
	4	—	—	—	—
	6	—	—	—	—
	3	42	—	—	—
1,80	9	44	—	—	—
	46	—	90	—	—
	23	165	135	—	—
	22	120	70	—	—
	19	105	—	—	—
	17	67	65	—	—
	4	—	—	—	—
	6	—	—	—	—

¹ Заданная плотность не достигается.

ленных грунтов. Следует напомнить, что образцы № 4, 6, 3 и 9 представляют собой аллювиальные наносы низовий Аму-Дарьи, которым свойственны слабо выраженная структурность, отсортированность фракционного состава и окатанная форма частиц, что является причиной пониженной уплотняемости этих грунтов и, особенно, слабозасоленного грунта № 4. Кроме того, в этом, последнем, случае может сказываться пептизирующее влияние со стороны солевого раствора слабой концентрации.



Р и с. 9. Предельная плотность грунтов различного солевого состава и количество работы, потребное для достижения $\sigma = 1,6 т/м^3$ при влажности, равной максимальной молекулярной влагоемкости.

При большом количестве легкорастворимых солей (образцы № 6, 3 и 9) уплотняемость грунтов возрастает (рис. 9); резко снижается количество работы, потребное для достижения любой заданной плотности, и повышаются предельные значения последней. Так, например, для слабозасоленного грунта № 4 это предельное значение — $1,63 т/м^3$, для сильнозасоленных — $1,70—1,77 т/м^3$. Положительное действие легкорастворимых солей на уплотняемость грунтов возрастает с повышением степени их засоления (образцы № 6 и 3), а также в зависимости от качественного состава солей; одинаковая уплотняемость образцов № 3 и 9, содержащих 16 и 10% солей, обуславливается повышенным содержанием в последнем

грунте сернокислого магния (табл. 1) и особенностями его гранулометрического состава, приближающегося к составу оптимальных песчано-глинистых смесей, в которых, благодаря определенному соотношению между количественным содержанием всех фракций, обеспечивается наиболее компактное взаиморасположение частиц.

Известно, что количество работы, потребное для достижения заданной плотности, зависит от влажности грунта.

Из табл. 7 видно, что с повышением влажности грунта до нижнего предела пластичности потребное количество работы уменьшается в два — три раза и эффективность ее в грунтах различной степени засоления становится почти одинаковой. Влажностью грунта не только определяется потребное количество работы, но и ограничивается предельная степень его уплотнения: при влажности, соответствующей нижнему пределу пластичности, объемный вес грунтов различного солевого состава редко превышает $1,65 \text{ т/м}^3$. Положительное влияние легкорастворимых солей на уплотняемость пылеватосуглинистых грунтов сказывается главным образом при влажности, близкой к максимальной молекулярной влагоемкости.

А. Н. Лебедевым [2] и другими исследователями установлено, что максимальная плотность грунтов достигается при определенной «оптимальной» влажности. В незасоленных грунтах оптимальная влажность лежит между максимальной молекулярной влагоемкостью и нижним пределом пластичности; под влиянием легкорастворимых солей оптимальная влажность снижается за пределы максимальной молекулярной влагоемкости.

Возвращаясь к данным табл. 7, рассмотрим уплотняемость гипсированных грунтов (№ 23, 22, 19 и 17). Несмотря на различие их гранулометрического состава и неодинаковое содержание гипса, предельные плотности гипсированных грунтов очень близки между собой и практически не отличаются от плотности незасоленного лессовидного суглинка. Однако для достижения как предельной, так и любой заданной плотности в гипсированных грунтах требуется примерно в два раза большее количество работы по сравнению с незасоленными суглинками. В меньшей степени оно зависит от гранулометрического состава гипсированных грунтов: легче других уплотняется супесчаный грунт (№ 17) и труднее — глинистый (№ 19).

Количество работы, необходимое для получения задан-

ной плотности в гипсированных грунтах, как и в незасоленных, зависит от степени их увлажнения: при влажности, соответствующей нижнему пределу пластичности, потребное количество работы уменьшается примерно в два раза по сравнению с тем, которое затрачивается при влажности, равной или меньшей максимальной молекулярной влагоемкости; при этом предельная плотность грунтов не превышает 1,6—1,7 т/м³.

Повышенную уплотняемость и снижение пределов оптимальной влажности в грунтах, содержащих легкорастворимые соли, можно рассматривать как следствие дегидратации и коагуляции коллоидных частиц под влиянием солевых растворов высокой концентрации: дегидратированные коллоидные частицы, связанные в виде структурных агрегатов, могут быть размещены в данном объеме более компактно и с меньшей затратой работы на их перемещение по сравнению с менее структурными грунтами, частицы которых имеют на своей поверхности более развитые пленки связанной воды.

Необходимость затраты большего количества работы при уплотнении гипсированных грунтов вызывается меньшей удобоподвижностью частиц и структурных агрегатов в присутствии кристаллов гипса, усиливающих внутреннее трение между элементами скелета.

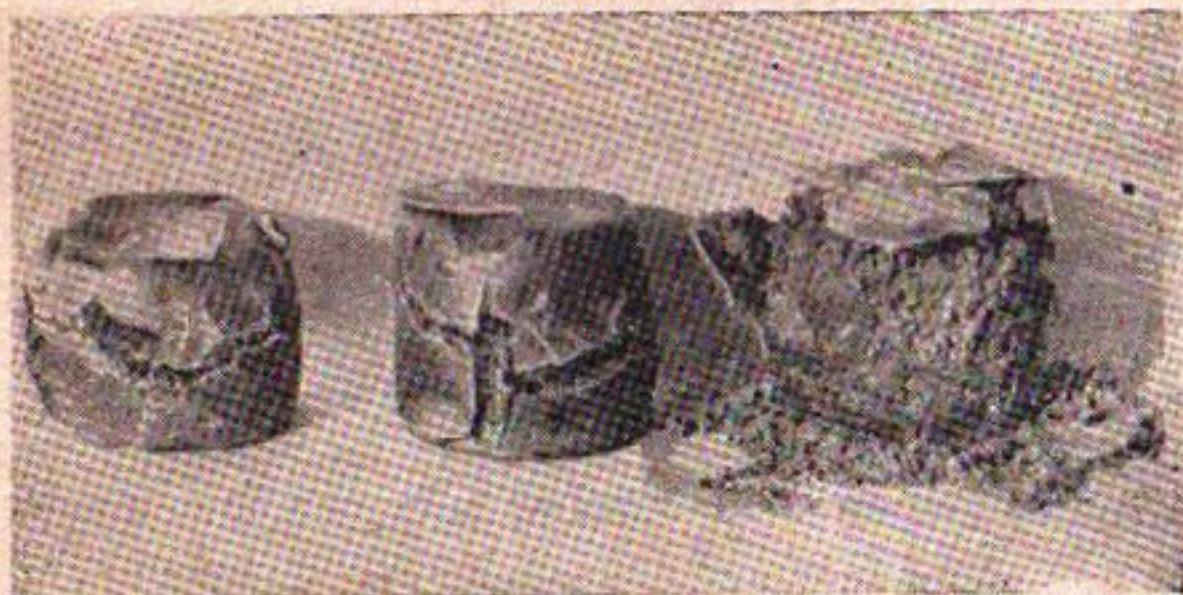
Аналогичный характер влияния легко- и труднорастворимых солей на сжимаемость пылеватосуглинистых грунтов установлен исследованиями Е. Д. Рождественского и А. Н. Обельченко [8]: легкорастворимые соли усиливают процесс компрессионного сжатия; в присутствии труднорастворимого гипса последний протекает с меньшей интенсивностью.

Результаты обследования дамб обвалования на Аму-Дарье, отсыпавшихся без уплотнения из грунтов различного состава, также указывают на то, что чем выше степень засоления грунта, тем более плотным является тело дамбы.

Наряду с положительным влиянием легкорастворимых солей на уплотняемость пылеватосуглинистых грунтов, следует остановиться на явлениях разуплотнения, происходящего в присутствии некоторых солей. Летом на поверхности солончаков сульфатного типа постоянно образуется так называемый «пухляк» — слой сыпучего грунта толщиной 2—5 см, в котором совершенно нарушена связь между структурными микроагрегатами. То же самое наблюдалось

и при лабораторных исследованиях засоленных грунтов: уплотненные образцы при наличии в них сернокислого натрия с течением времени превращались в бесвязную сыпучую массу (начальная и промежуточная стадии этого процесса видны на рис. 10).

Многие соли, встречающиеся в грунтах, содержат в составе своих молекул кристаллизационную воду; например, в сернокислом натрии может удержаться до 10 молекул воды, которая начинает интенсивно удаляться при температуре выше 30° . Процесс обезвоживания соли сопровождается перестройкой кристаллической решетки



Р и с. 10. Разуплотнение грунта, содержащего сернокислый натрий.

молекулы, уменьшением ее объема и нарушением связей между кристаллами соли и грунтовыми частицами или их агрегатами; в результате этих явлений и происходит разрушение монолитных образцов грунта или образование «пухляка» на поверхности сульфатных солончаков.

УСАДОЧНЫЕ СВОЙСТВА

Монолитность грунта в теле земляных гидротехнических сооружений может нарушаться в результате появления в нем усадочных трещин. Известно, что испарение влаги сопровождается усадкой (сжатием) грунта. Чем больше разница между скоростью испарения воды с поверхности грунта и подтягиванием ее из более глубоких слоев, тем неравномернее будут напряжения сжатия в различных точках грунтового монолита, в результате чего и могут появляться усадочные трещины.

Усадочные свойства грунтов (величина усадки и характер ее протекания) зависят от плотности грунта, его гранулометрического состава (главным образом от степени дисперсности), количества содержащейся в грунте воды, а также от ряда внешних причин, ускоряющих испарение.

Исследования, проводившиеся на искусственных смесях лессовидных суглинков с различными солями, показывают, что легкорастворимые соли тормозят развитие усадочного процесса и снижают конечную величину линейной усадки. Более растворимые соли — хлористый натрий и сернокислый магний оказывают наиболее активное влияние, которое усиливается с повышением дозировки соли.



Р и с. 11. Линейная усадка (при исходной влажности, равной верхнему пределу пластичности).

Эти положения подтверждаются и результатами исследования естественных засоленных грунтов (рис. 11). В грунтах близкого гранулометрического состава величина линейной усадки тем меньше, чем выше содержание солей. Количество испарившейся воды в засоленных грунтах меньше по сравнению с незасоленными грунтами, а процесс испарения воды более продолжителен. Влажность предела усадки в сильнозасоленных грунтах возрастает до 5—7 и даже до 10%, против 1—2% в незасоленных или слабозасоленных.

Усадочные свойства пылеватосуглинистых грунтов, подавляемые под влиянием легкорастворимых солей, восстанавливаются после их выщелачивания: снижается влажность предела усадки, повышается величина ее и возрастает скорость развития усадочных явлений.

Механические анализы засоленных грунтов показывают, что после рассоления резко возрастает содержание тонкодисперсных частиц за счет разрушения структурных микроагрегатов. Учитывая, что степень дисперсности грунта влияет на его усадочные свойства, можно прийти к выводу, что уменьшение величины усадки в засоленных грунтах вызывается понижением активности коллоидных частиц, находящихся в свернутом состоянии. Имеет значение и меньшее количество воды, испаряющееся из засоленных грунтов.

Замедленный процесс водоотдачи в засоленных грунтах можно объяснить пониженной упругостью паров солевых растворов. При этом скорости испарения воды и подачи ее из глубоких слоев к испаряющей поверхности выравниваются, напряжения сжатия в различных точках грунта становятся более равномерными; благодаря этому устанавливается более спокойное развитие процесса усадки и исключается или значительно уменьшается возможность образования усадочных трещин [1].

Результаты лабораторных исследований подтверждаются наблюдениями за состоянием дамб обвалования в низовьях Аму-Дарьи: на участках, отсыпанных из грунтов хлоридного типа засоления, дамбы имеют более монолитное сложение по сравнению с незасоленными грунтами, изобилующими трещинами, небольшими пустотами и ходами землероев. Развитию подземной фауны благоприятствуют усадочные трещины, появляющиеся при быстром просыхании незасоленных грунтов и улучшающие условия аэрации в теле дамбы.

Грунты сульфатного типа засоления менее благоприятны для отсыпки дамб обвалования; поперечный профиль последних ежегодно «срабатывается» на 2—3 см в результате развевания рыхлого слоя грунта («пухляка»), образующегося на откосах и гребне дамбы в летние месяцы.

Исследование гипсированных грунтов показывает, что гипс не влияет на интенсивность развития усадочных явлений, но незначительно снижает конечную величину усадки. В данном случае влияние гипсовых кристаллов можно сравнивать с влиянием инертных песчаных фракций, снижающих относительное содержание активных тонкодисперсных частиц и вызывающих более рассредоточенное распределение их в системе скелета.

НАБУХАНИЕ

Некоторые явления, характеризующие поведение грунтов в гидротехническом сооружении, обуславливаются большей или меньшей способностью их к набуханию. Интенсивное или неравномерное набухание грунта может привести к возникновению неравномерных напряжений в грунтовом массиве и образованию деформаций вспучивания, трещин расслаивания и даже к разрушению отдельных элементов сооружения (бетонных труб, подпорных стенок). С другой стороны, набухание может иметь и положительное значение, когда в результате его происходит смыкание усадочных трещин и восстанавливается монолитность грунтового массива или уменьшается размер активных пор, вследствие чего снижается фильтрационная способность грунта.

Набухание зависит от минералогического состава и степени дисперсности грунта, емкости поглощения и состава поглощенных оснований и от состава и концентрации солевых растворов в грунтовых порах, то есть от тех причин, которые определяют возможность более или менее интенсивного развития гидратных оболочек на грунтовых частицах.

Результаты наших исследований показывают, что в концентрированных солевых растворах, вызывающих коагуляцию коллоидных частиц, набухание засоленных грунтов протекает менее интенсивно, чем в дистиллированной воде; противоположный эффект наблюдался в растворах соды вследствие ее пептизирующего влияния, а также в растворах хлористого натрия высокой концентрации, что, вероятно, можно объяснить изменением состава поглощенных оснований.

На рис. 12 представлены данные, характеризующие набухание в естественных засоленных грунтах различного состава.

Сопоставление этих данных показывает, что величина набухания в основном определяется степенью дисперсности исследованных грунтов; при одинаковом или близком содержании частиц мельче 0,001 мм величина набухания тем меньше, чем выше содержание легкорастворимых солей. Отклонения от этой общей зависимости имеют место в образцах № 2 и 4; образец № 2 набухает сильнее, чем образец № 5 (при одинаковой степени дис-

персности и общем содержании легкорастворимых солей в обоих грунтах, но при значительном преобладании в образце № 2 хлористого натрия над другими солями); образец слабозасоленного грунта № 4 при меньшей степени дисперсности, по сравнению с незасоленным грунтом № 46, более подвержен набуханию.



Р и с. 12. Зависимость набухания от степени дисперсности и содержания легкорастворимых солей.

Гипс, в отличие от легкорастворимых солей, не оказывает активного влияния на способность грунтов к набуханию.

Пониженная способность к набуханию в грунтах, содержащих большое количество легкорастворимых солей, восстанавливается после их вымывания (табл. 8).

В слабозасоленном образце № 4 после его рассоления степень набухания уменьшилась, в то время как во всех остальных случаях наблюдается увеличение набухания тем в большей степени, чем сильнее оно было подавлено при наличии легкорастворимых солей.

Как отмечалось выше, набухание происходит вследствие развития гидратных оболочек на поверхности грунтовых частиц и зависит от степени дисперсности грунта. Подавление этого процесса в присутствии легкорастворимых солей происходит в результате уменьшения толщины

Набухание грунтов до и после рассоления

№ грунта		3	6	9	4
набухание в %	до рассоления	3	7	3	14
	после рассоления	13	12	6	9

гидратных оболочек и активной удельной поверхности грунта в среде солевых растворов высокой концентрации.

Отличное поведение образца № 2 с высоким содержанием хлористого натрия можно рассматривать как следствие обменных реакций, направленных в сторону увеличения содержания поглощенного натрия и вызывающих повышение гидрофильности грунта.

Все исследованные свойства слабозасоленного грунта № 4 (повышенные значения пределов пластичности и снижение их в рассоленном грунте, пониженная способность к уплотнению под воздействием ударных нагрузок, повышенное набухание и снижение его после рассоления) позволяют считать, что все эти свойства являются следствием пептизирующего влияния слабых солевых растворов определенной концентрации.

В заключение следует отметить, что ни одно из исследованных свойств грунтов, содержащих до 16% легкорастворимых солей и до 37% гипса, не ухудшается под влиянием последних настолько, чтобы нельзя было использовать засоленные грунты в качестве строительных материалов для возведения земляных гидротехнических сооружений; в ряде случаев отмечается даже положительное влияние солей на свойства пылеватосуглинистых грунтов — повышение уплотняемости, снижение величины усадки и набухания в присутствии легкорастворимых солей, усиление сопротивления сдвигу под влиянием гипса.

Основные же свойства засоленных грунтов, используемые в качестве расчетных характеристик при проекти-

ровании сооружений (сопротивление сдвигу, коэффициент фильтрации), определяются не столько количественным содержанием солей, сколько их качественным составом и условиями работы грунта в теле сооружений.

Эти условия могут быть наименее благоприятными в сооружениях малой высоты (в дамбах), где в процессе солевой суффозии возможно разуплотнение грунтов, а в связи с этим усиление фильтрационной способности в два — семь раз и понижение сопротивления сдвигу в пределах до 10 — 25 % по сравнению с их исходными величинами (до рассоления); при этом максимальное снижение сопротивления сдвигу, относящееся к гипсированным грунтам, почти не выходит за пределы той повышенной прочности, которой обладают более легкие разности этих грунтов по сравнению с незасоленными лессовидными суглинками.

Устойчивость сооружений, отсыпанных из засоленных грунтов, может быть обеспечена усилением их поперечного профиля. В отдельных случаях могут быть предусмотрены простейшие мероприятия, направленные на снижение интенсивности фильтрации и выщелачивания солей (кольматирование откосов, устройство антифильтрационного зуба в основании сооружений и др.). Что касается грунтов с преобладающим высоким содержанием сернокислого натрия, способствующего образованию «пухляка», то необходимо при проектировании поперечного профиля предусматривать запасы на возможность ежегодного развевания с гребня и откосов дамб поверхностного слоя толщиной до 3 см.

В более крупных сооружениях процессы солевой суффозии будут протекать с меньшей интенсивностью, и плотность грунта будет оставаться сравнительно постоянной благодаря воздействию на грунт нормального давления. При таком условии и при нормальной работе дренажных устройств растворимые соли, а равным образом и процесс их выщелачивания не будут оказывать существенного отрицательного влияния на прочностные свойства грунтов.

При возведении или ремонте сооружений решающее значение имеет качество выполненных земляных работ, обеспечивающее необходимую плотность засоленных грунтов (в дамбах — не ниже $1,6 \text{ т/м}^3$, в смачиваемой зоне плотин не ниже $1,7 — 1,8 \text{ т/м}^3$) и более или менее

равномерное распределение солей в грунтовом массиве.

При уплотнении всех гипсированных грунтов, особенно тяжелосуглинистых, следует учитывать, что для достижения заданной плотности требуется затратить работу в два — три раза большую по сравнению с незасоленными грунтами.

Учитывая все изложенное, можно рекомендовать следующие нормы допустимого содержания солей в пылеватосуглинистых грунтах, предназначенных для возведения земляных гидротехнических сооружений методом укатки.

Для отсыпки несмачиваемых элементов земляных гидротехнических сооружений могут применяться любые засоленные грунты, независимо от степени и качественного состава засоления.

Более ответственные элементы сооружений, расположенные ниже депрессионной кривой или в зоне ее влияния, могут отсыпаться из грунтов, содержащих до 10% легкорастворимых солей или до 20% гипса, а также из грунтов смешанного типа засоления, содержащих до 20% гипса и до 5% легкорастворимых солей.

ВЫВОДЫ

1. Растворимые соли оказывают существенное влияние на строительные свойства грунтов. Характер и степень этого влияния в меньшей мере зависят от количественного содержания солей, а главным образом от качественного состава солей, гранулометрии грунтов и условий их работы в земляных гидротехнических сооружениях.

2. Воздействие легкорастворимых солей приводит к изменению структурного состояния и степени гидрофильности грунтов под влиянием солевых растворов различной концентрации; труднорастворимый гипс, находящийся в составе твердой фазы грунта, усиливает свойства, присущие его скелетным фракциям.

3. Явления пептизации, происходящие в очень слабых растворах солей, приводят к повышению пределов пластичности, незначительному усилению сопротивления сдвигу, ухудшению уплотняемости и к увеличению набухания.

Дегидратация и коагуляция коллоидных частиц в присутствии растворов солей высокой концентрации вызывают снижение пределов пластичности, повышают уплот-

няемость грунтов в условиях оптимальной влажности и подавляют развитие усадочных явлений и набухания. Сопротивление сдвигу в сильнозасоленных грунтах (содержащих до 10% солей) зависит главным образом от плотности и влажности: в водонасыщенных грунтах при плотности ниже $1,7 \text{ т/м}^3$ сопротивление сдвигу на 10—15% ниже по сравнению с незасоленными; при плотности выше $1,7 \text{ т/м}^3$ легкорастворимые соли, независимо от их количества, почти не влияют на величину сопротивления сдвигу; при влажности, не превышающей максимальную молекулярную влагоемкость, и при плотности не ниже $1,6 \text{ т/м}^3$ сопротивление сдвигу увеличивается на 20—40% по сравнению с незасоленными грунтами.

Гипс усиливает сопротивление сдвигу, затрудняет уплотняемость грунтов и незначительно снижает величину усадки.

4. Фильтрация воды через засоленные грунты нарушенного сложения и явления солевой суффозии приводят к изменениям структурного сложения и гидрофильных свойств рассоляющихся грунтов.

Эти изменения обуславливают восстановление тех свойств, которые в среде концентрированных солевых растворов находились в подавленном состоянии, — повышаются пределы пластичности, возрастают величины набухания и усадки. Сопротивление сдвигу в рассоляющихся грунтах будет определяться их плотностью и влажностью, зависящими от условий работы грунта в теле сооружения.

5. Процессы фильтрации и солевой суффозии находятся в тесной взаимосвязи и зависят от внешних условий.

При работе грунтов в условиях, свободных от давления вышележащего массива, фильтрационно-суффозионный процесс сопровождается разуплотнением грунта и характеризуется более интенсивным развитием, чем при наличии нормального давления.

В этом случае фильтрационно-суффозионному процессу сопутствует осадка грунта, в значительной степени компенсирующая увеличение пористости при выщелачивании солей и обуславливающая пониженную интенсивность фильтрационно-суффозионного процесса.

6. Фильтрационно-суффозионный процесс динамичен во времени; динамика эта определяется характером засоления грунтов и условиями работы их в сооружении.

Фильтрационная способность грунтов, содержащих легкорастворимые соли (хлориды и сульфаты) и находящихся под давлением, с течением времени снижается; при отсутствии давления в хлоридных солончаках этот процесс постепенно затухает, а в сульфатных — возрастает.

Фильтрационная способность гипсированных грунтов, независимо от условий работы их в сооружении, на первых этапах фильтрационно-суффозионного процесса возрастает, а затем снижается, стремясь к постоянной величине.

Динамичность фильтрационной способности гипсированных грунтов зависит от величины напорного градиента: чем выше последний, тем резче по величине и быстрее во времени происходят изменения коэффициента фильтрации грунтов.

Коэффициент фильтрации в засоленных грунтах на различных стадиях солевой суффозии колеблется в пределах $n \times 10^{-6} \div n \times 10^{-5}$ см/сек, свойственных и незасоленным грунтам соответствующего гранулометрического состава.

7. Динамичность процесса солевой суффозии определяется в основном характером засоления грунтов.

В грунтах, содержащих легкорастворимые соли, наибольшая активность этого процесса отмечается на первых стадиях фильтрации; с течением времени интенсивность его снижается независимо от развития фильтрационного процесса.

В гипсированных грунтах развитие процесса солевой суффозии прямо пропорционально количеству выщелоченного гипса и объему профильтровавшейся через грунт воды.

8. Осадка засоленных грунтов под нагрузкой, сопровождающая фильтрационно-суффозионный процесс, ни по величине, ни по динамичности своего развития не может стать причиной резких просадок грунта, способных нарушить монолитность сооружения.

9. Результаты исследования строительных свойств засоленных грунтов указывают на необходимость пересмотра существующих Технических условий в части регламентируемых ими норм допустимого содержания солей в грунтах, предназначенных для возведения земляных гидротехнических сооружений.

Применительно к сооружениям, возводимым способом укатки, рекомендуются следующие нормы:

А. Для отсыпки элементов сооружения, расположенных ниже депрессионной кривой или в зоне ее влияния, допускается использование грунтов, содержащих до 10% легкорастворимых солей или до 20% гипса, а также грунтов смешанного типа засоления, содержащих до 20% гипса и до 5% легкорастворимых солей.

Б. Несмачиваемые элементы сооружений могут отсыпаться из различных грунтов, независимо от степени и характера их засоления.

10. При использовании засоленных грунтов как строительных материалов решающее значение имеют качество укладки грунта в тело сооружения и нормальная работа дренирующих устройств. При проектировании сооружения, в случаях необходимости, могут быть предусмотрены простейшие мероприятия, направленные на повышение устойчивости грунта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антипов-Каратаев И. Н. Общие закономерности взаимодействия глин и почв с электролитами. Труды Почвенного института им. Докучаева, том XX, 1939.

2. Лебедева А. Н. Уплотнение грунтов при различной их влажности, Стройвоенмориздат, 1947.

3. Ломидзе Л. Н. Измерение строительно-технических свойств грунта при фильтрации через него воды, Известия Тбилисского научно-исследовательского института сооружений и гидроэнергетики, 5, 1953.

4. Морозов А. Т. Динамичность коэффициента фильтрации почво-грунтов в связи с выщелачиванием воднорастворимых солей, Труды Института гидротехники и мелиорации, т. 12, 1935.

5. Приклонский В. А. Общее грунтоведение, 1950.

6. Рождественский Е. Д. Химическое нормирование лёссовых и лессовидных грунтов как строительного материала для земляных гидротехнических сооружений, Известия АН УзССР, № 2, 1953.

7. Рождественский Е. Д. и Обельченко А. Н. Влияние солевого комплекса на характерные влажности лессовидных грунтов, Труды Института сооружений АН УзССР, вып. II, 1951.

8. Рождественский Е. Д. и Обельченко А. Н. Влияние воднорастворимых солей на процесс сжатия лессовидных грунтов, Труды Института сооружений АН УзССР, вып. 5, 1954.

9. Терлецкая М. Н. Суффозионная устойчивость засоленных гипсом грунтов в гидротехнических сооружениях, ГрузНИИГИМ, Труды, сборник 2(15), 1951.

10. Технические условия и Нормы проектирования гидротехнических сооружений, Главгидроэнергострой, 1941.

11. Технические указания по сооружению земляного полотна. Трансжелдориздат, 1947.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Пределы пластичности	10
Динамика фильтрационных свойств в процессе солевой суффозии	12
Сопротивление сдвигу	22
Уплотняемость	31
Усадочные свойства	36
Набухание	39
Выводы	43
Литература	47



АННА ИВАНОВНА ГРОТ,
ВАЛЕРИЯ ПАВЛОВНА ШУЛЬГИНА

СТРОИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЗАСОЛЕННЫХ ГРУНТОВ

Редактор А. К. Муракаева

Техредактор Ф. Рахматуллин
Корректор С. А. Петунина

Сдано в набор 14/II 1956. Подписано к печати 12/IV 1956. Формат 84×108^{3/32}—
1,5 п/л. — 2,46 усл. п. л. Учет-изд. л. 2,6. Тираж 2000. Р 02951. Государственное
издательство УзССР. Ташкент. Полиграфическая ул., 74. Индекс: н/т.

Типография № 1 Узглавиздата Министерства культуры УзССР. Ташкент.
ул. Хамзы, 33. Заказ № 546.