

СССР—НКВД ГУШОСДОР
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ФИЛИАЛ
ДОРОЖНОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА
—Д О Р Н И И—

Проф. В. В. ОХОТИН

ФИЗИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ

В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА
И СТЕПЕНИ ДИСПЕРСНОСТИ

ИЗДАНИЕ ГУШОСДОРА

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Предисловие	5
Введение	6
Сыпучие грунты	
Пористость	9
Фильтрация	23
Капиллярные явления в грунтах	26
Трение в сыпучих грунтах	29
Угол естественного откоса	29
Коэффициент внутреннего трения в грунтах	30
Трение во фракциях окатанного кварца	33
Трение во фракциях остроугольного кварца	39
Трение во фракциях полевого шпата	44
Трение во фракциях слюды	46
Трение в смесях	51
Трение в смеси остроугольного кварца со слюдой	51
Трение в смеси с малой пористостью	53
Способность грунтов удерживать битумы	55
Связные грунты	
Удельная поверхность грунтов	60
Метод определения максимальной гигроскопичности грунтов	62
Определение удельной поверхности грунтов по их гигроскопичности	66
Характеристика «активной» поверхности грунтов по набуханию	73
Влияние активной поверхности на физические свойства грунтов	80
Трение и сцепление в связных грунтах	81
Временное сопротивление сжатию грунта в зависимости от условий уплотнения	90
Влияние обменных оснований на физические и механические свойства грунтов	95
Заключение	114

65870

04

Редактор А. Погарский

Мособлгортит № Б-3581

Сдано в набор 11/IV—1937 г.

Размер бумаги 62×94 1/16

Техредактор Н. Ф. Мартюков

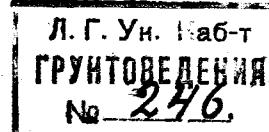
Заказ № 18440

Подписано к печати 8/IX—1937 г.

7 1/2 печ. л.

48144 зн. в п. л.

1-я типография Транскелдориздата, Москва Б. Переяславская, 46.



ПРЕДИСЛОВИЕ

Большая часть экспериментов по настоящей работе была проведена мною в грунтовой лаборатории Центрального дорожного научно-исследовательского института (ЦДОРНИИ).

Ближайшими моими помощниками были Г. Ф. Богданов, В. Л. Демидов и А. И. Кульбинская. В. Л. Демидовым кроме тех разделов, по которым участие его отмечено в тексте, был выполнен ряд опытов для выяснения влияния обменных оснований на механические свойства грунтов. Г. Ф. Богдановым проведены опыты по вопросу трения и сцепления в связных грунтах и А. И. Кульбинской — опыты по определению способности грунтов удерживать битумы.

В 1936 г. экспериментальные работы, в части изучения физико-механических свойств сыпучих грунтов, проводились на кафедре грунтоведения Института земной коры при Ленинградском государственном университете.

В проведении опытов приняли участие Ш. Ф. Бутц по определению коэффициента фильтрации, И. М. Шерстобитов по определению пористости, Е. М. Лазаревская, Г. Г. Тюменев и Н. А. Борисов по определению коэффициента внутреннего трения.

При оформлении работы мною были получены ценные указания от М. И. Сумгина.

Всем вышеуказанным лицам приношу глубокую благодарность.

В. Охотин

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия вследствие запросов строительства появился среди исследователей большой интерес к изучению грунтов и, прежде всего, тех их свойств, которые влияют на устойчивость сооружений. При изучении строительных свойств грунтов отчетливо выяснилось, что они существенным образом обусловливаются физическими и механическими свойствами. Пластичность, прилипание, усадка, временное сопротивление сжатию, коэффициент внутреннего трения являются важными характеристиками грунта как строительного материала.

Отдельные физические и механические свойства грунтов, степень их выраженности находятся между собой в тесной связи. Так например, высокопластичные грунты всегда обладают большой липкостью, большим временным сопротивлением сжатию, сильно набухают в воде и т. д.

Из наличия тесной связи между отдельными свойствами вполне естественно вытекает стремление к установлению того, какие из них являются основными, характеризующими природу грунта, и какие функциональными.

Деление свойств грунтов на основные и функциональные является весьма важным вопросом с точки зрения методики исследования грунтов. Зная основные свойства грунтов и степень их влияния на функциональные, можно по основным свойствам с большой степенью достоверности предсказывать функциональные свойства. В то же время создание научно-обоснованной классификации грунтов возможно только тогда, когда известны их основные свойства, ибо всякая рациональная классификация должна базироваться на совокупности основных свойств, присущих классифицируемым объектам.

В почвенной и грунтоведческой литературе уже имеются попытки к разделению свойств грунтов на эти две категории. Так, проф. С. Захаров (курс почвоведения) к основным свойствам относит удельный и объемный вес, пористость, связность, пластичность и к функциональным — водопроницаемость, водоподъемную способность и тепловые свойства.

При выделении основных свойств, нам кажется, нужно отнести к ним те, которые обусловливают собой наличие других свойств и в то же время являются независимыми от последних. К таким основным свойствам мы относим гранулометрический состав, минералогический состав и

химизм грунтов, понимая под последним, в первую очередь, способность грунтов к реакциям взаимного обмена, величину и характер оснований, обуславливающих эти реакции. Так, если взять свойство пластичности, то оно, как уже в настоящее время с несомненностью выяснено, зависит от гранулометрического состава грунта: пески являются непластичными, тогда как в тонкодисперсных глинах это свойство выражено в наивысшей степени. Не в меньшей степени от гранулометрического состава выявлена зависимость связности, прилипания, усадки и других свойств.

Зависимость физико-механических свойств грунтов от их гранулометрического состава обусловливается тем, что всякий грунт представляет собой многофазную дисперсную систему, общая же энергия всякой дисперсной системы слагается из внутренней энергии и поверхностной. Поверхностная энергия пропорциональна удельной поверхности дисперсной фазы и величина ее тем больше, чем мельче раздроблена эта фаза. Поверхностная энергия, как свободная энергия, может совершать работу, отсюда — чем большей поверхностной энергией будет обладать грунт, тем в большей степени будут в нем выявлены свойства, обусловленные этой энергией, как например, пластичность, прилипание и др.

Не менее ясна зависимость физико-механических свойств от минералогического состава. Различные минералы обладают разной формой, твердостью, упругостью, поэтому грунты из разных минералов должны обладать и неодинаковыми свойствами, при тождестве всех других условий. Однако это различие, ясное в крупночастичных грунтах, должно постепенно сглаживаться с увеличением степени дисперсности, если принять во внимание, что в природе частицы грунтов покрыты пленкой воды. Значение пленки воды, ничтожное в крупнозернистом материале, будет увеличиваться с уменьшением диаметра частиц; пленка воды, обладая определенной толщиной, будет нивелировать формы различных минералов. Положим, имеется пластинка слюды с отношением наибольшего и наименьшего диаметров 10:1. При условии, что малый диаметр имеет толщину, во много раз большую толщины водной пленки (это будет иметь место, когда частицы крупные), наличие последней почти не изменит соотношений между диаметрами системы — частица + водная пленка, т. е. не будет влиять на форму. Совсем другое получится, когда диаметры слюды будут близки к толщине водной пленки. Положим, что меньший диаметр пластинки слюды в 3 раза тоньше водной пленки. При этом условии, если соотношение диаметров частицы останется прежним, т. е. 10:1, соотношение диаметров системы — частица + водная пленка будет другим, а именно, оно будет 16:7, т. е. форма этой системы ближе к шару, чем форма самой частицы. Отсюда можно думать, что при высокой степени дисперсности частиц грунтов более важное значение в отношении физико-механических свойств имеет величина их поверхности и меньшее — форма частиц, тогда как в грубодисперсных грунтах с изменением их размеров, абсолютные величины поверхности остаются очень малыми, и поэтому значение поверхности в них небольшое. Точно так же с увеличением дисперсности грунтов должно падать в них и значение свойства упругости. Крупные частицы, обладающие большой упругостью, при внешних на них воздействиях, легко изменяют свою форму

и свое взаимное расположение и, благодаря этому, могут обуславливать большие деформации грунта. Разница же в размерах очень малых частиц в различных направлениях сглаживается, взаимное положение одной частицы относительно другой становится более безразличным, а поэтому и деформации грунтов будут меньшими.

Влияние обменных оснований самих по себе на физико-механические свойства грунтов до настоящего времени еще не выяснено. Можно считать твердо установленным, что с изменением состава поглощенных оснований свойства грунтов резко изменяются; так например, грунт, насыщенный кальцием, являющийся по своим свойствам суглинком, при насыщении его натрием, превращается в тяжелую глину. Однако, здесь зависимость сложная — с изменением состава обменных оснований в грунтах изменяется в последних и степень дисперсности, и потому вопрос остается нерешенным, что же влияет и в какой степени на свойства грунта: изменение ли дисперсности, или же обменного основания, а если влияют оба фактора, то в какой степени каждый из них.

В своей работе мы сделали попытку выяснить, как влияет на физические и механические свойства грунтов их минералогический состав, дисперсность и обменные основания.

СЫПУЧИЕ ГРУНТЫ

При изучении физических и механических свойств сыпучих грунтов мы стремились выяснить влияние на эти свойства минералогического и гранулометрического их состава и формы частиц. В этих целях были взяты минералы — кварц, слюда (мусковит) и полевой шпат (ортоклаз), как составляющие основную часть природных грунтов. Минералы были взяты в кусках и дробились ударами. При рассмотрении полученных фракций в микроскопе оказалось, что все они делились в основном по плоскостям спайности, и форма частиц, присущая каждому минералу, сохранилась во всех фракциях, включая и самую мелкую — 0,06—0,01 мм. Попытка измельчать минералы в шаровой мельнице не привела к удовлетворительным результатам, так как во время дробления остругольные грани частиц сглаживались, и в результате получалась большая окатанность частиц. Окатанным кварцем при испытаниях служил песок, привезенный с реки Саблинки. Так как в этом песке имелись только фракции $< 0,5$ мм, то для получения более крупных был взят вольский песок. Все материалы были разделены тщательным просеиванием на ситах на фракции 2—1; 1—0,5; 0,5—0,25; 0,25—0,1 и 0,1—0,06 мм, фракция же 0,06—0,01 мм была получена отмыванием. Во всех полученных фракциях были определены пористость, коэффициент фильтрации, высота капиллярного поднятия, угол естественного откоса, коэффициент внутреннего трения и в некоторых — способность удерживать битумные вещества.

Пористость

Пористость грунтов есть величина непостоянная, она сильно изменяется от степени уплотнения, поэтому нами определялись только крайние пределы — пористость в рыхлом состоянии и пористость в уплотненном состоянии. При определении пористости в рыхлом состоянии грунт насыпался в измерительный цилиндр через воронку, укрепленную в штативе, носик которой находился на расстоянии 20 см от дна цилиндра.

В уплотненном состоянии пористость грунтов определялась как в измерительном цилиндре, так и в плоскодонном колбообразном пикнометре. Уплотнение производилось постукиваниями резинового молоточка о боковые стенки сосуда и заканчивалось каждый раз после того, когда грунт переставал изменять свой объем. При определении пористости в измерительном цилиндре и пикнометре, как будет видно из нижеприведенных таблиц, величины пористости получаются неодинаковые, в пикнометре в большинстве случаев пористость была меньше.

При определении пористости отдельных фракций окатанного кварца в рыхлом состоянии средняя ошибка не превосходила 1,32 и в уплотненном состоянии — 0,7%. Цифры пористости окатанного кварца приводятся в таблице 1.

Таблица 1

Диаметр фракций в мм	Пористость в % %		
	Рыхлое состо- яние	Уплотненное состояние	
		в цилиндре	в пикнометре
2—1	36,06	33,40	—
1—0,5	36,30	33,63	34,09
0,5—0,25	39,66	33,42	33,76
0,25—0,1	44,80	34,35	33,66
0,1—0,06	44,53	39,60	35,93

Рассматривая цифры пористости в рыхлом состоянии, можно заметить, что с уменьшением диаметра фракций пористость постепенно увеличивается, что же касается пористости в уплотненном состоянии, то она имеет почти одинаковую величину, примерно равную 34% для всех фракций за исключением самой мелкой 0,1—0,06мм, в которой пористость на 2% больше. Как известно, пористость идеальных шаров в наиболее плотном состоянии, когда они располагаются так, что один находится над четырьмя другими, равна 25,95 %. Сравнивая пористость в наиболее уплотненном состоянии частиц окатанного кварца с пористостью шаров, видим, что она значительно больше, отсюда можно заключить, что форма частиц значительно отличается от формы шара.

Пористость остроугольного кварца, полученного дроблением кусков, значительно больше таковой окатанного, как это видно из таблицы 2, причем она постепенно увеличивается как в рыхлом, так и в уплотненном состоянии с уменьшением размеров фракций.

Таблица 2

Диаметр фракций в мм	Пористость в % %		
	Рыхлое состо- яние	Уплотненное состояние	
		в цилиндре	в пикнометре
2—1	47,63	37,9	37,39
1—0,5	47,10	40,61	38,79
0,5—0,25	46,98	41,09	40,08
0,25—0,1	52,47	44,82	42,62
0,1—0,06	54,60	45,31	43,08
0,06—0,01	55,99	45,68	39,60

Пористость фракций остроугольного полевого шпата, полученных тем же путем, что и фракции остроугольного кварца, приведена в таблице 3.

Таблица 3

Диаметр фракций в мм	Пористость в % %		
	Рыхлое состо- яние	Уплотненное состояние	
		в цилиндре	в пикнометре
2—1	47,5	45,46	44,45
1—0,5	51,98	47,88	46,26
0,5—0,25	54,76	49,18	47,20
0,25—0,1	58,46	51,62	49,23
0,1—0,06	61,22	52,72	51,38
< 0,06	62,53	—	—

Из полученных результатов видно, что пористость полевого шпата, как и в остроугольном кварце, постепенно растет с уменьшением диаметра фракций, причем абсолютные цифры пористости выше таковых кварца, что, очевидно, связано с различием в форме частиц.

Пористость отдельных фракций слюды приведена в таблице 4. Из таблицы видно, что характер изменения пористости в данном случае совсем не тот, который наблюдался в кварце и полевом шпата; в слюде пористость уменьшается с уменьшением диаметра фракции как в рыхлом так и в уплотненном состоянии. Абсолютные цифры пористости значительно выше, чем во всех ранее исследованных грунтах из других минералов.

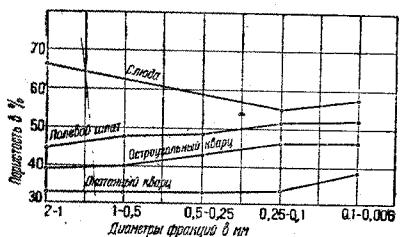
Таблица 4

Диаметр частиц в мм	Пористость в % %	
	Рыхлое состо- яние	Уплотненное в пик- нометре
2—1	87,0	80,46
1—0,5	85,18	75,20
0,5—0,25	83,71	72,16
0,25—0,1	82,74	66,30
0,1—0,06	82,98	68,98
0,06—0,01	—	65,33

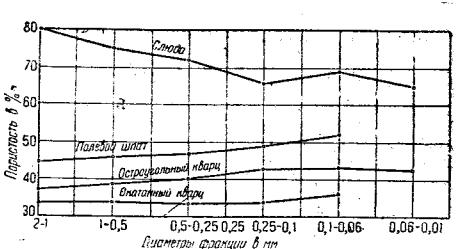
Если величины пористости для всех фракций кварца, полевого шпата и слюды нанести в системе прямоугольных координат, отложив по оси

абсцисс — диаметры фракций и по оси ординат — пористость в процентах, то получаются кривые, изображенные на фиг. 1 и 1а. На фиг. 1а приведены пористости фракций под нагрузкой $10 \text{ кг}/\text{см}^2$.

Как видно из чертежа, различие в пористости фракций из всех исследованных минералов с уменьшением диаметров фракций уменьшается.



Фиг. 1. Пористость фракций слюды, полевого шпата и кварца.



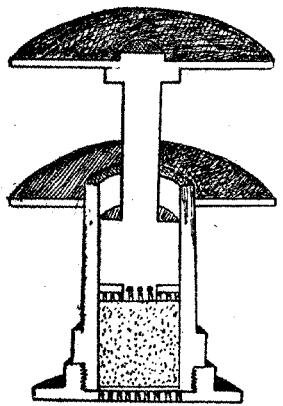
Фиг. 1а. Пористость фракций слюды, полевого шпата и кварца под нагрузкой $10 \text{ кг}/\text{см}^2$.

Ввиду того, что пористость грунтов может изменяться от нагрузки, под которой находится грунт, нами были поставлены опыты для выяснения того, каким образом изменяется пористость от постепенно увеличивающейся нагрузки на грунты из отдельных фракций кварца, слюды и полевого шпата. Одновременно с этим был затронут вопрос о величине упругих и остаточных деформаций в слюдистых грунтах.

Пористость под нагрузкой изучалась в форме Цытовича¹ для определения в грунтах зависимости между давлением и влажностью. Для удобства измерений на форму и поршень были надеты наглухо кольца, расстояние между которыми во время опыта измерялось штангенциркулем с точностью до $0,01 \text{ мм}$ (фиг. 2).

Изменение пористости отдельных фракций окатанного кварца под статической нагрузкой приведено в таблице 5, в которой приведены как абсолютные цифры, так и цифры, представляющие собой проценты от пористости грунта под нагрузкой в $0,05 \text{ кг}/\text{см}^2$, каковая принята за 100% .

Как видно из приведенных результатов, пористость всех фракций, предварительно утрамбованных постукиванием о форму, под влиянием статической нагрузки изменяется очень мало. Уменьшение пористости в абсолютных цифрах не превосходит $1,27\%$ и в относительных цифрах, отнесенных к начальной пористости, $3,8\%$. При этом, как это можно было наблюдать во время опытов,



Фиг. 2. Форма Цытовича для определения зависимости пористости от давления.

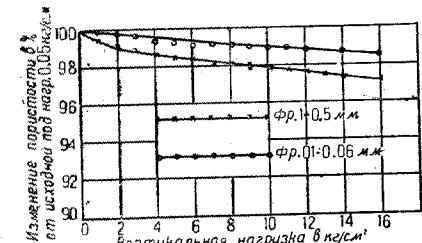
мало. Уменьшение пористости в абсолютных цифрах не превосходит $1,27\%$ и в относительных цифрах, отнесенных к начальной пористости, $3,8\%$. При этом, как это можно было наблюдать во время опытов,

		0,05	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16
Размеры фракций в мм	Вертикальная нагрузка на грунт в $\text{кг}/\text{см}^2$	Пористость φ %														
		2 — 1	1 — 0,5	0,5 — 0,25	0,25 — 0,1	0,1 — 0,06	0,06 — 0,01	0,01 — 0,005	0,005 — 0,001	0,001 — 0,0005	0,0005 — 0,0001	0,0001 — 0,00005	0,00005 — 0,00001	0,00001 — 0,000005	0,000005 — 0,000001	0,000001 — 0,0000005
2 — 1	33,84 100%	33,41 98,73	33,33 98,49	33,25 98,25	33,21 98,13	33,21 98,13	33,17 98,02	33,17 98,02	33,12 97,87	33,08 97,75	33,03 97,61	32,92 97,28	32,92 97,28	32,92 97,28	32,92 97,28	32,92 97,28
1 — 0,5	34,28 100%	34,11 99,50	34,03 99,27	33,92 98,95	33,83 98,69	33,75 98,45	33,75 98,25	33,68 98,07	33,66 97,98	33,58 97,81	33,53 97,75	33,51 97,46	33,41 97,46	33,40 97,43	33,40 97,43	33,40 97,43
0,5 — 0,25	33,42 100%	32,75 98,0	32,66 97,73	32,57 97,45	32,54 97,37	32,48 97,19	32,42 97,01	32,42 97,01	32,42 97,01	32,42 97,01	32,37 96,86	32,33 96,78	32,28 96,59	32,23 96,43	32,23 96,43	32,23 96,43
0,25 — 0,1	34,82 100%	34,80 99,94	34,65 99,51	34,59 99,34	34,54 99,19	34,46 98,97	34,42 98,85	34,42 98,85	34,42 98,85	34,42 98,85	34,12 97,99	34,12 97,99	34,11 97,96	33,96 97,53	33,96 97,53	33,96 97,53
0,1 — 0,06	39,10 100%	39,08 99,95	39,02 99,80	39,00 99,75	38,93 99,56	38,82 99,28	38,81 99,25	38,81 99,25	38,79 99,21	38,77 99,15	38,71 99,00	38,69 98,95	38,69 98,75	38,61 98,72	38,61 98,72	38,61 98,72

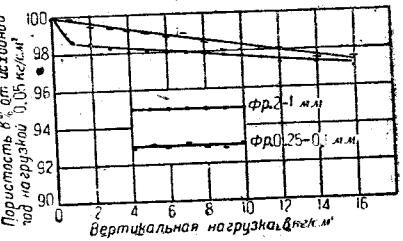
¹ Н. А. Цытович, Основы механики грунтов. 1934 г.

во время утрамбовки постукиванием молоточка, самая верхняя часть грунта остается более рыхлой, эта часть, повидимому, и обуславливает некоторую часть осадки при действии статической нагрузки.

Изменение пористости под статической нагрузкой более наглядно видно на фиг. 3 и 3а, где по оси абсцисс отложены нагрузки на грунт



Фиг. 3. Изменение пористости под статической нагрузкой фракций окатанного кварца.



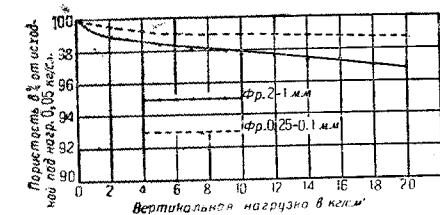
Фиг. 3а. Изменение пористости под статической нагрузкой фракций окатанного кварца.

в $\text{кг}/\text{см}^2$, а по оси ординат — пористости, выраженные в процентах от пористости под нагрузкой в $0,05 \text{ кг}/\text{см}^2$.

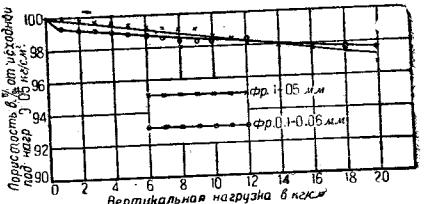
Изменение пористости остроугольного кварца под влиянием статических нагрузок приведено в таблице 6.

Те же самые результаты, выраженные в процентах от исходной пористости под нагрузкой в $0,05 \text{ кг}/\text{см}^2$, представлены на фиг. 4 и 4а.

Как видно из полученных результатов в общем изменение пористости фракций остроугольного кварца под статической нагрузкой изменяется в тех



Фиг. 4. Изменение пористости под статической нагрузкой фракций остроугольного кварца.



Фиг. 4а. Изменение пористости под статической нагрузкой фракций остроугольного кварца.

же пределах, что и во фракциях окатанного кварца, а именно, при увеличении нагрузки до $16 \text{ кг}/\text{см}^2$ относительная пористость уменьшается до 97,36% (в окатанном кварце она снижалась до 96,2%), при нагрузке в $20 \text{ кг}/\text{см}^2$ она снижается до 96,71%. При этом нужно отметить, что пористость под нагрузкой в $20 \text{ кг}/\text{см}^2$ по абсолютной величине больше таковой, полученной при утрамбовке постукиванием в пикнометре.

Те же испытания с фракциями полевого шпата приведены в табл. 7 и на фиг. 4б и 4в.

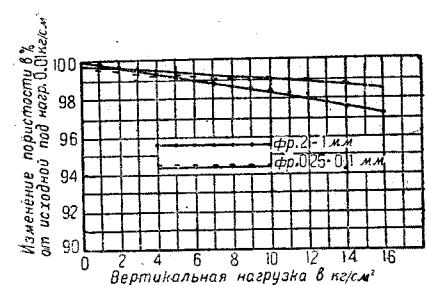
Вертикальная нагрузка на грунт в $\text{кг}/\text{см}^2$	Диаметры фракций в мм															Пористость % от исходной
	0,05	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18
2-1	40,19 100%	39,90 99,28	39,81 99,05	39,71 98,81	39,68 98,73	39,55 98,41	39,51 98,31	39,47 98,21	39,41 98,05	39,31 97,81	39,27 97,71	39,13 97,71	39,09 97,71	39,05 97,71	38,98 96,94	38,96 96,94
1-0,5	40,73 100%	40,71 99,95	40,64 99,79	40,60 99,70	40,58 99,70	40,50 99,48	40,40 99,48	40,37 99,28	40,37 99,26	40,37 99,26	40,37 99,26	40,37 99,26	40,37 99,26	40,37 99,26	39,72 96,71	39,39 96,71
0,5-0,25	43,44 100%	43,42 99,98	43,35 99,79	43,31 99,70	43,22 99,70	43,18 99,70	43,13 99,70	43,12 99,70	43,12 99,70	43,12 99,70	43,12 99,70	43,12 99,70	43,12 99,70	42,83 98,25	42,68 98,25	42,68 98,25
0,25--0,10	46,44 100%	46,46 99,85	46,43 99,76	46,41 99,44	46,40 99,27	46,38 99,12	46,36 99,12	46,34 99,03	46,34 99,03	46,34 99,03	46,34 99,03	46,34 99,03	46,34 99,03	45,94 98,71	45,84 98,71	45,77 98,71
0,1--0,06	47,34 100%	47,08 99,45	47,03 99,34	46,90 99,07	46,87 99,01	46,76 98,77	46,64 98,78	46,58 98,35	46,58 98,35	46,58 98,35	46,58 98,35	46,58 98,35	46,58 98,35	46,51 98,25	46,19 98,25	46,14 98,25

Таблица 7

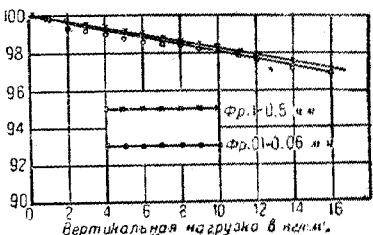
Диаметры фракций в м.м.	Вертикальная нагрузка на грунт в кг/см ²	Пористость													
		0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14
2-1	45,46 100%	45,46 99,91	45,31 99,61	45,21 99,45	45,06 99,12	45,04 99,07	44,99 98,97	44,89 98,74	44,86 98,68	44,77 98,48	44,68 98,28	44,64 98,19	44,31 97,47	44,17 97,16	
	47,88 100%	47,76 99,77	47,76 99,64	47,55 99,33	47,46 99,14	47,37 98,95	47,30 98,79	47,19 98,58	47,14 98,45	47,02 98,20	46,98 98,02	46,84 97,85	46,59 97,33	46,33 96,77	
1-0,5	49,18 100%	49,03 99,69	48,89 99,41	48,81 99,25	49,68 99,98	48,56 98,74	48,51 98,63	48,44 98,49	48,35 98,31	48,33 98,26	48,23 98,06	48,17 97,95	48,09 97,78	47,88 97,36	47,67 96,53
	51,62 100%	61,46 99,69	51,42 99,59	51,32 99,42	51,27 99,32	51,24 99,26	51,24 99,26	51,24 99,26	51,22 99,22	51,22 99,22	51,16 99,11	51,11 99,10	51,09 98,97	50,97 98,74	50,83 98,47
0,25-0,1	52,72 100%	52,57 99,72	52,43 99,45	52,30 99,20	52,19 98,99	52,09 98,81	52,03 98,69	51,91 98,46	51,87 98,39	51,76 98,18	51,68 98,03	51,59 97,86	51,44 97,57	51,21 97,57	51,05 96,83
	0,1-0,06														

Как видно из полученных результатов, во фракциях полевого шпата уменьшение пористости под статической нагрузкой почти совпадает с та-ковой у кварца, а именно, она в абсолютных цифрах падает на 1,67%.

Если взять относительные цифры, отнесенные к исходной пористости под



Фиг. 4б Изменение пористости под статической нагрузкой фракций полевого шпата.



Фиг. 4в Изменение пористости под статической нагрузкой фракций полевого шпата.

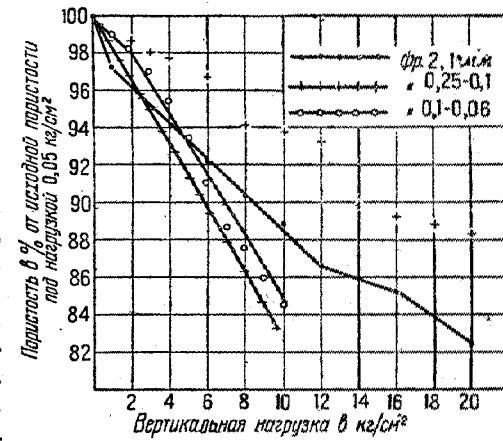
вертикальной нагрузкой 0,05 кг/см², то уменьшение пористости не пре-восходит 3,47%, иначе сказать, она падает до 96,53%, в кварце соответ-ственные цифры получились — 96,2 и 97,36, т. е. можно считать, что совпадение полное. При рассмотрении изменения пористости отдельных фракций видно также, что во всех фракциях она уменьшается под равными нагрузками на одинаковую величину и от этого несколько отступает фракция 0,25—0,1 м.м.

Рассматривая влияние статической нагрузки на все фракции кварца окатанного и остро-угольного, а также полевого шпата, можно сказать, что статическая нагрузка практически, если только не происходит разрушения частиц, не изменяет пористости фракций при условии, что фракция была предварительно уплотнена постукиваниями о стенки сосуда, в котором заключена фракция.

Изменение пористости под влиянием статической нагрузки фракций слюды приводится в таблице 8.

Те же результаты, выраженные в процентах от исходной пористости, полученной под нагрузкой 0,05 кг/см², для фракций 2—1 м.м., 0,25—0,1 м.м. и 0,1—0,06 м.м. представлены в виде кривых на фиг. 5.

Изменение объема всех испытанных фракций слюды существенным образом отличается от кварца и полевого шпата. Это отличие состоит



Фиг. 5. Изменение пористости под статической нагрузкой фракций слюды.

65870
04

Таблица 8

Диаметры фракций в мк	Вертикальная нагрузка в кг/см ²	0,05 0,2 0,5 1,0 1,5 2 2,5 3,0 3,5 4,0 4,5 5,0 5,5 6,0											
		2—1	0,5—0,25	0,25—0,1	0,1—0,06	—	—	—	—	—	—	—	—
74,0 100%	—	72,07 97,39	—	71,17 96,18	—	70,28 94,97	—	69,39 93,77	—	—	—	—	68,21 92,17
66,91 100%	66,65 99,61	66,13 98,84	66,67 96,65	63,48 94,87	62,23 93,01	61,17 91,42	60,16 90,00	59,27 88,58	58,33 87,18	—	—	—	—
65,81 100%	65,79 99,97	65,60 99,68	64,87 98,57	64,24 97,61	63,64 96,70	63,11 95,90	62,48 94,94	61,75 93,83	61,01 92,71	60,73 92,30	60,00 91,16	59,46 90,35	58,78 89,32
68,17 100%	—	67,86 99,72	67,46 98,95	67,15 98,53	66,90 98,17	66,32 97,29	66,17 97,07	65,55 96,16	65,10 95,49	64,61 94,78	63,73 93,49	63,01 92,43	62,20 91,24

2*

Таблица 8 (продолжение)

Диаметры фракций в мк	Вертикальная нагрузка в кг/см ²	6,5 7,0 7,5 8,0 8,5 9,0 9,5 10 12 14 16 18 20											
		2—1	0,5—0,25	0,25—0,1	0,1—0,06	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	66,82 90,30	—	—	—	—	—	65,78 88,89	63,99 86,47	—	63,15 85,84	—	61,04 82,49
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

19

в том, что уменьшение пористости под статической нагрузкой очень большое. Если в кварце и полевом шпате начальная пористость уменьшалась не более 1,5% в абсолютных цифрах, то в слюде она при тех же нагрузках ($16 \text{ кг}/\text{см}^2$) уменьшалась на 10% и даже на 11%. Такое же соотношение получается, если взять не абсолютные цифры пористости, а относительные; в кварце и слюде относительная пористость не уменьшалась более 4%, тогда как в слюде — на 18%.

Как видно на фиг. 5, зависимость между вертикальной нагрузкой и уменьшением относительной пористости для фракций 0,25—0,1 и 0,1—0,06 мм близка к прямолинейной при всех нагрузках от 0 до $10 \text{ кг}/\text{см}^2$, от этой закономерности наблюдается только отступление для фракции 0,1—0,06 мм при нагрузках меньших $1 \text{ кг}/\text{см}^2$. Что касается фракций 2—1 мм, то в ней наблюдается эта зависимость в интервале нагрузок от 1 до $12 \text{ кг}/\text{см}^2$, при больших нагрузках изменение пористости с увеличением нагрузки замедляется, а при нагрузках до 1 кг уменьшение пористости идет быстрее.

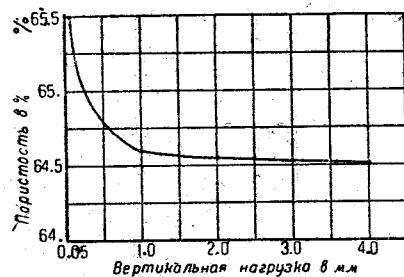
Ввиду того, что слюда дает большое изменение пористости под влиянием статической нагрузки, нами были поставлены опыты по выяснению того, какая часть этой общей деформации может восстановиться и какая часть не восстанавливается при снятии нагрузки; иначе сказать, мы стремились выяснить величину упругой и остаточной деформации. Прежде всего, нами был поставлен опыт с постепенной загрузкой и разгрузкой слюды фр. $< 0,05 \text{ мм}$.

Фиг. 6. Упругие деформации фракции слюды $< 0,05 \text{ мм}$ при разгрузке от 4 до $0,05 \text{ кг}/\text{см}^2$.

Опыт был проведен следующим образом: фракция слюды утрамбовывалась постукиваниями, затем на грунт давалась нагрузка в 1 кг, и после того, как прибор более не улавливал изменений в объеме слюды, нагрузка снималась и погом, по прекращении деформаций, нагружалась 2 $\text{кг}/\text{см}^2$, затем 3 и 4. Четыре килограмма не снимались за один раз, как предыдущие нагрузки, а постепенно, по килограмму. Таким образом, изменялся объем фракции при этой постепенной разгрузке, видно на фиг. 6.

Увеличения объема при разгрузке первых трех килограммов почти не происходит, пористость при этом увеличилась всего только на 0,16%, тогда как после снятия последнего четвертого килограмма она увеличилась на 0,95%, т. е. в последнем случае увеличение больше первого в 6 раз.

Опыт по определению упругих и остаточных деформаций производился следующим образом: форма с фракцией слюды, предварительно утрамбованной постукиваниями до постоянного объема, ставилась под пресс и давалась нагрузка в $1 \text{ кг}/\text{см}^2$; по окончании деформации, что определялось повторными определениями высоты грунта, нагрузка сни-



Фиг. 6. Упругие деформации фракции слюды $< 0,05 \text{ мм}$ при разгрузке от 4 до $0,05 \text{ кг}/\text{см}^2$.

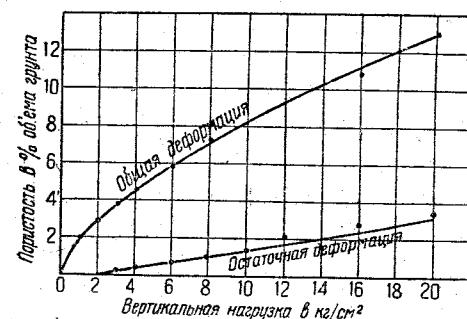
Таблица 9

Вертикальная нагрузка в $\text{кг}/\text{см}^2$	0,05	1,0	2,0	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	16,0	20,0
1. Пористость под нагрузкой	74,0	72,07	71,17	70,28	69,39	68,21	66,82	65,78	63,99	63,15	61,04
2. Пористость после снятия нагрузки	—	74,0	73,95	73,72	73,59	73,31	72,87	72,48	71,82	71,23	70,52
3. Общая деформация в процентах от объема грунта	—	1,93	2,83	3,72	4,61	5,79	7,18	8,22	10,01	10,85	12,96
4. Упругая деформация в процентах от объема грунта	—	1,93	2,78	3,44	4,20	5,10	6,05	6,70	7,83	8,08	9,48
5. Остаточная деформация в про- центах от объема грунта	—	0,0	0,05	0,23	0,41	0,69	1,13	1,52	2,18	2,77	3,48
6. Остаточная деформация в про- центах от общей деформации	—	0,0	1,77	7,52	8,9	11,9	15,7	18,5	21,7	25,5	26,9

малась и производился ряд определений толщины слоя грунта, определения прекращались опять-таки тогда, когда объем фракции переставал увеличиваться. После того на поршень клалась нагрузка в 2 кг, которая по окончании деформации снималась, далее клалась нагрузка в 3 кг и т. д. Результаты опытов с фракцией слюды 2—1 мм приводятся в таблице 9.

Из полученных результатов можно видеть, что упругие деформации в слюде очень велики, остаточные деформации при малых нагрузках отсутствуют, с увеличением нагрузок увеличиваются, и зависимость между остаточной деформацией и вертикальной нагрузкой на грунт является очень близкой к прямолинейной, что наглядно видно на фиг. 7.

Постепенное возрастание остаточной деформации частично можно объяснить тем, что с увеличением нагрузки



Фиг. 7. Упругие и общие деформации фракций слюды 2—1 мм при статических нагрузках.

зом зависит от формы частиц, а поскольку форма обуславливается минерологическим составом, то, следовательно, и от последнего, причем наибольшую пористость имеют грунты, состоящие из минералов, имеющих пластинчатое строение, как например, из слюды.

2. Окатанность частиц значительно уменьшает пористость грунтов.

3. Различие в пористости грунтов, состоящих из частиц разного минерологического состава, с уменьшением размеров частиц постепенно уменьшается.

4. Уменьшение пористости грунтов, состоящих из твердых и неупругих минералов (кварца, полевого шпата) под статической нагрузкой весьма незначительна и достигает большой величины в грунтах, состоящих из слюдистых частиц.

5. Уменьшение пористости под влиянием статических нагрузок, в пределах точности опытов, приближенно может быть принято линейным для грунтов кварцевых и полевошпатовых (предварительно уплотненных постукыванием) в интервале вертикальных нагрузок от 1 до 16 $\text{kg}/\text{см}^2$; для грунтов слюдистых от 1 до 12 $\text{kg}/\text{см}^2$; при дальнейшем увеличе-

нии нагрузок для последних (слюдистых) грунтов эта закономерность нарушается.

6. Упругие деформации в слюдистых грунтах значительно больше остаточных. Изменение упругих деформаций в этих грунтах, в зависимости от вертикальных нагрузок, происходит по криволинейному закону, приближающемуся к параболическому.

7. Остаточные деформации в грунтах слюдистых возрастают с увеличением вертикальной нагрузки по прямолинейному закону.

Фильтрация

Фильтрация изучалась на фракциях от двух миллиметров до 0,01 мм, полученных из слюды, полевого шпата и кварца. Кварц, как и при определении пористости, кроме остроугольного, был взят и окатанный.

Коэффициент фильтрации определялся по методу Каменского¹, повторность опытов не была меньше 5, большая часть сделана с девятикратной повторностью, и из этих определений взята средняя величина. Перед опытом грунт каждый раз уплотнялся до постоянного объема постукиваниями резинового молоточка о боковую стенку трубы.

Результаты опытов приводятся в табл. 10.

Таблица 10

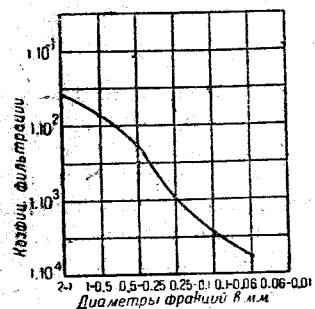
Коэффициент фильтрации (K) франций слюды, кварца и полевого шпата

Коэффициент фильтрации (K)	Слюда	Окатанный кварца	Острогольный кварц	Полевой шпат
Диаметры фракций в мм				
2—1	4,1.10 ⁻²	3,2.10 ⁻¹	—	3,3.10 ⁻¹
1—0,5	1,5.10 ⁻²	2,4.10 ⁻¹	9,10 ⁻²	1,6.10 ⁻¹
0,5—0,25	7,7.10 ⁻³	4,4.10 ⁻²	2,6.10 ⁻³	2,4.10 ⁻³
0,25—0,1	1,2.10 ⁻⁴	7,3.10 ⁻³	6,5.10 ⁻³	4,4.10 ⁻³
0,1—0,06	4,9.10 ⁻⁴	4,8.10 ⁻³	1,6.10 ⁻⁴	2,7.10 ⁻⁴
0,06—0,01	2,3.10 ⁻⁵	2,3.10 ⁻⁴	4,10 ⁻⁴	—
≤ 0,06	1.10	—	2,3.10 ⁻⁴	1,7.10 ⁻⁴

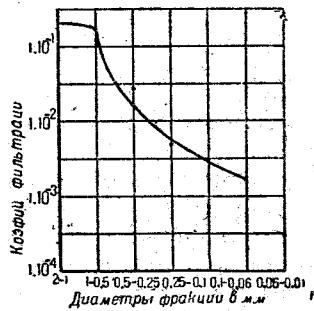
¹ Инж. А. П. Коротаев, Спутник гидрогеолога, 1934 г.

Те же результаты представлены в виде кривых на фигурах 8а, 8б, 8в и 8г.

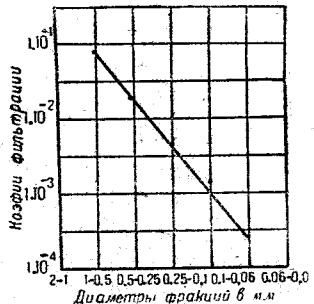
Коэффициент фильтрации во фракциях из всех изученных минералов существенным образом зависит, прежде всего, от крупности частиц, уменьшаясь с увеличением размеров частиц, составляющих грунт. При этом уменьшение в различных минералах неодинаково: во фракциях слюды оно наименьшее, больше в полевом шпата и самое большое



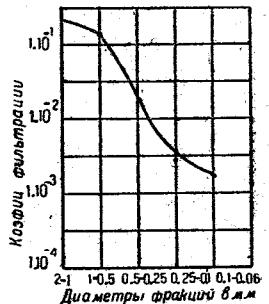
Фиг. 8а. Коэффициент фильтрации фракций слюды.



Фиг. 8б. Коэффициент фильтрации фракций окатанного кварца.



Фиг. 8в. Коэффициент фильтрации фракций остроугольного кварца.



Фиг. 8г. Коэффициент фильтрации фракций полевого шпата.

в кварце. При переходе от одной фракции к другой отношение между коэффициентами фильтрации не остается одинаковым. В слюде, например, это отношение между фракциями 2—1 и 1—0,5 мм равно 2,3, между фракциями 1—0,5 и 0,5—0,25 мм — 2,2, между фракциями 0,5—0,25 и 0,25—0,1 мм — 3,1, между фракциями 0,25—0,1 и 0,1—0,06 мм — 4 и между фракциями 0,1—0,06 и 0,06—0,01 мм — 2. Это различие в отношениях может объясняться тем, что интервалы колебания диаметров частиц внутри отдельных фракций неодинаковы, так например, во фракции 0,25—0,06 мм главная масса частиц может лежать около верхней границы, т. е. по размерам приближаться к 0,25 мм, тогда как частицы

следующей фракции — 0,10—0,06 мм будут лежать у нижней границы, т. е. будут близки к 0,06 мм, при этих условиях, очевидно, отношение между реальными частицами будет равно 4, а не 2,5, как это следует из средних отношений фракций.

Кроме крупности частиц на величину коэффициента фильтрации оказывает влияние минералогический состав грунта. Для того чтобы более наглядно выявить влияние минералогического состава, коэффициент фильтрации всех исследованных фракций слюды условно примем за единицу, и пористости соответствующих фракций других минералов выражим через пористости слюды, тогда коэффициенты фильтрации в относительных целых единицах выражаются такими цифрами (таблица 11).

Таблица 11

Диаметры фракций в мм	Коэффициент фильтрации Слюда	Окатанный кварц	Остро- угольный кварц	Полевой шпат
2-1	1	20	—	15
1-0,5	1	35	12	17
0,5-0,25	1	12	6	5
0,25-0,1	1	11	8	5
0,1-0,06	1	15	5	7
0,06-0,01	1	5	3	—
< 0,06	1	—	3	2

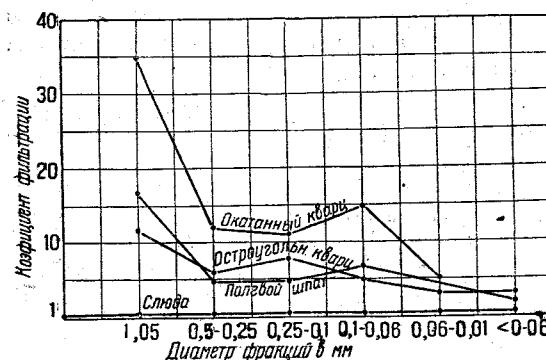
Если расположить все минералы по величине их коэффициента фильтрации в возрастающий ряд, то он, по совокупности всех изученных фракций, будет таков: слюда < полевой шпат < остроугольный кварц < окатанный кварц.

Главными факторами в грунтах, влияющими на коэффициент фильтрации, нужно считать размеры пор, общую пористость и характер поверхности частиц (гладкая, шероховатая и т. п.). Какой же из этих факторов является главнейшим? Если одинаковые фракции из всех изученных минералов расположить в возрастающий ряд по их пористости, то он будет: как раз обратным ряду по коэффициенту фильтрации, т. е. наименьшей пористостью обладает окатанный кварц, большая пористость у остроугольного кварца, еще большая у полевого шпата, и наконец самая большая пористость у слюды.

При сравнении коэффициента фильтрации в окатанном и остроугольном кварце видно, что коэффициент фильтрации в окатанном кварце больше, хотя его пористость меньше. Что касается характера поверхности частиц кварца окатанного и остроугольного, то он не должен существенным образом отличаться у обоих. Отсюда с несомненностью вытекает, что в отношении коэффициента фильтрации у песчаных и пылеватых грунтов наибольшее значение имеют размеры пор, обусловливаемые фор-

мой и величиной частиц, меньшее значение — общая пористость и характер поверхности частиц.

Если сравнивать коэффициенты фильтрации у одинаковых фракций различных минералов, переходя от крупных к более мелким, то можно видеть, что наибольшее различие имеет место у крупных фракций и уменьшается в мелких. Это постепенное уменьшение значения формы частиц на коэффициент фильтрации наглядно видно на фиг. 9.



Фиг. 9. Относительные величины коэффициента фильтрации фракций слюды, кварца и полевого шпата.

3. Значение формы частиц, а вместе с этим и минералогического состава, на коэффициент фильтрации уменьшается с уменьшением размеров частиц и в грунтах, состоящих из частиц тонкопылеватых (фракции 0,06—0,01 мм). различие в грунтах разного минералогического состава не большое.

Капиллярные явления в грунтах

Капиллярные явления изучались на том же материале, в котором были определены пористость и коэффициент фильтрации, т. е. во фракциях от 2 до 0,01 мм , полученных при раздроблении слюды, полевого шпата и кварца.

Все определения были сделаны на приборе Бескова (фиг. 10). Грунты брались в утрамбованном состоянии. Перед опытом в сосуд A , предварительно наполненный водой, всыпалась испытуемая фракция и утрамбовывалась в нем под водой постукиваниями резинового молоточка о стенки сосуда до тех пор, пока объем грунта не переставал изменяться. После этого производилось определение, для чего сосуд A (сосуд B остается неподвижным во все время опыта) медленно поднимался вверху с остановками на 1—5 минут через каждые 2 см (остановка в поднятии тем продолжительнее, чем мельче испытуемая фракция). Сосуд A поднимался до тех пор, пока в нем под сеткой не появлялся пузырек воздуха.

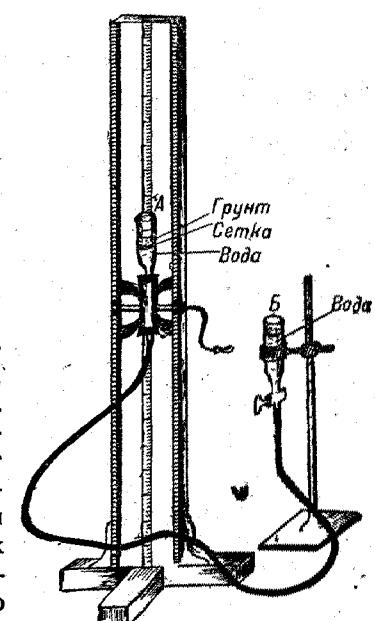
Когда сосуд A находится выше уровня воды в сосуде B , то грунт в сосуде A испытывает сверху вниз давление, равное весу столба воды,

от низа грунта до уровня воды в сосуде B . Это давление уравновешивается разностью величины поверхностного натяжения воды в менисках пор грунта и плоской поверхности воды в сосуде B . Когда вес столба воды с поднятием сосуда A будет хотя бы на очень малую величину больше этой разности, то вода из пор грунта будет выдавлена и под сеткой появится пузырек воздуха. Так как натяжение в менисках грунта не одинаково и изменяется с диаметром пор, то воздух прорвется не через все поры, а только через самые крупные поры, в более же мелких порах вода останется. Отсюда вытекает, что на приборе Бескова, как и на всяком другом капилляриметре, можно измерить высоту капиллярного поднятия только в наиболее крупных порах грунта. Это обстоятельство заставляет с особой осторожностью относиться к выбору образцов для определения в них капиллярного поднятия в капилляриметре, в особенности, грунтов с нарушенным сложением. Положим испытывается глинистый грунт, имеющий очень тонкие поры, но в котором корневой системой образовано несколько каналов с несравненно большим диаметром, чем диаметр пор между частицами грунта. При испытании такого грунта в капилляриметре воздух прежде всего пройдет через каналы, образованные корневой системой, главная же масса пор останется заполненной водой; при этих условиях определение высоты капиллярного поднятия будет не характерным для данного грунта. Указанное явление в значительной степени исключается при испытании грунтов с нарушенным сложением, в особенности грунтов песчаных и пылеватых. В этом состоянии величина пор будет во всех участках более или менее одинакова, однако и в этом случае высота капиллярного поднятия будет характеризовать не среднюю величину пор, а величину наиболее крупных (но не отдельных, как в грунтах с нарушенным сложением).

Результаты опытов по определению капиллярного поднятия с фракциями слюды, полевого шпата и кварца на приборе Бескова приводятся в таблице 12, где приведены средние величины высоты капиллярного поднятия.

Высота капиллярного поднятия жидкости в капиллярных трубках выражается формулой:

$$h = \frac{2\sigma}{grd}.$$



Фиг. 10. Капилляриметр Бескова конструкции ЦДОРНИИ.

где h — высота капиллярного поднятия,
 σ — поверхностное натяжение,
 g — ускорение силы тяжести,
 r — радиус капиллярной трубки и
 d — плотность жидкости.

Если поры грунта рассматривать как цилиндрические трубы, то их размеры в отдельных фракциях будут такими, которые даны в таблице 12.

Таблица 12

Диаметры фракций в мм	Высота капиллярного поднятия во фракциях							
	Слюды		Окатанного кварца		Остроуголь- ного кварца		Полевого шпата	
	Высота в см	радиус капилля- ров в мм	Высота в см	радиус капилля- ров в мм	Высота в см	радиус капилля- ров в мм	Высота в см	радиус капилля- ров в мм
2—1	12,3	0,124	9,0	0,169	5,5	0,277	6,8	0,225
1—0,5	20,8	0,073	14,6	0,104	13,22	0,123	13,3	0,115
0,5—0,25	32,7	0,046	26,3	0,058	25,7	0,059	23,3	0,066
0,25—0,1	65,8	0,023	61,8	0,025	56,0	0,027	49,2	0,031
0,1—0,06	122,4	0,012	82,7	0,018	100,3	0,015	99,3	0,015
0,06—0,01	—	—	127,7	0,012	205,0	0,007	—	—

При сравнении высот капиллярного поднятия во фракциях, полученных из каждого минерала, можно видеть, что она увеличивается с переходом от более крупной фракции к следующей более мелкой, примерно, в два раза. Значительное отступление от этой закономерности имеет место в окатанном кварце, именно во фракциях 0,1—0,06 и 0,06—0,01 мм, в которых высота капиллярного поднятия увеличивается меньше. Эти фракции обладали и сравнительно очень большим коэффициентом фильтрации. Все это указывает на то, что главная масса частиц, составляющая эти фракции, лежит у верхней границы, т. е. их величина близка у первой — к 0,10 мм и у второй — к 0,06 мм.

Сравнивая высоты капиллярного поднятия в одинаковых по размерам фракциях разных минералов, видно, что наибольшей величины они достигают во фракциях слюды, что же касается других минералов, то они близки между собой.

Если сравнить между собой коэффициент фильтрации и высоту капиллярного поднятия в одинаковых фракциях различных минералов, то видно, что фракции, резко различаясь по коэффициенту фильтрации, сравнительно близки по высоте капиллярного поднятия. Поэтому можно думать, что размеры наиболее крупных пор фракций, которые характеризуются высотой капиллярного поднятия, в разных минералах отличаются не сильно, тогда как размеры основной массы пор различаются резко.

Трение в сыпучих грунтах

При изучении вопроса трения в сыпучих грунтах мы стремились выяснить зависимость данного свойства, как и всех ранее рассмотренных, от минералогического состава и степени раздробленности частиц. В этих целях материалом служили фракции слюды, кварца и полевого шпата, в которых изучались угол естественного откоса и коэффициент внутреннего трения.

Угол естественного откоса

Угол естественного откоса определялся как в сухом состоянии, так и под водой. Определения производились в стеклянном сосуде с плоскими стенками, имевшем размеры 4×15×10 см. Каждое определение повторялось 6 раз. Результаты этих испытаний в сухом состоянии приведены в табл. 13.

Таблица 13

Размеры фракций в мм	Угол естественного откоса в сухом состоянии							
	Слюды		Окатанный кварц		Остроуголь- ный кварц			
	Средн. значен.	Средн. ошибка	Средн. значен.	Средн. ошибка	Средн. значен.	Средн. ошибка		
2—1	41°30'	44'	32°3'	40'	41°30'	1°23'	35°54'	1°02'
1—0,5	40°43'	1°29'	32°2'	24'	34°0'	1°31'	38°08'	1°39'
0,5—0,25	39°31'	3°45'	33°45'	38'	32°25'	1°09'	33°52'	1°37'
0,25—0,1	42°50'	1°26'	32°48'	1°43'	35°	1°	37°0'	1°16'
0,1—0,06	36°23'	2°55'	33°19'	1°14'	36°	2°30'	38°50'	2°53'
0,06—0,01	36°25'	1°03'	31°57'	1°24'	40°	2°50'	41°0'	1°32'

Из полученных результатов наиболее отчетливо вытекает, что грунт из свежераздробленных минералов имеет значительно больший угол естественного откоса, чем грунт из окатанных частиц. Что касается влияния размеров частиц на угол, то в различных минералах это влияние неодинаково. В слюде с уменьшением диаметров частиц в общем угол естественного откоса уменьшается, в окатанном кварце он остается без изменения, в остроугольном кварце и в полевом шпата с уменьшением размеров частиц угол увеличивается.

Как изменяется угол естественного откоса под водой, видно из таблицы 14. В этой таблице приводятся только средние величины (средняя ошибка не приводится, так как она того же порядка, что и при испытаниях в сухом состоянии). Определения велись в том же сосуде, что и при определении угла естественного откоса грунтов в сухом состоянии.

Таблица 14

Размеры частиц в м.м.	Угол естественного откоса под водой			
	слюда	окатанный кварц	остроугольн. кварц	полевый шпат
2—1	31°48'	29°40'	31°34'	31°42'
1—0,5	26°06'	32°04'	30°14'	30°46'
0,5—0,25	34°18'	29°24'	31°34'	27°49'
0,25—0,1	23°40'	29°34'	32°32'	28°36'
0,1—0,06	22°44'	31°18'	30°22'	28°35'
0,06—0,01	24°50'	33°01'	18°7' (?)	27°02'

При сравнении данных таблицы 14 с таковыми таблицы 13 видно, что величина угла естественного откоса под водой для всех минералов ниже, чем в сухом состоянии, причем во фракциях из частиц свежераздробленных как в кварце, так и в полевом шпата и слюде они снизились значительно больше, чем в окатанном кварце; в первых это снижение достигает 13°, тогда как в окатанном кварце оно не более 2°.

Сравнивая величины угла естественного откоса в одинаковых по размерам фракциях из различных минералов, видно, что наименьшая величина имеет место у слюды, больше у полевого шпата и еще больше у остроугольного кварца (за исключением фракции 0,06—0,01 м.м.), угол естественного откоса окатанного кварца почти равен углу (несколько ниже) остроугольного кварца и несколько выше, чем у полевого шпата.

Угол естественного откоса характеризует только состояние грунта без внешней нагрузки и потому является характеристикой только верхних слоев природного грунта, но не характеризует состояние частиц, находящихся внутри массы грунта и испытывающих давление. Для характеристики грунта под нагрузкой нами был изучен у тех же грунтов коэффициент внутреннего трения.

Коэффициент внутреннего трения в грунтах

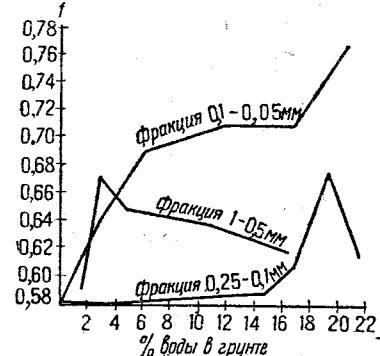
При изучении коэффициента внутреннего трения были поставлены опыты по выяснению того, как влияет на величину коэффициента сдвига влажность. В этих целях были взяты фракции 1—0,5; 0,25—0,1 и 0,1—0,05 м.м. природного песка, состоявшего в главной массе из кварца, и испытаны с гребенкой в приборе Пономарева при разных влажностях. Предельным количеством воды было взято такое, которое могло удержаться в грунте. Большие количества воды хотя и вводились в грунт, но во время уплотнения вертикальной нагрузкой этот избыток отжимался, и содержание воды приходило к тому предельному, которое могло бытьдержано грунтом. Все испытания были проведены

под вертикальной нагрузкой в 0,5 кг/см². Коэффициент сдвига вычислялся по формуле:

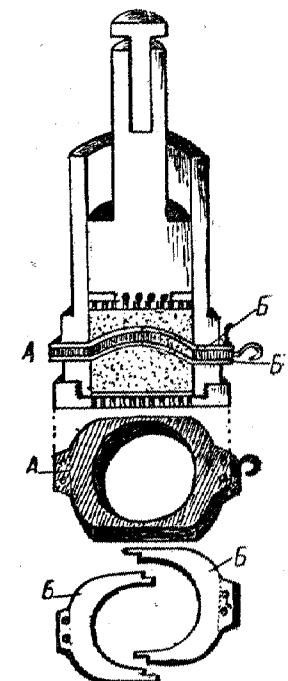
$$f = \frac{\tau}{2\sigma},$$

где f — коэффициент сдвига,
 τ — срывающее усилие на всю гребенку и
 σ — вертикальная нагрузка на всю гребенку.

Результаты испытаний приводятся на фиг. 11 в виде кривых. Коэффициент сдвига во фракции песка 1—0,5 м.м., с увеличением в ней воды до 3%, быстро увеличивается, а затем постепенно уменьшается, однако при всех влажностях оставаясь выше такового при воздушно-сухом состоянии. Во фракции 0,25—0,1 м.м. наиболее сильное увеличение коэффициента сдвига наблюдается при содержании воды в интервале от 14 до 19%, дальнейшая же прибавка до 21,4% вызвала значительное его понижение. Во фракции 0,1—0,05 м.м. коэффициент сдвига сильно увеличивается при добавках воды от 1 до 5% и в интервале от 16,8 до 20,6%. Снижение коэффициента



Фиг. 11. Коэффициент сдвига во фракциях при разной влажности.



Фиг. 12а. Видоизмененная форма Цытовича для определения коэффициента внутреннего трения и сцепления.

сдвига в этой фракции обнаружить не удалось. Нужно отметить, что при всех влажностях коэффициент сдвига во всех фракциях, состоящих как из крупных частиц, так и из мелких — пылеватых — выше такового при воздушно-сухом состоянии.

При изучении коэффициента внутреннего трения в слюде, кварце и полевом шпата материал брался в трех состояниях: 1) в воздушно-сухом, 2) при насыщении водой и 3) под водой.

Все испытания производились на приборе Цытовича¹, но конструкция формочки, в которую закладывается грунт, была изменена (фиг. 12а), а именно к выдвижной части формы сверху и снизу накладывались разъемные кольца толщиной в 1 мм, которые перед опытом на срез вынимались и, таким образом, между выдвижной и неподвижной частью получался зазор в 1 ми. Это приспособление сделано было ввиду того, что без него частички грунта, увлекаемые выдвижной частью, застревали в передней части формы и значительно увеличивали трение.

При определении трения вначале песок закладывался в рыхлом состоянии и уплотнялся вертикальной статической нагрузкой, под которой и производился сдвиг. При этих испытаниях результаты получались настолько различные в параллельных опытах, что их невозможно между собой сравнивать. Как пример приведем данные по испытаниям фракции 1—0,5 мм остроугольного кварца (табл. 15).

Таблица 15

Фракция	Вертикальная нагрузка в $\text{кг}/\text{см}^2$	Горизонтальное срывающее усилие в $\text{кг}/\text{см}^2$	Средняя ошибка в $\text{кг}/\text{см}^2$
1—0,5 мм (остроугольный кварц)	2	2,13 0,66 1,05 0,47 0,78 0,56	0,43

Не лучшие результаты получались при испытаниях этой же фракции при других вертикальных нагрузках, а также и при испытаниях других фракций кварца и полевого шпата.

Такое расхождение между параллельными определениями объясняется тем, что при заложении грунта в форму частицы его по отношению друг к другу могут находиться в весьма разнообразном положении, которое потом статической нагрузкой не нивелируется или нивелируется в очень малой степени.

Для получения более сравнимых результатов решено было производить испытания при максимальной степени уплотнения. Специально поставленные опыты показали, что наименьшая пористость и, следовательно, наибольшее уплотнение получается в том случае, когда грунт уплотняется в формочке ударами резинового молоточка по ее боковой части. В опытах на определение коэффициента внутреннего трения уплотнение производилось до тех пор, пока грунт не переставал больше изменять своего объема, на что обычно требовалось при испытаниях кварца и полевого шпата от 15 до 45 мин. Времени требовалось тем больше,

Н. А. Цытович. Основы механики грунтов.

чем мельче бралась фракция; для мелких фракций слюды времени требовалось до 3 часов. При определении коэффициента внутреннего трения грунтов, уплотненных таким образом, результаты параллельных опытов были значительно ближе между собой, чем при испытаниях в рыхлом состоянии, как это видно из нижеприведенных данных испытания той же фракции 1—0,5 мм остроугольного кварца (табл. 16).

Таблица 16

Фракция	Вертикальная нагрузка в $\text{кг}/\text{см}^2$	Горизонтальное срывающее усилие в $\text{кг}/\text{см}^2$	Средняя ошибка в $\text{кг}/\text{см}^2$
1—0,5 мм (остроугольный кварц)	0,5	1,237 1,247 1,445 1,745 1,612 1,445	0,158

При испытаниях грунтов в уплотненном состоянии полного совпадения результатов параллельных опытов тоже не получалось, причем в общем расхождение получалось большим в опытах с кварцем и меньше со слюдой. Ввиду этого почти для каждой точки повторность опытов была не меньше 3, и значительное количество точек установлено было из 5 и большего количества определений.

Трение во фракциях окатанного кварца

Коэффициент внутреннего трения в окатанном кварце был определен во фракциях 2—1, 0,5—0,25, 0,25—0,1 и 0,1—0,06 мм. После каждого испытания материал отсеивался через соответствующее сито, чтобы удалить разрушившиеся частички и, таким образом, иметь все время фракцию в чистом виде. Испытания производились под различными постепенно увеличивающимися нагрузками, а именно под нагрузкой штампа, равной 0,05 $\text{кг}/\text{см}^2$, под нагрузкой 0,25, 0,5, 1,0, 2,0 и 4,1 $\text{кг}/\text{см}^2$. Со всеми вышеперечисленными фракциями испытания были произведены в воздушно-сухом состоянии, с фракцией 0,1—0,06 мм испытания произведены также в насыщенном водой состоянии и наконец с фракциями 0,1—0,06 и 0,06—0,01 мм—под водой; в последнем случае кроме вышеперечисленных нагрузок испытания производились под весом только самого грунта, который вследствие малой высоты грунта (не более 3 см) может быть принят равным нулю.

Результаты испытаний с фракциями в воздушно-сухом состоянии приводятся в таблице 17. В этой таблице даны только средние величины горизонтального срывающего усилия и одновременно приведена величина средней ошибки с указанием числа повторностей опыта. Средняя ошибка для окатанного кварца, а также для грунтов из других

Таблица 17

Зависимость сопротивления сдвигу от давления в окатанном кварце (воздушно-сухое состояние)

Диаметры фракций в мм	Вертикальная нагрузка в кг/см ²	Горизонтальное срывающее усилие в кг/см ²	Средняя ошибка в кг/см ²
2—1	4,1	7,82	0,624 из 3 опред.
	2	2,62	0,06 » 3 »
	1	1,94	0,12 » 4 »
	0,5	1,56	0,23 » 5 »
	0,25	0,88	0,04 » 3 »
	0,05	0,55	0,09 » 2 »
0,5—0,25	4,1	2,66	0,33 » 3 »
	2	2,601	0,172 » 3 »
	1	1,587	0,183 » 4 »
	0,5	0,956	0,111 » 4 »
	0,25	0,760	0,132 » 3 »
	0,05	0,349	0,021 » 3 »
0,25—0,1	4,1	2,48	0,1 » 2 »
	2	2,6	0,33 » 5 »
	1	1,46	0,26 » 5 »
	0,5	0,91	0,1 » 5 »
	0,25	0,66	0,02 » 3 »
	0,05	0,29	0,04 » 4 »
0,1—0,06	4,1	3,91	0,15 » 3 »
	2	3,693	0,273 » 4 »
	1	3,257	0,427 » 3 »
	0,5	2,518	0,231 » 3 »
	0,25	1,163	0,091 » 3 »
	0,05	0,326	0,025 » 3 »

минералов увеличивается в процентном отношении при уменьшении вертикальных нагрузок. В среднем она может быть принята равной 10%.

Если результаты опытов нанести в системе прямоугольных координат, отложив по оси абсцисс вертикальные нагрузки (σ) и по оси ординат горизонтальные срывающие усилия (τ), то зависимость между этими величинами изобразится линиями, представленными на фиг. 12—15:

Во фракции 2—1 мм (см. фиг. 12) зависимость между вертикальной нагрузкой (σ) и срывающим горизонтальным усилием (τ) во всем интервале от 0,05 до 4,1 кг/см² вертикальных нагрузок может быть в первом приближении принята за прямолинейную, однако при вертикальной нагрузке 2 кг/см² имеет место отклонение, значительно выходящее из пределов погрешности опыта. Это обстоятельство указывает, что зависи-

мость, строго говоря, не является прямолинейной. Если вычислить ее методом интерполяции, то она выражается формулой:

$$\tau = (64593,125 - 82408,25 \cdot \sigma + 11881 \cdot \sigma^2 - 157,79975 \cdot \sigma^3 + 0,705 \cdot \sigma^4 - 0,00095 \cdot \sigma^5) \cdot 10^{-5}$$

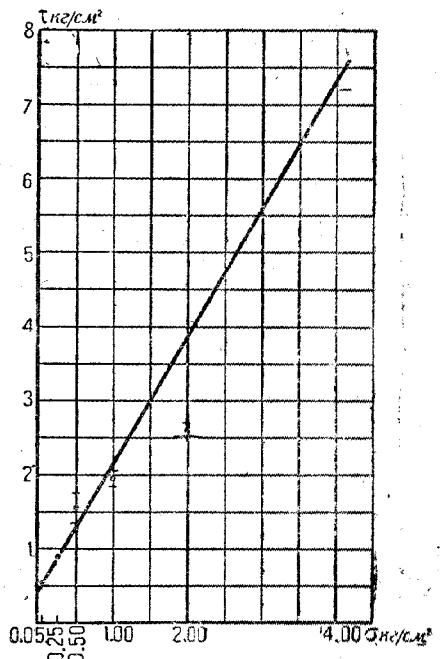
Формула дает близкую сходимость. Принимая зависимость между τ и σ за прямолинейную, коэффициент внутреннего трения (f) в данной фракции получится равным 1,76, что соответствует углу внутреннего трения в 61°.

Во фракции 0,5—0,25 мм (фиг. 13) зависимость между τ и σ может быть принята прямолинейной только в интервале между 0,05 и 2,0 кг/см², для этого интервала коэффициент внутреннего трения равняется 1,15, чему отвечает угол в 49°. При рассмотрении всего интервала от 0,05 до 4,1 кг/см² зависимость между τ и σ уже ни в коем случае не может быть принята прямолинейной, она подчиняется криволинейному закону и интерполяционным путем может быть выражена формулой:

$$\tau = (1704616,95 + 20277216 \cdot \sigma - 758428,16 \cdot \sigma^2 + 9048,382 \cdot \sigma^3 - 42,316 \cdot \sigma^4 + 0,056 \cdot \sigma^5) \cdot 10^{-7}$$

Очевидно, при этом угол внутреннего трения не будет величиной постоянной, а он будет изменяться, уменьшаясь с увеличением вертикальной нагрузки. Если провести касательную к кривой, отвечающей 2 кг/см² вертикальной нагрузки, то она с осью абсцисс образует тангенс равный 0,51, что отвечает углу в 27°. Мы берем условно касательную в точке, отвечающей 2 кг/см², потому что, как увидим ниже, при испытаниях остроугольного кварца зависимость между τ и σ можно разбить на 2 интервала: первый от 0,05 до 1 кг/см² и второй от 1 до 4,1 кг/см², в каждом из них зависимость можно приближенно принять за прямолинейную, поэтому и в данном случае часть кривой от 1 до 4,1 кг/см² мы берем за отдельный участок, средину которого и принимаем как среднюю величину.

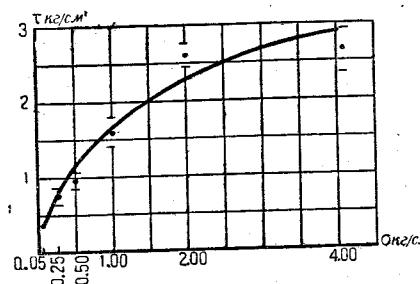
Во фракции 0,25—0,1 мм зависимость между вертикальной нагрузкой и срывающим горизонтальным усилием (фиг. 14), как это видно из цифр таблицы 17 и сравнения кривых на фиг. 13—14, подобна и,



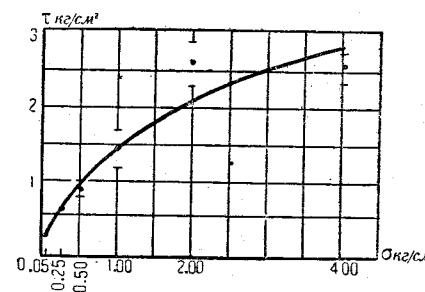
Фиг. 12. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фракции 2-1 мм окатанного кварца (возд.-сухое состояние).

примерно, равна таковой предыдущей фракции. Интерполяционная формула, выражающая эту зависимость, будет такова:

$$\tau = (1891832,5 + 21571075 \cdot \sigma - 296344 \cdot \sigma^2 + 3017,52 \cdot \sigma^3 - 11,61792 \cdot \sigma^4 + 0,014784 \cdot \sigma^5) \cdot 10^{-7}.$$



Фиг. 13. Диаграмма зависимости со- противления сдвигу от нагрузки во фракции 0,5—0,25 мм окатанного кварца (возд.-сухое состояние).

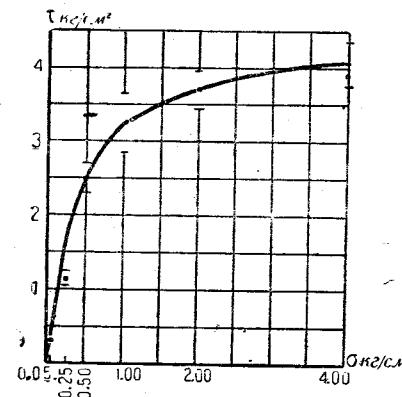


Фиг. 14. Диаграмма зависимости со- противления сдвигу от нагрузки во фракции 0,25—0,11 мм окатанного кварца (возд.-сухое состояние).

Принимая для данной фракции зависимость между τ и σ в интервале вертикальных нагрузок до $2 \text{ кг}/\text{см}^2$ за прямолинейную, что, как видно на фиг. 14, очень близко отвечает действительности, коэффициент внутреннего трения получится равным 1,14 и соответствующий ему угол близок к 49° .

Для интервала вертикальных нагрузок от 1 до $4,1 \text{ кг}/\text{см}^2$ коэффициент внутреннего трения, определяя его тем же путем, что и для предыдущей фракции, будет равен 0,54 и угол (ϕ) близок 28° .

Во фракции 0,1—0,06 мм зависимость между вертикальной нагрузкой и горизонтальным срывающим усилием может быть принята прямолинейной только в интервале нагрузок до $0,5 \text{ кг}/\text{см}^2$ (см. фиг. 15). Для этого интервала коэффициент внутреннего трения и угол будут соответственно 4,16 и 76° . Правильнее эту зависимость рассматривать, как криволинейную. Вычисленная путем интерполяции она может быть выражена формулой:



Фиг. 15. Диаграмма зависимости со- противления сдвигу от нагрузки во фракции 0,1—0,06 мм окатанного кварца (возд.-сухое состояние).

$$\tau = (26023,75 + 45345,625 \cdot \sigma + 20114,593 \cdot \sigma^2 - 263,105625 \cdot \sigma^3 + 1,2054 \cdot \sigma^4 - 0,001633 \cdot \sigma^5) \cdot 10^{-5}.$$

Если взять касательную к полученной кривой в точке, отвечающей вертикальной нагрузке в $2 \text{ кг}/\text{см}^2$, то tg угла, образуемый ею с осью

абсцисс, будет равен 0,33, которому соответствует угол внутреннего трения в $18,5^\circ$.

Сравнивая углы внутреннего трения у различных фракций, можно видеть (таблица 18), что они уменьшаются с уменьшением диаметра фракций. Особенно резкое уменьшение угла внутреннего трения наблюдается при переходе от фракции 2—1 мм к фракции 0,5—0,25 мм.

Таблица 18

Диаметры фракций в мм	2—1	0,5—0,25	0,25—0,1	0,1—0,06
Угол внутреннего трения . .	61°	27°	28°	$18,5^\circ$

Кроме испытаний фракций окатанного кварца в воздушно-сухом состоянии фракция 0,1—0,06 мм была испытана в насыщенном водой состоянии. Фракция тщательно утрамбовывалась в формочке на срез в сыром состоянии, затем грунт сверху засыпался водой и, после того, как вода снизу переставала стекать, производился срыв. Результаты этих опытов приводятся в таблице 19.

Таблица 19

Диаметры фракций в мм	Вертикальная нагрузка в $\text{kg}/\text{см}^2$	Горизонтальное срывающее усилие в $\text{kg}/\text{см}^2$	Средняя ошибка в $\text{kg}/\text{см}^2$
0,1—0,06	4,1 2,0 1,0 0,5 0,25 0,05	5,73 3,28 1,60 1,20 0,79 0,46	0,55 из 3 опр. 0,78 " 6 " 0,13 " 4 " 0,20 " 4 " 0,05 " 2 " 0,01 " 2 "

Если результаты опытов с фракцией 0,1—0,06 мм нанести в системе прямоугольных координат, то зависимость между вертикальной нагрузкой и горизонтальным срывающим усилием с некоторым приближением можно принять прямолинейной (фиг. 16). Тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс равняется 1,32, чему соответствует угол 53° .

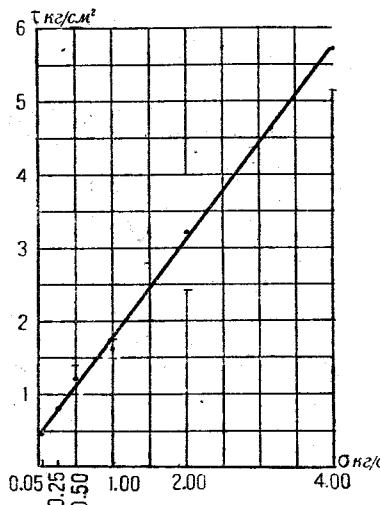
Сравнивая угол внутреннего трения во фракции 0,1—0,06, полученный в насыщенном водой состоянии, с углом в воздушно-сухом, можно видеть, что в первом случае он больше почти в 2 раза.

Кроме вышеприведенных испытаний угол внутреннего трения был определен во фракциях окатанного кварца 0,1—0,06 и 0,06—0,01 мм под водой. Результаты этих опытов приведены в таблице 20.

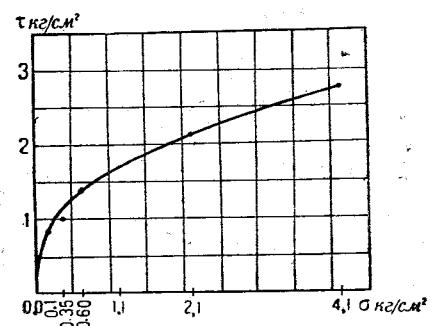
Таблица 20

Диаметры частиц в мм	Вертикальная нагрузка (σ) в kg/cm^2	Горизонтальное срывающее усилие (τ) в kg/cm^2	Средняя ошибка в kg/cm^2
0,1—0,06	4,1	2,46	0,18 из 3 опр.
	2,1	2,04	0,1 из 2
	1,1	—	—
	0,6	1,36	0,02 из 2
	0,35	1,04	0,18 из 3
	0,15	0,88	—
0,06—0,01	0,0	0,34	0,03 из 2
	4,1	1,55	—
	2,1	1,40	0,02 из 2 опр.
	1,1	1,30	0,1 из 2 »
	0,6	0,97	—
	0,35	—	—
	0,15	0,48	—
	0,0	0,37	0,08 из 2 »

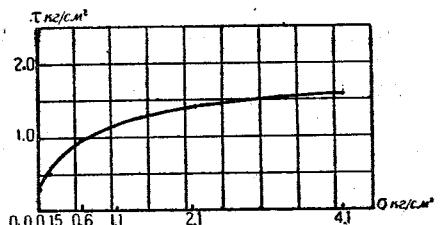
При нанесении результатов испытаний фракции 0,1—0,06 мм в осях прямоугольных координат (фиг. 17) можно видеть, что зависимость между вертикальной нагрузкой и горизонтальным срывающим усилием линейна.



Фиг. 16. Диаграмма зависимости со- противления сдвигу от нагрузки во фракции 0,1—0,06 мм окатанного кварца (насыщено водой состояниe).



Фиг. 17. Диаграмма зависимости со- противления сдвигу от нагрузки во фракции 0,1—0,06 мм окатанного кварца (под водой).



Фиг. 18. Диаграмма зависимости со- противления сдвигу от нагрузки во фракции 0,06—0,01 мм окатанного кварца (под водой).

вающим усилием криволинейная. Касательная, проведенная к кривой в точке, отвечающей вертикальной нагрузке $2 \text{ kg}/\text{cm}^2$, имеет тангенс угла к оси абсцисс 0,3, каковому отвечает угол в 17° .

При нанесении результатов испытаний фр. 0,06—0,01 мм в системе прямоугольных координат (фиг. 18) зависимость между τ и σ , как и в предыдущей фракции, является также криволинейной. Касательная к кривой в точке, отвечающей $2 \text{ kg}/\text{cm}^2$ вертикальной нагрузки, образует с осью абсцисс тангенс, равный 0,15, и соответствующий ему угол близок 9° .

Сравнивая коэффициенты внутреннего трения в воздушно-сухом состоянии и под водой, видно, что в последнем случае они меньше, и в особенности малой величиной отличается угол внутреннего трения во фракции 0,06—0,01 мм.

Трение во фракциях остроугольного кварца

Коэффициент внутреннего трения в остроугольном кварце был определен в воздушно-сухом состоянии во фракциях 2—1, 1—0,5, 0,5—0,25, 0,25—0,1 и 0,1—0,06 мм; под нагрузками 0,05, 0,37, 0,62, 1,12, 2,12 и $4,0 \text{ kg}/\text{cm}^2$. Результаты этих испытаний приведены в таблице 21.

Зависимость между вертикальной нагрузкой и горизонтальным срывающим усилием для фракции 2—1 мм при нанесении результатов опытов, в системе прямоугольных координат, изображается линией, представленной на фиг. 19. Эта линия представляет собой кривую с очень незначительной кривизной, но все же ее нельзя считать прямой. Если эту линию разбить на два участка: один, отвечающий вертикальным нагрузкам от 0,05 до $1,12 \text{ kg}/\text{cm}^2$, и второй — от $1,12$ до $4,0 \text{ kg}/\text{cm}^2$, то на каждом участке зависимость между τ и σ является прямолинейной и соответствующие коэффициенты внутреннего трения и углы будут таковы: на первом участке коэффициент внутреннего трения 3,86 и угол, близкий к 75° , для второго участка коэффициент внутреннего трения 2,28 и угол 66° .

Для фракции 1—0,5 мм зависимость между вертикальной нагрузкой и горизонтальным срывающим усилием, как видно на фиг. 20, подобна таковой для предыдущей фракции. Если эту зависимость рассматривать отдельно в интервале вертикальных нагрузок до $1,12 \text{ kg}/\text{cm}^2$ и от $1,12$ до $4,0 \text{ kg}/\text{cm}^2$, то для каждого из них она может быть принята прямолинейной с коэффициентом внутреннего трения для первого участка 2,0 и углом, близким к 63° , а для второго коэффициент внутреннего трения, примерно, равен 1,46 и соответствующий ему угол 56° .

Для фракции 0,5—0,25 мм зависимость между вертикальной нагрузкой и горизонтальным срывающим усилием выявлена в интервале между $0,05$ и $2,12 \text{ kg}/\text{cm}^2$. Во всем этом интервале зависимость подчиняется криволинейному закону (фиг. 21).

На участке кривой, начиная от вертикальной нагрузки $0,62 \text{ kg}/\text{cm}^2$ до $2,12 \text{ kg}/\text{cm}^2$, зависимость может быть принята за прямолинейную, этому участку соответствует коэффициент внутреннего трения 1,03 и угол 46° .

Для фракции 0,25—0,1 мм зависимость между τ и σ графически представлена на фиг. 22.

Таблица 21

Зависимость сопротивления сдвигу от давления в остроугольном кварце в воздушно-сухом состоянии

Диаметры фракций в мм	Вертикальная нагрузка в кг/см ²	Горизонтальное срывающее усилие в кг/см ²	Средняя ошибка в кг/см ²
2—1	4	11,69	1,19 из 4 опр.
	2	6,05	0,78 » 3 »
	1,12	3,72	0,02 » 2 »
	0,62	2,01	0,09 » 3 »
	0,37	1,04	0,23 » 3 »
	0,05	0,22	0,05 » 5 »
1—0,5	4	6,08	0,34 » 3 »
	2,12	2,94	0,23 » 3 »
	1,12	2,03	0,11 » 3 »
	0,62	1,33	0,25 » 4 »
	0,37	0,88	0,19 » 5 »
	0,05	0,10	0,01 » 3 »
0,5—0,25	4	—	—
	2,12	2,942	0,078 » 3 »
	1,12	2,008	0,078 » 3 »
	0,62	1,32	0,24 » 4 »
	0,37	0,88	0,195 » 5 »
	0,05	0,006	0,06 » 3 »
0,25—0,1	4	4,05	0,44 » 3 »
	2	2,98	0,08 » 3 »
	1,12	2,77	0,25 » 6 »
	0,62	1,45	0,14 » 4 »
	0,37	0,76	0,13 » 6 »
	0,05	0,09	0,01 » 3 »
0,1—0,06	4	3,82	0,29 » 2 »
	2	2,89	0,13 » 3 »
	1,12	2,59	0,02 » 3 »
	0,62	1,88	0,08 » 3 »
	0,37	1,13	0,09 » 8 »
	0,05	0,14	0,03 » 5 »

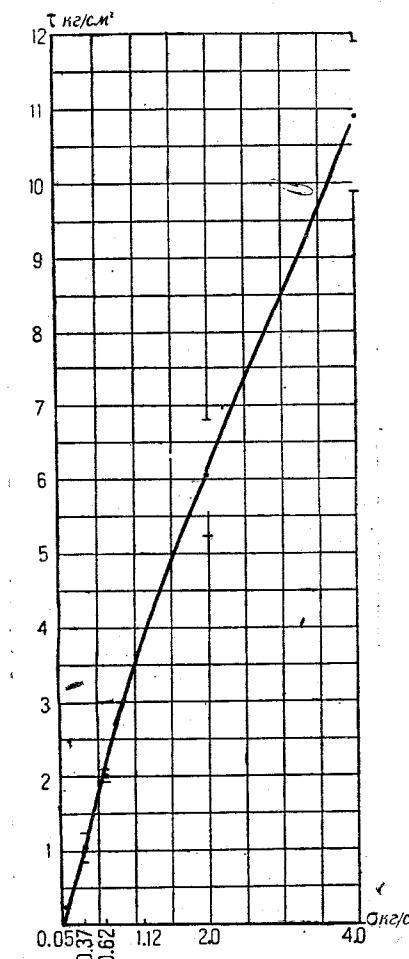
На графике видно, что она является криволинейной и, как во всех предыдущих более крупных фракциях, может быть разбита на два участка. Один участок до вертикальной нагрузки в 1,12 кг/см² и второй — от 1,12 до 4 кг/см². В каждом из этих участков зависимость между τ и σ может рассматриваться прямолинейной. Для второго участка коэффициент внутреннего трения равняется 0,50 и соответствующий ему угол близок к 27°.

Аналитически всю кривую, представленную на фиг. 22, можно выразить формулой, представляющей собой многочлен пятой степени.

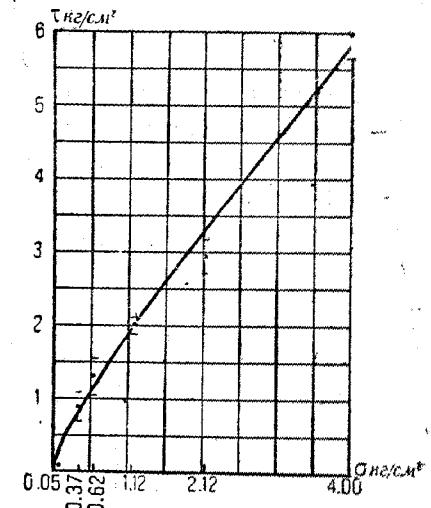
Для фракции 0,1—0,06 мм зависимость между τ и σ также является криволинейной (фиг. 23), которая может быть выражена формулой, пред-

ставляющей собой, как для предыдущей фракции, многочлен пятой степени.

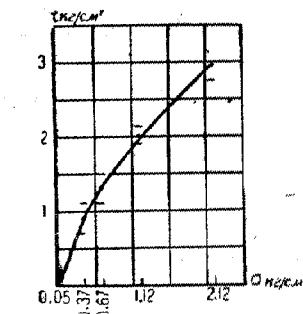
Принимая зависимость в интервале вертикальных нагрузок от 1,12 до 4 кг/см² за прямолинейную, что близко отвечает действительности,



Фиг. 19. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фракции 2—1 мм остроугольного кварца (возд.-сухое состояние).



Фиг. 20. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фракции 1—0,5 мм остроугольного кварца (возд.-сухое состояние).



Фиг. 21. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фракции 0,5—0,25 мм остроугольного кварца (возд. сухое состояние).

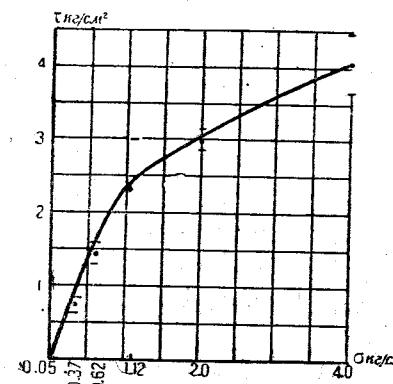
коэффициент внутреннего трения на этом участке будет равен 0,277, которому соответствует угол в 15°.

При сравнении углов внутреннего трения во фракциях остроугольного кварца можно видеть (табл. 22), что их величина уменьшается с уменьшением размеров фракций.

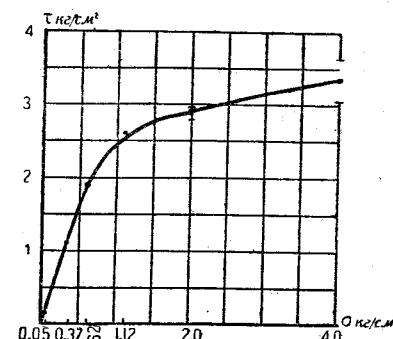
Таблица 22

Диаметры фракций в мм	2—1	1—0,5	0,5—0,25	0,25—0,1	0,1—0,06
Угол внутреннего трения . .	66°	56°	46°	27°	15°

В насыщенном водой состоянии были произведены испытания с фракцией 1—0,5 мм. Влажность в отдельных опытах колебалась от 22 до 25%.



Фиг. 22. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фракции 0,25—0,1 мм остроугольного кварца (возд.-сухое состояние).



Фиг. 23. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фракции 0,1—0,06 мм остроугольного кварца (возд.-сухое состояние).

Результаты испытаний на срез приведены в таблице 23.

Таблица 23

Диаметр фракций в мм	Вертикальная нагрузка в кг/см ²	Горизонтальное срывающее усилие в кг/см ²	Средняя ошибка в кг/см ²
1—0,5	2,12	4,60	0,04 из 2 опр.
	1,12	2,96	0,05 » 4 »
	0,62	1,60	0,09 » 4 »
	0,37	1,46	0,15 » 6 »
	0,05	0,12	0,02 » 3 »

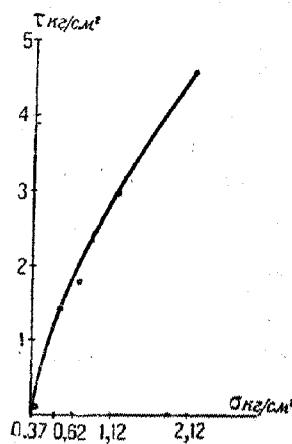
Зависимость между вертикальной нагрузкой и горизонтальным срывающим усилием выражается кривой, приведенной на фиг. 24.

42

Принимая эту зависимость в интервале вертикальных нагрузок от 0,62 до 2,12 кг/см² за прямолинейную, коэффициент внутреннего трения будет равен 1,71 и соответствующий ему угол 60°. Если сравнить эти величины с таковыми же, полученными для той же фракции в воздушно-сухом состоянии, то оказывается, что коэффициент внутреннего трения сырой фракции больше, а именно он увеличивается с 1,46 до 1,71, и соответственно увеличивается угол с 56° до 60°.

Под водой с остроугольным кварцем были испытаны фракции 0,1—0,06 и 0,06—0,01 мм. Результаты этих испытаний приводятся в таблице 24.

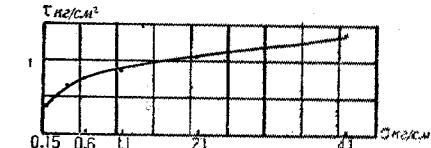
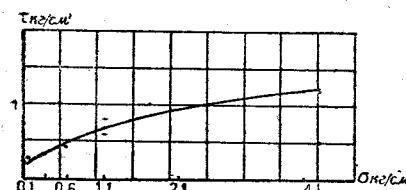
Нанеся результаты испытаний фракции 0,1—0,06 мм в системе прямоугольных координат, зависимость между срывающим усилием и нагрузкой получается криволинейной (фиг. 25). Приняв участок кривой от 0,6 до 4,1 кг/см² вертикальных нагрузок за прямую, коэффициент внутреннего трения получится равным 0,24 и соответствующий ему угол внутреннего трения 13,5°.



Фиг. 24. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фракции 0,1—0,06 мм остроугольного кварца (насыщено водой состояние).

Таблица 24

Диаметры фракций в мм	Вертикальная нагрузка в кг/см ²	Горизонтальное срывающее усилие в кг/см ²	Средняя ошибка в кг/см ²
0,1—0,06	4,0	1,32	0,1 из 2 опр.
	2,0	0,78	0,09 » 3 »
	1,0	0,70	0,07 » 2 »
	0,5	0,45	0,05 » 2 »
	0,1	0,25	0,05 » 3 »
0,06—0,01	4,1	1,30	0,01 » 2 »
	2,1	0,89	0,02 » 3 »
	1,1	0,74	0,11 » 5 »
	0,6	0,66	0,05 » 3 »
	0,15	0,29	0,01 » 2 »



Фиг. 25 а. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фракции 0,06—0,01 мм остроугольного кварца (под водой).

43

Диаграмма зависимости горизонтального срывающего усилия от вертикальной нагрузки для фракции 0,06—0,01 мм дана на фиг. 25а. Коэффициент внутреннего трения для этой фракции в интервале вертикальных нагрузок от 0,6 до 4,1 кг/см² может быть принят равным 0,21 и угол внутреннего трения 12°.

Трение во фракциях полевого шпата

Для определения трения в полевом шпате был взят кусок ортоклаза, раздроблен и из него получены были фракции от 2—1 мм до 0,1—0,05 мм. Ввиду того, что полевой шпат не являлся в отношении других, ранее изученных свойств, резко отличающимся от остроугольного кварца, то в отношении трения были изучены только две фракции—песчаная фракция 0,5—0,25 и пылеватая 0,1—0,06 мм. Коэффициент внутреннего трения в этих двух фракциях был определен в воздушно-сухом состоянии, кроме того в пылеватой он был определен и под водой. Результаты испытаний в воздушно-сухом состоянии приведены в таблице 25.

Таблица 25

Диаметры фракций в мм	Вертикальная нагрузка в кг/см ²	Горизонтальное срывающее усилие в кг/см ²	Средняя ошибка в кг/см ²
0,5—0,25	4,0	4,10	0,09 из 3 опр.
	2,0	2,40	0,19 » 3 »
	1,0	2,27	0,07 » 3 »
	0,5	1,05	0,07 » 3 »
	0,25	0,82	0,12 » 3 »
	0,05	0,25	0,03 » 4 »
0,1—0,06	4,0	4,5	0,7 » 4 »
	2,0	3,98	0,47 » 5 »
	1,0	3,66	0,12 » 4 »
	0,5	3,53	0,20 » 4 »
	0,25	1,25	0,05 » 3 »
	0,05	0,99	0,30 » 4 »

При нанесении результатов испытаний фракции 0,5—0,25 мм в системе прямоугольных координат, зависимость между вертикальной нагрузкой и горизонтальным срывающим усилием выражается кривой, изображенной на фиг. 26.

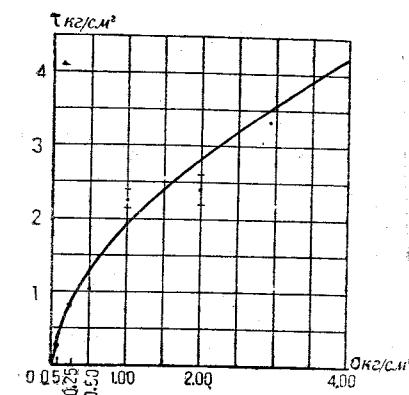
Если взять касательную к этой кривой в точке, отвечающей вертикальной нагрузке в 2 кг, то тангенс ее угла с абсциссой равняется 0,8, что отвечает углу в 39°.

При нанесении результатов испытаний фракции 0,1—0,05 мм в системе прямоугольных координат, зависимость между τ и σ также выражается кривой (фиг. 27). Участок этой кривой между вертикальными давлениями от 0,5 до 4,0 кг/см² может быть принят за прямую, и

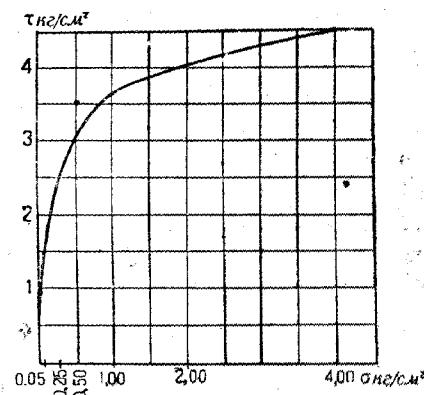
44

коэффициент внутреннего трения для этого участка будет равен 0,31, чему соответствует угол 17°.

Сравнивая угол внутреннего трения обеих фракций полевого шпата с таковыми же остроугольного кварца, можно видеть, что они для фрак-



Фиг. 26. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фр. 0,5—0,25 мм полевого шпата (возд.-сухое состояние).



Фиг. 27. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фр. 0,1—0,06 мм полевого шпата (возд.-сухое состояние).

ции 0,5—0,25 мм хотя различаются, но все же одного порядка, в полевом шпате угол 39°, в кварце 46°, для фракции же 0,1—0,06 мм они очень близки: для полевого шпата угол равен 17°, для кварца 16°.

Результаты испытаний фракции 0,1—0,06 мм под водой приведены в табл. 26.

Таблица 26

Диаметры фракций в мм	Вертикальная нагрузка в кг/см ²	Горизонтальное срывающее усилие в кг/см ²	Средняя ошибка в кг/см ²
0,1—0,06	4,0	1,75	0,23 из 4 опр.
	2,0	1,65	0,04 » 2 »
	1,0	1,27	0,21 » 4 »
	0,5	0,90	—
	0,25	0,64	0,05 » 2 »
	0,05	0,51	0,01 » 2 »
вес грунта		0,3	0,02 » 2 »

При нанесении результатов опытов в системе прямоугольных координат зависимость между τ и σ выражается кривой, изображенной на фиг. 28.

Проводя касательную к этой кривой в точке, отвечающей вертикальной нагрузке в 2 кг/см², коэффициент внутреннего трения получится равным 0,24, что отвечает углу в 14°.

45

Трение во фракциях слюды

Коэффициент внутреннего трения в слюде был определен во фракциях 2—1, 1—0,5, 0,5—0,25, 0,25—0,1, 0,06—0,01 и < 0,06 мм. Гранулометрический состав фракции < 0,06 мм был таков: частиц 0,06—0,01 мм — 69,0%, частиц 0,01—0,005 мм — 22,6% и частиц < 0,005 мм — 8,4%.

Результаты определений коэффициента внутреннего трения всех выше перечисленных фракций в воздушно-сухом состоянии приводятся в таблице 27. В этой таблице, как и для вышерассмотренных минералов, даются только средние величины коэффициента внутреннего трения.

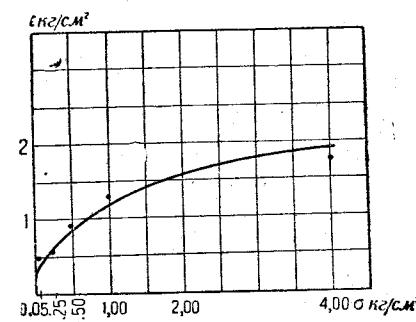
Таблица 27

Диаметры фракций в мм	Вертикальная нагрузка в кг/см ²	Горизонтальное срывающее усилие в кг/см ²	Средняя ошибка в кг/см ²
2—1	4,0	3,30	0,2 из 2 опр.
	2,12	2,67	0,05 » 4 »
	1,12	1,86	0,02 » 4 »
	0,62	1,23	0,12 » 8 »
	0,37	1,05	0,05 » 6 »
	0,05	0,35	0,01 » 2 »
1—0,5	4,0	2,60	0,02 » 2 »
	2,12	2,07	0,26 » 3 »
	1,12	1,28	0,03 » 4 »
	0,62	0,76	0,01 » 3 »
	0,37	0,46	0,01 » 3 »
	0,05	0,33	0,02 » 2 »
0,5—0,25	4,0	1,89	0,19 » 3 »
	2,12	1,43	0,16 » 4 »
	1,12	0,88	0,04 » 4 »
	0,62	0,71	0,03 » 4 »
	0,37	0,62	0,01 » 3 »
	0,05	0,34	0,02 » 2 »
0,25—0,1	4,0	1,74	0,17 » 3 »
	2,12	1,19	0,06 » 4 »
	1,12	0,81	0,09 » 5 »
	0,62	0,67	0,04 » 4 »
	0,37	0,55	0,05 » 4 »
	0,05	0,22	0,04 » 3 »
0,06—0,01	4,1	1,74	0,34 » 2 »
	2,1	1,18	0,02 » 2 »
	1,1	0,79	0,02 » 2 »
	0,6	0,63	—
	0,35	—	—
	0,10	0,40	—
< 0,06	вес грунта	0,03	—
	2,12	1,69	0,18 » 8 »
	1,12	1,30	0,14 » 7 »
	0,62	0,96	0,10 » 7 »
	0,37	0,84	0,02 » 3 »
	0,05	0,15	0,01 » 3 »

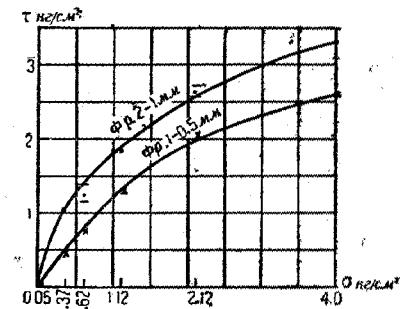
Если нанести результаты опытов с фракций 2—1 в системе прямоугольных координат, то зависимость между τ и σ выразится кривой линией, изображенной на фиг. 29.

Вычисленная путем интерполяции эта зависимость выражается формулой, представляющей собой многочлен пятой степени.

Из кривой видно, что коэффициент внутреннего трения в каждой точке будет иным, а потому для получения сравнимых результатов возьмем коэффициент внутреннего трения в точке, отвечающей 2 кг/см² вертикальной нагрузки, как это делалось при изучении кварца и полевого шпата. В этой точке коэффициент внутреннего трения равняется 0,53 и ему соответствует угол в 28°.



Фиг. 28. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фр. 0,1—0,06 мм полевого шпата (под водой).



Фиг. 29. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фракциях 2—1 и 1—0,5 мм слюды (возд. сухое состояние).

Зависимость между вертикальной нагрузкой и срывающим горизонтальным усилием для фракции 1—0,5 мм, как это видно на фиг. 29, также является криволинейной и выражается формулой в виде многочлена пятой степени.

Для этой фракции коэффициент трения в той же точке, которая взята для предыдущей, равен 0,48, и соответствующий ему угол близок к 26°.

Зависимость между τ и σ для фракции 0,5—0,25 мм также является криволинейной, однако в интервале между 0,37 и 4 кг/см² она очень близка к прямолинейной, как это видно на фиг. 30.

Коэффициент внутреннего трения для этого интервала равняется 0,316, каковому соответствует угол 17,5°. Интерполяционная формула, выражающая зависимость между τ и σ , для этой фракции подобна формуле для предыдущей фракции.

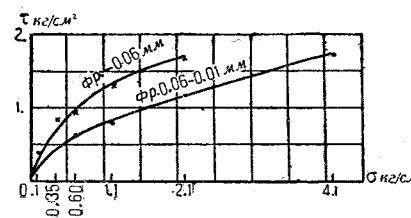
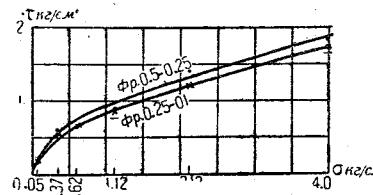
Зависимость между τ и σ для фракции 0,25—0,1 мм очень близка к таковой предыдущей фракции (фиг. 30). Коэффициент внутреннего трения в интервале вертикальных нагрузок от 0,37 до 2,12 кг/см² равен 0,34, и ему соответствует угол внутреннего трения в 19°, т. е. если принять во внимание точность опыта, он равен углу предыдущей фракции. Выражая аналитически зависимость между τ и σ путем интерполяции, формула получается в виде многочлена пятой степени.

Таблица 29

Диаметр фракции в мм	Вертикальная нагрузка в $\text{кг}/\text{см}^2$	Горизонтальное срывающее усилие в $\text{кг}/\text{см}^2$	Содержание воды в % (средн.)	Средняя ошибка в $\text{кг}/\text{см}^2$
0,25—0,1	2,12	1,15	59,1	0,02 из 3 опр.
	1,12	0,61	70,1	0,01 » 3 »
	0,62	0,42	74,03	0,01 » 3 »
	0,37	0,37	97,40	0,02 » 3 »
	0,05	0,13	93,7	0,01 » 3 »

Зависимость между τ и σ для фракции 0,06—0,01 мм (фиг. 31) подобна таковой предыдущих фракций, как это видно из сравнения кривых фиг. 30 и 31. Коэффициент внутреннего трения для этой фракции равен 0,30, и угол внутреннего трения — 17° . Интерполяционная формула, выражающая зависимость между τ и σ , подобна формулам для всех предыдущих фракций.

Для фракции $<0,06 \text{ мм}$ зависимость между τ и σ дана в виде кривой на фиг. 31.



Фиг. 30. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фракциях 0,5—0,25 и 0,25—0,1 мм слюды (возд.-сухое состояние).

Фиг. 31. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фракциях 0,06—0,01 и $<0,06 \text{ мм}$ слюды (возд.-сухое состояние).

В интервале между 0,37 и 2,1 $\text{кг}/\text{см}^2$ она может быть принята прямолинейной. Коэффициент внутреннего трения для этого интервала близок к 0,44, чему соответствует угол в 24° .

Таблица 28

Диаметры фракций в мм	2—1	1—0,5	0,5—0,25	0,25—0,1	0,06—0,01	$<0,06$
Коэффициент внутр. трения	0,53	0,48	0,316	0,34	0,30	0,44
Угол внутреннего трения .	28°	26°	$17,5^\circ$	19°	17°	24°

При сопоставлении коэффициентов и углов внутреннего трения отдельных фракций слюды (табл. 28) видно, что фракции 2—1 и 1—0,5 мм имеют практически один и тот же угол внутреннего трения. При переходе от фракции 1—0,5 к фракции 0,5—0,25 мм наблюдается резкое уменьшение угла внутреннего трения, и все фракции меньше 0,5 мм имеют почти один и тот же угол. Некоторое увеличение угла наблюдается только во фракции $<0,06 \text{ мм}$. Это явление можно объяснить тем, что в данной фракции, как это видно из вышеприведенного ее гранулометрического состава, находятся частицы различной величины, благодаря чему площадь соприкосновения между частицами увеличивается, что в свою очередь влечет за собой увеличение коэффициента и угла внутреннего трения.

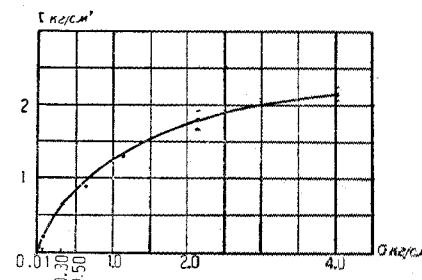
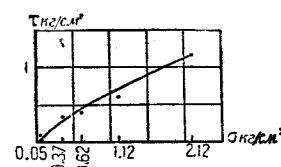
В насыщенном водой состоянии была исследована фракция слюды 0,25—0,1 мм . Результаты испытаний приведены в таблице 29.

При нанесении результатов испытаний в осях прямоугольных координат зависимость между вертикальной нагрузкой и горизонтальным усилием изобразится кривой линией (фиг. 32).

Отрезок этой кривой между вертикальными давлениями от 0,37 до 2,12 $\text{кг}/\text{см}^2$ может быть принят за прямую, для которой коэффициент внутреннего трения и угол будут 0,50 и 27° . Таким образом, и в слюде при насыщении водой угол внутреннего трения повышается по сравнению с воздушно-сухим состоянием. Для данной фракции он возрос на 8° .

Под водой были испытаны в слюде фракции 2—1, 1—0,5, 0,5—0,25 и 0,06—0,01 мм . Результаты испытаний приведены в таблице 30.

Зависимость между срывающим усилием и вертикальной нагрузкой для фракции 2—1 мм в осях прямолинейных коорди-



Фиг. 32. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фракции 0,25—0,1 мм слюды (насыщенное водой состоянием).

Фиг. 33. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фракции 2—1 мм (под водой).

нат (фиг. 33) представляет собой кривую, имеющую в точке, отвечающей 2 $\text{кг}/\text{см}^2$ вертикальной нагрузки, коэффициент внутреннего трения 0,313 и соответствующий ему угол $17,5^\circ$.

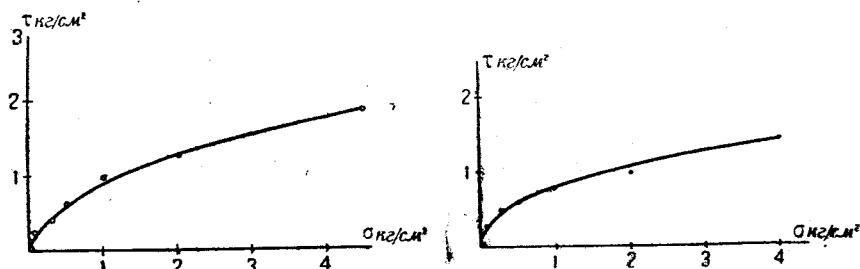
Зависимость между τ и σ для фракции 1—0,5 мм , как это видно из диаграммы фиг. 34, является также криволинейной, для которой тангенс угла в точке, отвечающей 2 $\text{кг}/\text{см}^2$ вертикальной нагрузки, равен 0,315 и угол $17,5^\circ$.

Для фракции 0,5—0,25 мм зависимость между τ и σ на участке от 0,25 до 4 $\text{кг}/\text{см}^2$ может быть принята за прямолинейную (фиг. 34а). Коэффициент внутреннего трения для этого участка равняется 0,233 и соответствующий ему угол внутреннего трения 13° .

Таблица 30

Диаметры фракций в мм	Вертикальная нагрузка в кг/см ²	Горизонтальное срывающее усилие в кг/см ²	Средняя ошибка в кг/см ²
2—1	4,0	2,12	0,13 из 2 опр.
	2,12	1,80	0,17 » 6 »
	1,12	1,31	0,01 » 2 »
	0,62	0,82	0,003 » 2 »
	0,37	0,68	0,004 » 3 »
	0,05	0,24	0,01 » 2 »
1—0,5	4,0	1,81	0,07 » 3 »
	2,0	1,28	0,09 » 2 »
	1,0	0,98	0,25 » 7 »
	0,5	0,63	0,04 » 4 »
	0,30	0,41	0,07 » 6 »
	0,05	0,26	0,03 » 4 »
	вес грунта	0,06	0,005 » 4 »
0,5—0,25	4,0	1,45	—
	2,0	0,94	0,03 » 2 »
	1,0	0,80	0,13 » 3 »
	0,5	0,60	0,12 » 4 »
	0,25	0,50	0,02 » 2 »
	0,05	0,27	0,02 » 3 »
	вес грунта	0,09	0,03 » 4 »
0,06—0,01	4,1	1,38	0,26 » 2 »
	2,1	1,06	0,06 » 2 »
	1,1	0,91	0,20 » 2 »
	0,6	0,88	0,09 » 2 »
	0,35	0,65	0,02 » 3 »
	0,1	0,40	0,02 » 3 »
	вес грунта	0,29	0,04 » 3 »

Для фракции 0,06—0,01 мм зависимость между τ и σ , как и для всех предыдущих фракций, криволинейная. На участке вертикальных нагрузок от 0,35 до 4 кг/см² она приближается к прямолинейной (фиг. 35).



Фиг. 34. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фракции слюды 1—0,5 мм (под водой).

Фиг. 34 а. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фракции слюды 0,5—0,25 мм (под водой).

Коэффициент внутреннего трения для этого участка равняется 0,183 и угол внутреннего трения 10,5°.

Сравнивая угол внутреннего трения для фракций слюды в воздушно-сухом состоянии и под водой, можно видеть, что под водой он значительно ниже, для фракции 2—1 и 1—0,5 он уменьшился на 10,5 и 8,5°, для фракции 0,06—0,01 мм — на 6,5° и для фракции 0,5—0,25 мм — на 4,5°.

Трение в смесях

Как видно из вышеприведенных опытов, наиболее различными в отношении коэффициента внутреннего трения являются грунты из остроугольного кварца, с одной стороны, и из слюды — с другой. Поэтому нами были поставлены опыты для выяснения того, как будут влиять на коэффициент внутреннего трения грунта из остроугольного кварца добавки к нему слюды.

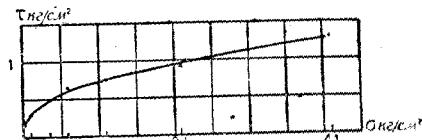
Кроме того опыты были поставлены и для выяснения зависимости коэффициента внутреннего трения от пористости грунтов. Некоторые физические и механические свойства грунтов, как например, временное сопротивление сжатию, сопротивление вдавливанию изменяются в грунтах с изменением их пористости¹. Так, временное сопротивление сжатию смеси из 90% крупного песка (фр. 2—1 мм) и 10% глуховского каолина равно 4,6 кг/см²; в другой смеси, отличающейся от первой только тем, что в ней 40% крупного песка заменено пылью (фр. 0,05—0,01 мм), оно равно 52,7 кг/см², т. е. больше, чем в первой смеси в 11 раз. Пористость первой смеси равна 35,34%, пористость второй — 24,49%. Та же картина получилась при изучении сопротивления вдавливанию этих смесей. Максимальное сопротивление вдавливанию первой смеси (90% фр. 2—1 мм + 10% глуховского каолина) равно 11 кг/см² при погружении штампа на 2,5 мм, максимальное же сопротивление второй смеси равно 28 кг/см².

Несомненно одной из причин, обусловливающих различие во временном сопротивлении сжатию и в сопротивлении вдавливанию этих двух смесей, была та, что величина трения в них была неодинакова. Во второй смеси площадь соприкосновения частиц больше, чем в первой, так как в ней пылеватые частицы, заполняя поры песчаных, сильно увеличивают число контактов.

Трение в смеси остроугольного кварца со слюдой

Для выяснения влияния на коэффициент внутреннего трения остроугольного кварца добавок слюды, была приготовлена смесь из 90% фракции 0,5—0,25 мм остроугольного кварца и 10% той же фракции слюды.

¹ В. В. Охотин, Лабораторные опыты по составлению дорожных смесей по принципу наименьшей пористости. 1929.



Фиг. 35. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки во фр. слюды 0,06—0,01 мм (под водой).

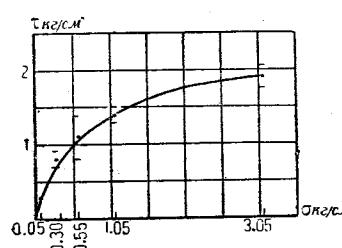
ды. Эта смесь была испытана в отношении трения в воздушно-сухом состоянии и в насыщенном водой состоянии. Результаты испытаний приводятся в табл. 31.

Таблица 31

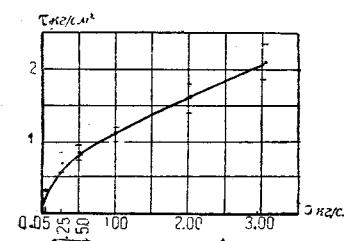
Состав смеси	Вертикальная нагрузка в kg/cm^2	Горизонтальное срывающее усилие в kg/cm^2	Средняя ошибка в kg/cm^2	Влажность при опыте (средн. велич.)
Воздушно-сухое состояние				
90% фракции 0,5—0,25 мм остроугольного кварца и 10% фракции 0,5—0,25 мм слюды	3,05 1,05 0,55 0,30 0,05	1,89 1,43 1,10 0,80 0,32	0,13 из 2 опр. 1,10 > 4 » 0,38 > 6 » 0,13 > 5 » 0,05 > 5 »	Воздушно-сухое состояние
Та же смесь	3,05 2,05 1,05 0,55 0,30 0,05	2,09 1,67 1,09 0,81 0,69 0,21	0,26 из 5 опр. 0,16 > 3 » 0,08 > 4 » 0,09 > 5 » 0,14 > 5 » 0,02 > 3 »	35,0% 36,9% 35,3% 37,6% 34,5% —
Насыщенное водой состояние				

Если результаты опытов в воздушно-сухом состоянии нанести в осах прямоугольных координат, то зависимость между τ и σ выразится, как это видно на фиг. 36, кривой линией.

Принимая эту зависимость в интервале вертикальных нагрузок от 0,55 до 3,05 kg/cm^2 за прямолинейную, коэффициент внутреннего трения получится равным 0,36 и соответствующий ему угол 20°.



Фиг. 36. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки в смеси из 90% остроугольного кварца фр. 0,5—0,25 мм и 10% слюды фр. 0,5—0,25 мм (возд.-сухое состояние).



Фиг. 37. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки в смеси из 90% остроугольного кварца фр. 0,5—0,25 мм и 10% слюды фр. 0,5—0,25 мм (насыщено водой состоянием).

В насыщенном водой состоянии зависимость между τ и σ также является криволинейной, но при нагрузках выше 0,55 kg/cm^2 она может приближенно рассматриваться, как прямолинейная (фиг. 37).

Коэффициент внутреннего трения в этой части равняется 0,55, которому отвечает угол в 29°.

Если сравнить угол внутреннего трения смеси с углом во фракции 0,5—0,25 мм остроугольного кварца и слюды, то видно, что он в смеси почти совпадает с углом внутреннего трения у слюды и резко отличается от такового в остроугольном кварце, а именно, в слюде он равен 17,5°, в смеси 20°. Разница лежит почти в пределах ошибки опыта, тогда как в кварце угол внутреннего трения равен 46°. Отсюда вытекает, что при наличии в песчаных грунтах слюды 10% по весу свойства грунта в отношении трения близки к чисто слюдистым грунтам.

Трение смеси с малой пористостью

Для выяснения влияния пористости на коэффициент внутреннего трения была взята смесь из двух фракций окатанного кварца: 65% фр. 0,5—0,25 мм и 35% фр. 0,05—0,005 мм. Пористость этой смеси

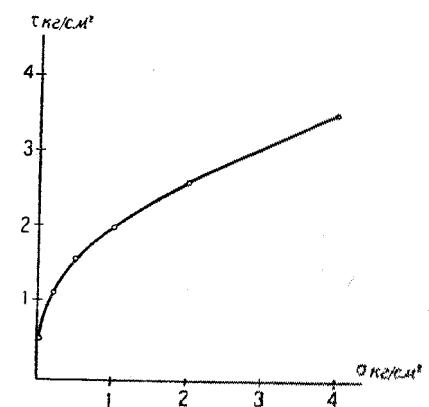
Таблица 32

Состав смеси	Вертикальная нагрузка в kg/cm^2	Горизонтальное срывающее усилие в kg/cm^2	Средняя ошибка в kg/cm^2
65% фр. 0,5—0,25 мм + 35% фр. 0,05—0,005 мм	4,0 2,0 1,0 0,5 0,25 0,05	4,0 2,57 2,06 1,59 1,05 0,51	0,26 из 4 опр. 0,05 > 3 » 0,09 > 3 » 0,13 > 3 » 0,10 > 3 » 0,05 > 3 »

равнялась 22,5%. Коэффициент внутреннего трения определялся в воздушно-сухом состоянии. Результаты испытаний приведены в табл. 32.

Нанеся результаты опытов в осах прямоугольных координат, зависимость между вертикальной нагрузкой и горизонтальным срывающим усилием выражается кривой линией, изображенной на фиг. 37а.

При проведении касательной к этой кривой в точке, отвечающей вертикальной нагрузке в 2 kg/cm^2 , тангенс угла наклона касательной к оси абсцисс получается равным 0,9, которому соответствует угол в 42°. Если сравнить угол внутреннего трения смеси с таким во фр. 0,5—0,25 мм окатанного кварца, то он больше на 15° (во фр. 0,5—0,25 мм угол внутреннего тре-

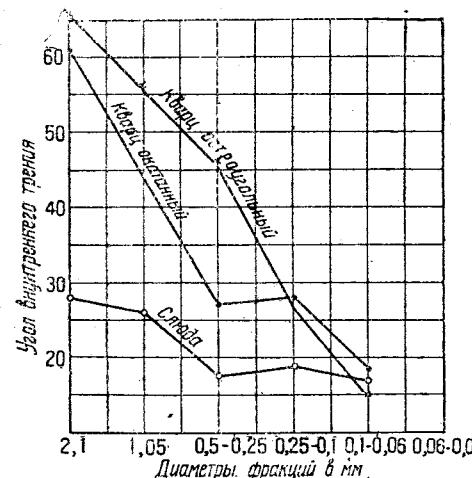


Фиг. 37 а. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нагрузки в смеси из 65% фр. 0,5—0,25 + 35% фр. 0,05—0,005 мм окатанного кварца (возд.-сухое состояние).

ния 27°). Таким образом, прибавка к фр. $0,5 - 0,25 \text{ мм}$ 35% тонкой пыли (фр. $0,05 - 0,005 \text{ мм}$), уменьшив ее пористость с 33,7% до 22,5%, в то же время существенным образом увеличила коэффициент внутреннего трения.

На основании всего полученного экспериментального материала по трению можно установить, что на величину угла внутреннего трения в грунтах влияет крупность частиц, их минералогический состав, степень окатанности, пористость грунтов и влажность.

Если выразить графически зависимость между углом внутреннего трения и размерами частиц грунтов из разных минералов и степенью их окатанности в осях прямолинейных координат (фиг. 38), то получаются ломаные линии, которые показывают, что: 1) с уменьшением размеров частиц угол внутреннего трения уменьшается, 2) наибольший угол внутреннего трения получается у остроугольного кварца и наименьший у слюды и 3) у остроугольного кварца он больше, чем у окатанного.



Фиг. 38. Диаграмма изменения угла внутреннего трения в зависимости от размеров фракций кварца и слюды.

де 19° ; принимая во внимание ошибки опыта, можно считать эти величины между собой близкими. Такое же явление наблюдается во фракции $0,06 - 0,01 \text{ мм}$ под водой. Угол внутреннего трения для окатанного кварца получается 9° , для остроугольного 12° и для слюды $10,5^\circ$.

Уменьшение пористости грунтов внесением в них заполнителей значительно увеличивает их коэффициент внутреннего трения.

Угол внутреннего трения в грунтах в зависимости от содержания в них воды изменяется так: в воздушно-сухом состоянии он меньше, чем во влажном и даже при капиллярном насыщении он выше, чем в сухом состоянии, под водой угол трения снижается на значительную величину по сравнению с воздушно-сухим состоянием.

Зависимость между горизонтальным срывающим усилием и вертикальной нагрузкой принимается прямолинейной и выражается формулой: $\tau = c_0 + f\sigma$ (закон Кулона)¹. Однако эта зависимость может быть установлена только в определенном интервале вертикальных нагрузок, в

¹ Н. А. Цытович, Основы механики грунтов.

большинстве случаев между 1 и $4 \text{ кг}/\text{см}^2$. Если же взять весь интервал нагрузок от $0,05$ до $4 \text{ кг}/\text{см}^2$, то эта зависимость более сложная и может быть в общем виде выражена многочленом:

$$\tau = a + b\sigma + c\sigma^2 + d\sigma^3 + e\sigma^4 + f\sigma^5.$$

Способность грунтов удерживать битумы

Способность грунтов удерживать битумы изучалась нами с точки зрения влияния на это свойство минералогического состава грунта и степени его дисперсности.

При разработке этого вопроса, прежде всего, было выяснено, какое надо брать соотношение между грунтом и битумом, чтобы получить показательные результаты. В этих целях были взяты в качестве грунта фракция $0,25 - 0,05 \text{ мм}$ кварцевого песка и гудрон с удельным весом 0,9. Гудрон и песок взяты в отношениях: 1:3, 1:2 и 1:1.

Оказалось, что концентрация 1:3 совсем не годится для испытаний, так как при этом весь гудрон задерживается песком и при продолжительном кипячении лишь происходит его частичное разложение, с выделением более легких масел.

Концентрация 1:2 дает довольно хорошие результаты для более крупных фракций, но для фракций $< 0,05$ она оказалась также непригодной для испытаний (по тем же причинам, что и концентрация 1:3).

Наиболее пригодной оказалась концентрация 1:1, которая годна во всех случаях и применялась при дальнейших испытаниях.

Сама методика испытаний была такова. Смесь приготовляется в большой фарфоровой чашке; сначала отвешивается в этой чашке гудрон, затем туда всыпается равное количество по весу грунта, смесь тщательно перемешивается шпателем или стеклянной палочкой и ставится на $1/4 - 1/2 \text{ часа}$ в термостат или на плитку при температуре $100 - 150^\circ$. После нагревания смесь снова тщательно перемешивается, и из нее берется навеска в предварительно взвешенную глубокую фарфоровую чашечку диаметром 7—8 см.

Чашечка со смесью ставится в химический стакан (800—1000 см) на форфоровый треугольник с ножками, в стакан наливается дистиллированная вода на 3—4 см выше чашечки, и стакан ставится на плитку для кипячения. Треугольник ставится в стакан для того, чтобы чашечка не соприкасалась с дном стакана и не нагревалась выше 100° . Кипячение производится до тех пор, пока не прекратится выделение битума из смеси. Тогда стакан снимается с плитки, и плавающий на поверхности воды гудрон собирается маленькой фарфоровой чашечкой или часовым стеклом. Часть гудрона, приставшая к стенкам стакана, обтирается кусочком фильтровальной бумаги, эти кусочки вместе с маленькой чашечкой, в которой находится собранный с поверхности гудрон, помещаются в фарфоровую чашку большей величины и подсушиваются для удаления воды при температуре $60 - 70^\circ$.

После охлаждения стакана, из него вынимают чашечку со смесью, сливают из нее воду и снаружи вытирают досуха полотенцем, а внутри фильтровальной бумагой, осторожно, чтобы не задеть оставшейся смеси. Затем чашечка ставится в термостат и сушится 1 час. при температуре $100 - 105^\circ\text{C}$ и, после охлаждения в эксикаторе, взвешивается.

Разность с первоначальным весом смеси должна бы показать количество выделенного гудрона. Но так было бы, если бы выделялся только гудрон, на самом же деле он при выделении захватывает с собой частички грунта, и на эти частички надо сделать поправку. Поправку можно сделать двояко.

1. Экстрагировать выделенный бензином гудрон, собранный в маленькую чашечку и на фильтровальную бумагу (то, что помещено в большую фарфоровую чашку). Оставшиеся после экстрагирования частички грунта высушить и взвесить. Полученное количество вычесть из первоначального количества выделенного гудрона. Разница будет равна весу чистого выделенного гудрона.

2. Второй путь таков: оставшаяся после кипячения смесь обрабатывается бензином, оставшийся после экстрагирования грунт высушивается и взвешивается. Если количество грунта после экстрагирования и высушивания окажется меньше взятого для опыта, то по разнице их весов определяется количество выделенного с гудроном грунта; его отнимают от первоначальной цифры выделенного вещества, и получается количество чистого выделенного гудрона. При более мелких фракциях удобнее употреблять первый путь, а при более крупных — второй, потому что мелкие фракции отстаиваются очень медленно и часть их проходит через фильтр. При первом же способе количество фракции, которое нужно собрать после экстрагирования, небольшое, и эту работу можно провести скорее. Лучше всего при каждой работе со смесью экстрагировать то и другое.

Сходимость параллельных опытов по разработанной методике оказалась удовлетворительной, как видно из таблицы 33.

Таблица 33

Состав грунта	№ испытаний	Количество удержанного гудрона в грунте
Фракц. 0,5—0,25 кварцевого песка, обраб. HCl	{ I II	58,85% 58,64%
Фракц. 0,25—0,05 кварц. песка, обраб. HCl	{ I II	66,84% 66,86%
Фракц. 0,05—0,01 кварц. песка, обраб. HCl	{ I II	77,22% 77,84%
Фракц. <0,01 кварц. песка, обраб. HCl	{ I II	92,09% 92,40%
Фракц. 0,25—0,05 песка из микроклина	{ I II	60,83% 60,00%
Фракц. 0,25—0,05 песка из олигоклаза	{ I II	62,90% 62,41%

После установления методики был произведен ряд определений поглощения гудрона различными грунтами, а именно: были взяты различные

фракции чистых минералов — кварца, микроклина, олигоклаза и природного силурийского песка красного цвета (частицы песка покрыты гидратами железа). Гудрон употреблялся тот же, что и при установке методики — удельный вес 0,9. Кроме того применялся битум марки № 3.

Полученные результаты приведены в табл. 34 и на диаграммах фиг. 39.

Таблица 34

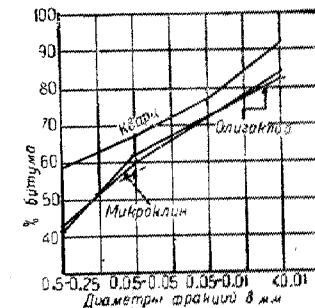
№	Название грунтов	Величина диаметров фракций в мм	Колич. удержан. грунтом гудрона (в проц.)	Колич. удержан. грунтом битума мар. № 3 (в проц.)
1	Кварц промыт. HCl	0,5—0,25	58,85	56,58
2	»	0,25—0,05	66,80	85,43
3	»	0,05—0,01	77,21	—
4	»	<0,01	92,40	—
5	Песок силурийский	0,25—0,12	58,58	—
6	»	0,25—0,05	62,90	—
7	»	<0,01	91,72	—
8	Микроклин	0,5—0,25	43,41	—
9	»	0,25—0,05	60,83	75,61
10	»	<0,01	84,68	—
11	Олигоклаз	0,5—0,25	42,59	—
12	»	0,25—0,05	62,90	71,62
13	»	<0,01	82,65	—

Из рассмотрения этой таблицы видно, что степень дисперсности частиц при удерживании гудрона играет большую роль, с уменьшением размеров фракции каждого минерала увеличивается его удерживающая способность. Наименьшая удерживающая способность обнаруживается во фракции 0,5—0,25, а наибольшая во фракции <0,01.

Кроме дисперсности частиц на количество удержанного битума грунтом влияет и минералогический состав последнего. При рассмотрении кривых фиг. 39 видно, что разница удерживающей способности у минералов микроклина и олигоклаза незначительная, но если их сравнить с кварцем, то разница уже становится более заметной. Кварц во всех случаях удерживает битума больше, чем микроклин и олигоклаз.

Для изучения прочности удерживания грунтами поглощенного битума был поставлен следующий опыт: одна навеска грунта с гудроном кипятилась в течение 2 часов, а другая — 4 часа. Результаты этих испытаний даются в таблице 35.

Из этой таблицы видно, что разница, получаемая при кипячении смеси гудрона с кварцем 2 и 4 часа, оказалась равной 8%, а у микроклина и олигоклаза — 2—3% при тех же условиях. Очевидно, микроклин и олигоклаз удерживают гудрон прочнее, чем кварц.



Фиг. 39. Диаграмма зависимости количества удержанного битума от минералогического состава и тонкости частиц грунта.

Таблица 35

Наименование грунтов	Величина фракций в мм	Время кипячения	Колич. удерж. гудрона	Разница в %%
Кварц непром. НСI . . .	0,25—0,05	2 час.	56,90%	8,90%
" . . .	0,25—0,05	4 "	48,00%	—
Микроклин	0,25—0,05	2 "	60,00%	2,99%
"	0,25—0,05	4 "	57,01%	—
Олигоклаз	0,25—0,05	2 "	61,93%	2,01%
"	0,25—0,05	4 "	59,92%	—

Затем был исследован вопрос о влиянии пористости на способность грунта удерживать битум. Была искусственно приготовлена грунтовая смесь с наименьшей пористостью такого состава:

Величина фракций в мм	Количество (в проц.)	Минералогический состав
2—1	26,8	
1—0,5	21,4	
0,5—0,25	17,3	кварц
0,25—0,12	14,0	
0,12—0,05	11,3	
0,05—0,01	9,92	

Из этого грунта была приготовлена смесь 1:1 с гудроном, удельного веса — 0,9, в которой и определялась удерживающая способность вышеописанным способом, т. е. кипячением смеси в воде. Количество оставшегося в смеси гудрона равнялось 56,35%.

В смеси из одной фракции грунта (0,25—0,12 мм) с гудроном (частицы фракции 0,25—0,12 мм в единице объема имеют ту же промерную поверхность, что и частицы предыдущей смеси) последнего после кипячения осталось 58,58%.

Как видно, разница в обоих опытах небольшая, очевидно, пористость не оказывает особого влияния в сыпучих грунтах на способность удерживать битумы ввиду того, что гудроном обволакивается каждая частичка в отдельности.

Из всего вышезложенного можно сделать следующие выводы.

1. Дисперсность грунтов, при определении их удерживающей битумы способности, играет большую роль — с увеличением дисперсности грунтов увеличивается и их способность удерживать битумы.

2. Минералогический состав сыпучих грунтов, при определении их способности удерживать битумы оказывается, хотя и не очень сильно.

3. Прочность удерживания грунтами битума, выявляемая путем воздействия на смеси кипящей воды 2 и 4 часа, оказывается большей для микроклина и олигоклаза и меньшей для кварца.

4. Пористость сыпучих грунтов (песков) имеет мало значения на их удерживающую способность, так как битумом обволакивается каждая частичка в отдельности.

СВЯЗНЫЕ ГРУНТЫ

Физико-механические свойства связных грунтов, в первую очередь, зависят от содержания в них глинистых частиц. Так, свойство связности в грунтах, откуда они получили свое название, всецело обусловливается этими частицами, другие, более крупные частицы свойством связности практически не обладают.

Под понятием глинистых частиц в грунтоведении объединяется природный дисперсный материал, состоящий из частиц диаметра $< 0,005 \text{ mm}$, имеющих скорость падения в воде меньшую $\frac{1 \text{ см}}{36 \text{ мин.}}$. С этим термином связывается определенное представление о высокой пластичности, липкости, большой усадке, большой влагоемкости и ряде других физических свойств. Однако с точки зрения этих физических свойств нельзя дать для глинистых частиц всех грунтов общей количественной характеристики их, так как физические свойства их подвержены широким индивидуальным колебаниям, в зависимости от степени дисперсности и природы частиц.

Применение связных грунтов в качестве сырьевых материалов для различных отраслей техники, в том числе применение их как дорожно-строительных материалов, выдвинуло вопрос о количественной оценке важнейших физических свойств и побудило исследователей к выявлению доминирующих факторов, обуславливающих те или другие из них.

Вследствие того, что свойства связных грунтов как дисперсной системы обусловливаются влиянием большого числа факторов, трудно дифференцируемых экспериментально, выделить и изучить влияние каждого из них представляет сложную задачу, не разрешенную до конца и до настоящего дня.

Исторически внимание отдельных исследователей привлекали различные факторы: содержание гидратов глинозема, тонкость зерен, форма частиц, характер сопряжения их („войлочная структура“), наконец, присутствие коллоидного высокодисперсного вещества и степень сольватации его частиц. Авторами выдвигались отдельные из перечисленных факторов, в качестве основных, обуславливающих собой комплекс глинистых свойств и, в первую очередь, пластичность, как свойство весьма характерное для связных грунтов. В вопросе изучения пластичности большую работу произвел Аттерберг¹, который изучал ее в природных грунтах, искусственных глинах, полученных отмучиванием частиц размолотых минералов и в химических препаратах коллоидального состояния. В произведенных им опытах над размолотыми минералами пластичные свойства показали только глинистые фракции некоторых минералов, обладающих пластинчатой и чешуйчатой формой частиц. К числу исследованных Аттербергом минералов относятся мусковит, биотит, серпентин,

¹ Atterberg, Die Plastizität der Tone. Intern. Mitt. I. Bodenk. 1911.

хлорит, каолинит, тальк и гематит. Из числа препаратов — сернокислый барий и фтористый кальций. Кварц, полевой шпат, гидраты алюминия, железа и водная кремниевая смесь оказались совершенно непластичными.

Из этих данных Аттерберг делает вывод, что „...только чешуйчатая или листоватая форма частичек обуславливает пластичность минералов“, и присоединяется к мнению Vogt и Orton, объяснявших пластичность глин содержанием в них большого количества мельчайших плоских частиц. Аттерберг брал для опыта глинистые фракции со скоростью падения частиц в воде меньшей $\frac{10 \text{ см}}{8 \text{ час.}} = 1,25 \text{ см/час.}$, причем эта же

фракция при дальнейшем размельчении частиц внутри нее (Аттерберг производил это взвешиванием с песком) увеличивала глинистые свойства.

Выводы, к которым приходит Аттерберг, не могут считаться безусловно установленными, а опыты — безупречными, потому что если вообще любая фракция, отмеченная из двух разных образцов, будет давать материал различной степени дисперсности, в зависимости от того, к какому пределу расположится ближе наибольшее число частиц, то в случае отмечивания частиц заведомо различной формы, дисперсность в смысле развития удельной поверхности не может быть одинаковой. Особенно сильно все сказанное относится к фракциям, не ограниченным снизу, которые употреблялись у Аттерберга. С другой стороны, наличие пластичности у таких препаратов, как сернокислый барий или фтористый кальций, не подтверждает теории Аттерберга. Если сближать осажденные препараты BaSO_4 и CaF_2 с природными минералами — баритом и флюоритом, как это делает Аттерберг, то по указанию П. А. Земятченского¹, пластичность их нельзя объяснить чешуйчатой или листоватой формой частиц, так как у барита спайность идет по трем направлениям, а у флюорита — по четырем. При измельчении этих минералов (или осаждении мелких кристаллов) нельзя ожидать образования частиц чешуйчатой формы.

Работы проф. Земятченского, Безрука и наши опыты, рассмотренные в части „Сыпучие грунты“, доказывают обратное. Уже в тонкопылеватых грунтах такие важные свойства, как коэффициент фильтрации, пористость, коэффициент внутреннего трения, мало зависят от минералогического состава. Так как эта зависимость в сыпучих грунтах уменьшалась с уменьшением размеров частиц, то можно думать, что в тонкодисперсных фракциях, каковыми являются глинистые частицы, эта зависимость будет еще меньшей.

Удельная поверхность грунтов

Из всех данных, приводимых по поводу влияния на пластичность различных факторов, можно считать безусловно установленным, что с увеличением степени дисперсности глинистых частиц, а следовательно и их поверхности, пластичность грунта повышается и что материал, состоящий из частиц крупнее 0,005 м.м., оказывается непластичным. Вместе

¹ П. А. Земятченский — Глины, их физические, химические и технические свойства (Труды Гос. иссл. кер. ин-та. 1927 г.).

с возрастанием степени дисперсности резче проявляются в грунтах и другие характерные свойства глинистых частиц (набухание, усадка, связность).

Проф. П. А. Земятченский¹ о значении удельной поверхности² для свойства пластичности говорит так: „В массе глины, как в дисперсной системе, мы имеем две фазы, соприкасающиеся своими поверхностями. Как и вообще при соприкосновении двух поверхностей, так и здесь проявляются особые силы, носящие название поверхностной энергии, выражющиеся, между прочим, в изменении поверхностного напряжения. Именно в этой силе, ее величине и характере и лежит основная причина пластичности и всех других свойств системы „твёрдое + жидкое“... Результат действия поверхностного напряжения выразится тем сильнее, чем больше поверхности соприкосновения. Так как этот факт имеет общее значение, то поэтому и наблюдается, что, вообще говоря, чем тоньше зерно в грунте, тем оно пластичнее“. Таким образом, П. А. Земятченский удельную поверхность грунтов, как носительницу свободной энергии, считает основной причиной пластичности. Форма частиц будет также влиять на пластичность и другие физические свойства глин, поскольку она обуславливает большую или меньшую поверхность грунта. У плоских пластинчатых зерен поверхность будет относительно больше, чем у зерен, развитых в разных направлениях более или менее одинаково. Например, пластиника слюды может иметь значительные размеры по плоскости спайности и чрезвычайно малые в направлении перпендикуляром. Зерно кварца или полевого шпата при таком же видимом диаметре будет иметь большую толщину и относительно меньшую поверхность, нежели поверхность слюды.

Изучение влияния степени дисперсности на физические свойства грунтов затрудняется на отсутствие точного метода определения дисперсности.

Известно, что метод осаждения дифференцирует частицы по скоростям, а последние, при различной и случайной форме частиц, не находятся с их размерами в постоянной и строгой определенной зависимости.

Свойства дисперсных систем точнее характеризуются значением удельной поверхности их, чем размерами диаметров составляющих частиц, так как с ростом поверхности растет количество свободной поверхностной энергии системы. Поэтому степень дисперсности грунтов более целесообразно сравнивать по их относительным удельным поверхностям.

Среди методов определения относительной удельной поверхности наибольшим распространением пользуются методы измерения теплоты смачивания дисперсных тел и методы измерения адсорбции. Уменьшение полной поверхностной энергии дисперсной системы, при всякой адсорбции пропорционально величине поверхности раздела фаз, поэтому (для одного вещества) отношение тепловых эффектов смачивания, рассчитанных на грамм или на 1 см³ твердой фазы, равно отношению удельных поверхностей.

Теория вопроса намечает возможность воспользоваться этим методом для определения абсолютных величин удельных поверхностей.

¹ См. сноску на предыдущей странице.

² Под удельной поверхностью разумеется поверхность (в см²) единицы объема (1 см³) твердой фазы грунта.

Способ определения теплоты смачивания требует специальной „изотермической“ калориметрической методики, поэтому нами был избран метод адсорбции водяных паров, как метод наиболее легко осуществимый, хотя является весьма интересным сравнить результаты определений относительно удельной поверхности обоими методами, так как приходится считаться с наличием у грунтов различного агрегатного строения (при различных обменных основаниях) даже в случае одинаковой элементарной дисперсности. Сопоставление результатов этих методов открывает возможность суждения о доступности для воды различных состояний — внутренней поверхности микроагрегатов. Методы измерения адсорбции паров также дают возможность подойти к определению абсолютной величины удельной поверхности.

Методы определения максимальной гигроскопичности грунтов¹

Метод определения адсорбции паров воды (или метод определения максимальной гигроскопичности) был разработан Митчерлихом и видоизменен Робинзоном.

Митчерлих² при комнатной (примерно постоянной) температуре и вакууме употребляет 10% H₂SO₄ в качестве тела, создающего более или менее постоянную упругость водяных паров; при этом предполагается, что при колебаниях температуры в сторону понижения конденсации паров не происходит.

Продолжительность опыта устанавливается в 3 дня.

Робинсоном процент серной кислоты понижен до 3,3% при температуре 30° С и вакууме 40—50 мм рт. ст. Продолжительность опыта — 5 дней³.

Применение метода максимальной гигроскопичности для целей характеристики поверхности грунтов требует проведения насыщения их до постоянного веса, т. е. до состояния, при котором адсорбированная вода находится в равновесии с парами воды над серной кислотой.

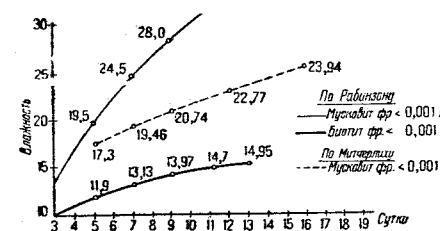
Работа по методам Митчерлиха и Робинзона в этом отношении нам не дала удовлетворительных результатов. Постоянства веса достигнуто не было, и проценты гигроскопичной воды оказывались чрезвычайно высоки (фиг. 40). Это заставило нас заняться вопросами методики определения максимальной гигроскопичности.

Употребление вместо чистой воды водных растворов каких-либо нелетучих при низкой температуре веществ (например, серной кислоты) диктуется практической невозможностью создавать постоянную темпера-

¹ Раздел разработан совместно с В. Л. Демидовым.

² Mitscherlich, Bodenkunde für Land-und Forstwirte. 1923.

³ И. Н. Антипов-Каратаяев и Рабинерсон, Почвенные коллоиды и методы их изучения. 1930.



Фиг. 40. Изменение влажности образцов по суткам при определении гигроскопичности по Робинзону и Митчерлиху.

туру, и чем большие колебания температуры наблюдаются в термостате, тем большей концентрации должен быть раствор.

Физической предпосылкой для этого является свойство растворов давать меньшую упругость водяных паров при одинаковой температуре, по сравнению с чистой водой. В результате, содержание паров не достигает максимума, возможного при данной температуре, и конденсации их при понижении температуры в известных пределах не происходит. Наши термостаты с электрической регулировкой давали отклонения от средней установленной температуры от 0,7 до 1,5° С, создавая амплитуду колебания от 1,5 до 3,0° С.

Если колебания температуры происходят от T_2 до T_1 и упругость водяных паров над раствором концентрации c при T_2 равно $P_{T_2}c$, а над водой при T_1 равно P_{T_1} , то для избежания конденсации должно быть выполнено неравенство:

$$P_{T_1} \geq P_{T_2}c \left(\frac{T_1}{T_2} \right),$$

где коэффициент $\left(\frac{T_1}{T_2} \right)$ выражает понижение (по газовым законам) упругости паров при снижении температуры от T_2 до T_1 .

При нашей работе по Робинзону, колебания температуры в термостате достигали ± 1,2° С от средней температуры 30° С. Упругость водяных паров над серной кислотой 3,3% при $T_2 = 273,2 + 31,2$ абс. равна 33 мм ртутного столба. Упругость насыщающих водяных паров при $T_1 = 273,2 + 28,8$ абс. равна 29,4 мм. Количество водяных паров — соответствующее:

$$P = P_{T_2}c \left(\frac{T_1}{T_2} \right) - P_{T_1} = 33 \frac{302}{304,4} - 29,4 = 3,3 \text{ мм рт. ст. при понижении температуры.}$$

При понижении температуры, должно быть изъято из камеры, чтобы не произошло конденсации паров.

Неудовлетворительные результаты опыта с адсорбцией над серной кислотой концентрации 3,3% показали, что серная кислота указанной концентрации неспособна достаточно быстро выводить излишнее количество паров: в опытах происходила конденсация на поверхности образца. Оседающая роса, вследствие смачивания, принимает вид ряда вогнутых менисков, расположенных между частицами почвы, над которыми при равновесии упругость паров меньше, чем над плоской поверхностью при той же температуре. Поэтому при повторном повышении температуры до 31,2° С пополнение паров могло скорее происходить за счет испарения с плоской поверхности раствора в сосуде, чем с поверхности почвы, тем более, что влага из состояния свободной росы, вероятно, быстро переходит в состояние молекулярных пленок на частицах грунта. В опытах с употреблением 10-проц. серной кислоты мы наблюдали то же явление, связанное с частичной конденсацией, хотя и выраженное слабее.

Чтобы избежать всякой возможности конденсации водяных паров, мы применили расчетный процент серной кислоты, выбранный так, чтобы сохранялось приведенное выше неравенство.

$$P_{T_1} > P_{T_2}c \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \quad (1)$$

В целях сравнимости результатов отдельных опытов, интересно изучить адсорбцию паров всегда проводить из атмосферы с одинаковой упругостью их. Мы проводили работу при упругости несколько большей 20 мм рт. ст. Заданную упругость можно получить, изменяя температуру и концентрацию кислоты. Подбор температуры и концентрации производится в согласии с неравенством (1). Если мы зададимся определенной температурой T_1 , то этим определится (при данной упругости) значение концентрации c_1 .

Необходимо проверить, удовлетворяет ли комбинация T_1, c_1 неравенству (1), при колебаниях температуры в термостате, равных ΔT . Неравенство (1), если изменение упругости водяных паров от абр. температуры над раствором концентрации c_1 обозначить через $\frac{dP}{dT} c_1$, выражается так:

$$P_{T_1} \geq P_{T_1, C_1} \left(\frac{T_1}{T_2} \right) = \left[P_{T_1, C_1} + \Delta T \left(\frac{dP}{dT} \right) c_1 \right] \frac{T_1}{T_2},$$

$$P_{T_1} \geq \left[P_{T_1, C_1} + \Delta T \left(\frac{dP}{dT} \right) c_1 \right] \frac{T_1}{T_1 + \Delta T}.$$

Умножив обе части неравенства на $(T_1 + \Delta T)$, получим:

$$\begin{aligned} P_{T_1}(T_1 + \Delta T) &\geq \left[P_{T_1, C_1} + \Delta T \left(\frac{dP}{dT} \right) c_1 \right] T_1, \text{ или } P_{T_1} \cdot T_1 - \\ &- P_{T_1, C_1} \cdot T_1 \geq \Delta T \left(\frac{dP}{dT} \right) c_1 \cdot T_1 - \Delta T \cdot P_{T_1} \end{aligned}$$

Откуда, разделив обе части неравенства на T_1 , имеем:

$$P_{T_1} - P_{T_1, C_1} \geq \Delta T \left[\left(\frac{dP}{dT} \right) c_1 - \frac{P_{T_1}}{T_1} \right]. \quad (2)$$

Если при подстановлении P_{T_1} , P_{T_1, C_1} , ΔT , T_1 и $\left(\frac{dP}{dT} \right) c_1$ неравенство окажется сохраненным и близким к равенству, то комбинация T_1, c_1 является удовлетворяющей; если неравенство не соблюдено, то следует повысить T_1 на 1° и испытать при новом значении c и $\left(\frac{dP}{dT} \right) c_1$

Практически подбор концентрации, удовлетворяющей при определенных T_1 поставленным условиям, производится так. На диаграмме (фиг. 41), изображающей изотермические кривые изменений упругостей водяных паров над раствором серной кислоты в зависимости от концентрации, паров над раствором серной кислоты в зависимости от концентрации, проводится горизонталь, соответствующая выбранной упругости (A мм рт. ст.), до пересечения с рядом изотерм

$t^\circ, t + 1^\circ, t + 2^\circ, + \dots$

Каждая точка пересечения дает значения концентраций $c, c_1, c_2 \dots$

Испытывая комбинации (t°, c) , $(t + 1^\circ, c_1)$ $(t + 2^\circ, c_2)$ отдельно мы поступаем следующим образом. Находим по вертикали, соответствующей концентрации c , значение $\left(\frac{dP}{dT} \right)_c$ в интервале температур t и $t + \Delta t$, для чего измеряем по вертикали расстояние между изотермами t° и $t + 1^\circ$, которое дает нам в соответствующем масштабе значение $\left(\frac{dP}{dT} \right)_c$.

После этого подставляем значения найденных величин в неравенство (2) и если оно не удовлетворено, то переходим к следующей точке $(t + 1, c_1)$. В условиях наших опытов, проводя горизонталь, соответствующую 20 мм рт. ст., пересекаем изотермы $23^\circ, 24^\circ, 25^\circ \text{C} \dots$ с соответствующими этой упругости концентрациями кислоты: 8%, 16%, 22%...

Подставляя для первой точки $T_1 = 296,2$, $\Delta T = 2^\circ$, $P_{T_1} = 20,85$, $P_{T_1, C_1} = 20,0$ и $\left(\frac{dP}{dT} \right) c_1 = 1,15$, получим:

$$P_{T_1} - P_{T_1, C_1} = 0,85$$

$$\Delta T \left[\left(\frac{dP}{dT} \right) c_1 - \frac{P_{T_1}}{T_1} \right] = 2,16.$$

Знак неравенства (2) не сохранен. Испытывая далее следующие точки, мы найдем, что при переходе от изотермы 24°C к изотерме $24,5^\circ \text{C}$ неравенство приобретает нужный нам знак: $2,9 > 2,24$; поэтому концентрация серной кислоты, равная 19,6%, при нижней температуре в термостате $24,5^\circ$ и $\Delta T = 2^\circ$, будет достаточной для исключения возможности конденсации.

При производстве опыта, упругость паров в вакуум-экскаторе при колебаниях температуры никогда не будет достигать предельных значений, указанных на диаграмме, так как существует определенная „инерция“, и изменения упругостей будут иметь меньшую амплитуду, чем соответствующая изменения температура.

Мы не имеем данных для учета скорости, с которой раствор будет отдавать или забирать необходимые для равновесия количества пара (эти данные позволили бы нам еще ближе подвести упругость к состоянию насыщения, не опасаясь конденсации); можно лишь a-priori сказать, что эта скорость зависит от площади соприкосновения фаз и от степени удаления от состояния равновесия.

С другой стороны, слишком близкое подведение упругости пара внутри вакуум-экскатора к состоянию насыщения при неусойчивой температуре может вызывать опасения, так как наличие мельчайших частиц на поверхности образца может ускорить сужение и послужить центрами конденсации.

Употребление растворов, концентрация которых рассчитана из предположения, что содержание паров при крайних отклонениях от состояния равновесия (в пределах от T до $T + \Delta T$) за время цикла изменения опытных температур не успевает измениться, допускает известный „запас“, который создает дополнительную гарантию от конденсации. Средняя

упругость водяных паров, при которой происходит адсорбция, будет заключаться в пределах:

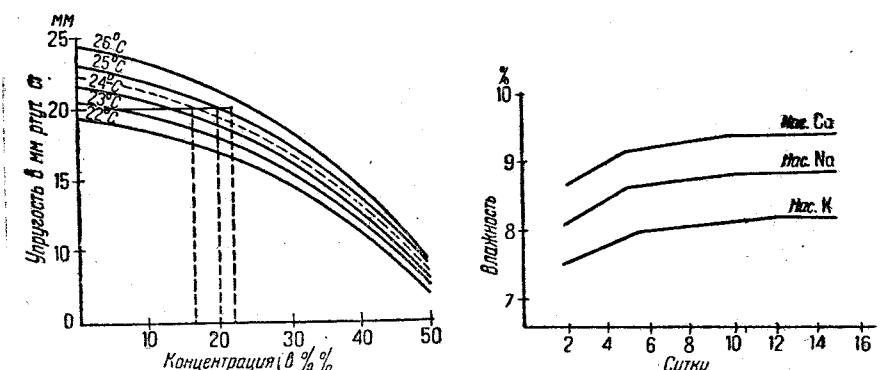
$$P_{T_1 C_1} < P_1 < P_{(T_1 + \Delta T) C_1}$$

При ширине этого интервала 2—2,5 мм средняя упругость, вероятно, не будет отличаться от "избираемой" больше чем на 1—1,25 мм.

Результаты неоднократных работ с определением адсорбции паров воды, при употреблении такого расчетного процента кислоты, показали, что здесь всегда получается достижение постоянного веса на 9—12 сутки при взвешивании с точностью до 4-го знака (ход кривых см. на фиг. 42).

Определение удельной поверхности грунтов по их гигроскопичности¹

По разработанной нами и описанной в предыдущем отделе методике была определена гигроскопичность ряда грунтов.



Фиг. 41. Изотермические кривые зависимости упругости водяных паров над растворами серной кислоты (по цифровому материалу Regnault см. Landolt Phys.-chem. 108),

Фиг. 42. Ход адсорбции водяных паров грунтом, насыщенным Ca, Na и K, при расчетном проценте H_2SO_4 и упругости водяных паров около 20 мм.

Вначале материалом для всех этих испытаний служили образцы солонцовой почвы из Калмыцкой области (тракт Элиста—Дивное в 15 км от Элиста гор. В), насыщенные полностью Ba, Ca, Mg, K и Na.

Насыщение производилось из растворов хлористых солей. Отмытые на воронке (Ba, Ca, Mg) и отдиализированные (Na, K) образцы были высушены до воздушно-сухого состояния и испытаны на гигроскопичность, гранулометрический состав, пластичность и другие свойства.

Результаты определений гигроскопичности (при упругости паров несколько большей 20 мм рт. столба) приведены в таблице 36.

¹ Отдел разработан совместно с В. Л. Демидовым.

Таблица 36

Наименование образца	Сухая навеска в г	Колич. гигроск. воды в г	% влажности	Адсорбция по отношению к грунту, насыщенному Ca	Емкость поглощения в м-экв.
Грунт, полностью насыщенный:					
Ba	7,1737	0,6325	8,82	94,3%	Емкость поглощения (определенна по Ba) образца равна
Ca	7,4371	0,5078	9,34	100,0%	25 м-экв.
Mg	5,1884	0,4817	9,28	99,5%	на 100 г
K	5,7042	0,4649	8,15	87,2%	
Na	4,7269	0,4142	8,75	93,8%	

Примечание. При повторных определениях гигроскопичности расходжение между параллельными определениями не превосходило 0,03%.

Из приведенной таблицы видно, что почвы с двухвалентными катионами в поглащающем комплексе дают в одинаковых условиях большую гигроскопичность, чем с одновалентными. Если расположить насыщающие катионы по убывающей адсорбции, то получится ряд:

$$Ca > Mg > Ba > Na > K$$

Уменьшение адсорбции водяных паров (или гигроскопичности) при насыщении грунта натрием было наблюдано неоднократно и на других образцах.

Образец бескарбонатной глины из-под Вятки, в природном состоянии насыщенный Ca и отчасти Mg, обрабатывался раствором NaCl до полного насыщения Na, после чего избыток NaCl удалялся из грунта дialisмом.

Часть такого искусственного солонца обрабатывалась затем раствором $CaCl_2$ для обратного насыщения Ca. После адсорбции паров воды эти образцы показали, что уменьшающаяся, при насыщении бескарбонатной глины Na, максимальная гигроскопичность вновь увеличилась на значительную величину при обратном насыщении Ca.

Образец глинистого чернозема при замещении части обменного Ca на Na (9 м-экв. на 100 г) также уменьшил свою гигроскопичность. Цифровой материал приведен в таблице 37.

По исследованиям Андерсона¹ обменные основания по величине адсорбции располагаются в ряд, подобный тому, который был получен нами, однако цифры гигроскопичности, отнесенные к гигроскопичности грунта, насыщенного кальцием, им получены другие. (См. табл. 37а)

По данным Алешина² (а также Бавера) обменные основания располагаются в другой ряд:

$$Mg > H > Ca > Na$$

При этом относительные цифры для различных почв получены им неодинаковые (См. табл. 37б).

¹ См. И. Н. Антипов-Каратав и Рабинерсон. Почвенные коллоиды и методы их изучения.

² С. Н. Алешин. К вопросу адсорбции воды в почве. Физика почв в СССР, 1936.

Таблица 37

Наименование образцов	Сухая навеска в г	Колич. гигроск. воды в г	% влажности	Адсорбц. по отношению к грунту, насыщенному Ca	Емкость поглощения
Глина бескарбонатная из под Вятки, естественная	7,4660	0,6200	8,57	100,0	
Та же глина, насыщенная Na	6,8565	0,4724	6,89	83,0	40,1 м.-экв. на 100 г почвы
Та же глина, вторично насыщенная Ca	3,6260	0,2904	8,00	96,4	
Чернозем глинистый, естественный	6,8865	0,6158	8,94	100	42,2 м.-экв. на 100 г
Тот же чернозем, частично насыщенный Na	5,8936	0,4910	8,33	93,10	

Таблица 37а

Насыщающий катион	Ca	Mg	H	Na	K
Адсорбция паров воды в процентах	100	99	98	96	84

Таблица 37б

Насыщающий катион	Мощный чернозем, емкость поглощ. в м.-экв. 54,5		Выщелоченный чернозем, емкость поглощ. в м.-экв. 40,9		Средне-подзолистая, емк. погл. в м.-экв. 11,7		Краснозем, емкость поглощ. в м.-экв. 12,2	
	% гигроскоп. воды	Адсорбц. по отн. к почве, насыщ. Ca	% гигроск.	Адсорбц. по отн. к почве, насыщ. Ca	% гигроск.	Адсорбц. по отн. к почве, насыщ. Ca	% гигроск.	Адсорбц. по отн. к почве, насыщ. Ca
Ca	5,71	100,0	4,66	100,0	2,37	100,0	5,46	100,0
Mg	6,24	109,2	4,94	106,0	2,45	103,3	5,52	101,1
H	5,85	102,4	4,92	105,6	2,38	100,4	5,50	100,7
Na	5,38	94,2	4,52	97,0	1,90	80,2	5,42	99,3

Из этих цифр можно усмотреть, что с уменьшением емкости поглощения почво-грунта и, следовательно, одновременно с уменьшением дисперсности и микроструктурности, влияние обменного основания на величину гигроскопичности уменьшается и в красноземе оно равно нулю (учитывая точность опытов).

Результаты механического анализа образца из Элисты при насыщении его различными катионами приведены в таблице 38.

Таблица 38

Насыщающий катион	Проценты фракций		
	0,005—0,001 мм	0,001—0,0005 мм	< 0,0005 мм
Ca	10,78	12,21	21,53
Mg	10,00	13,13	21,20
K	5,86	9,62	43,28
Na	3,26	5,36	50,87

Примечание. Частицы > 0,005 мм не определялись.

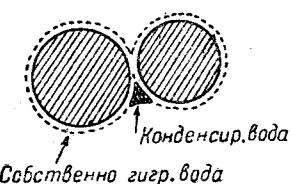
В таблице приведены средние величины из двух параллельных определений, средняя ошибка во всех определениях была очень незначительна и колебалась в пределах от 0 до 0,48%.

Из сравнения результатов механического анализа видно, что по коагулирующей способности катионы располагаются в ряд $\text{Ca} = \text{Mg} > \text{K} > \text{Na}$.

При сопоставлении этого ряда с рядом максимальной гигроскопичности бросается в глаза несоответствие между увеличивающейся дисперсностью при насыщении одновалентными катионами и уменьшением адсорбции паров воды. Это несоответствие приводит к заключению, что парообразная вода в грунтах, насыщенных двухвалентными катионами и являющихся микроагрегатными, проникает во все микропоры самых мельчайших агрегатов, и, следовательно, поверхность для адсорбции паров воды в грунтах как насыщенных двухвалентными катионами, так и одновалентными остается одной и той же. Высказанное предположение является наиболее вероятным из двух возможных: труднее предположить, что пары воды в грунтах, насыщенных двухвалентными катионами, адсорбируются только поверхностью микроагрегатов и не проникают в их поры. При этом предположении пленка гигроскопической воды должна быть (принимая во внимание гранулометрический состав, приведенный в табл. 38) в грунтах, насыщенных двухвалентными основаниями, толще таковой в тех же грунтах, но насыщенных одновалентными основаниями, больше чем в два раза.

Как указывалось выше, адсорбция паров воды почво-грунтами, насыщенными разными катионами, получается по данным отдельных авторов настолько различной, что катионы не укладываются в один ряд, при этом цифры гигроскопичности, отнесенные к гигроскопичности почвы, насыщенной кальцием, далеко не одинаковы для разных почво-грунтов. Рассматривая величину гигроскопичности в бескарбонатной глине, можно видеть, что образец после насыщения Na, вновь насыщенный Ca, хотя

и увеличил гигроскопичность по сравнению с образцом, насыщенным Na, однако его гигроскопичность ниже таковой естественной глины на 0,57%. Это явление заставляет предполагать, что разница в гигроскопичности образцов, насыщенных разными катионами, объясняется не природой катионов, а различием физического состояния грунтов. Грунты, насыщенные двухвалентными катионами, являются микроструктурными, и можно думать, что поры внутри микроструктурных агрегатов значительно меньше таковых между элементарными частицами грунтов, насыщенных одновалентными катионами. Это явление вызывает нарушение равновесия между парами воды в камере и парами, находящимися в порах микроагрегатов.



Фиг. 42 а. Схема расположения гигроскопической и конденсированной воды.

При этих условиях должны происходить перекачка воды и заполнение ею капиллярных пространств грунта (схема на фиг. 42а).

Величина понижения упругости паров над вогнутой поверхностью выражается формулой:

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot V \cdot M}{R T r}$$

где P_2 — упругость паров над плоской поверхностью,

P_1 — упругость паров над мениском,

σ — поверхностное натяжение жидкости,

V — удельный объем жидкости,

M — молекулярный вес паров жидкости,

R — постоянная уравнения Клапейрона,

T — абсолютная температура,

r — радиус мениска.

Очевидно, что, задаваясь радиусом возможного наименьшего капилляра и вычислив над соответствующим ему мениском понижение водяных паров, можно подобрать такой процент серной кислоты и температуру, при которых относительная влажность в камере будет отличаться от 100 проц. на большую величину, чем вычисленное понижение упругости паров над мениском.

При этих условиях конденсация паров воды в капиллярах наименьшего размера (и более крупных) быть не может.

Если отношение между величинами гигроскопичности образцов грунта, насыщенного Na и Ca, при понижении относительной влажности будет уменьшаться и с некоторого момента станет постоянным, то это укажет на правильность вышеизложенных предположений.

Для проверки нами была определена гигроскопичность образцов часовской глины при температуре в камере 30,5°C и при относительной влажности 80% и 90%. Результаты получились такие (табл. 39).

Как видно из полученных результатов, при относительной влажности в камере 90% и меньшей процент гигроскопической воды в образце, насыщенном Ca, равен таковому в образце, насыщенном Na, т. е. отношение остается одинаковым. При больших относительных влажностях, а именно при относительной влажности около 98%, при которой были проведены предыдущие опыты, приведенные в табл. 36 и 37, это отношение было больше единицы. Отсюда вытекает, что в опытах при относительной влажности около 98% имела место перекачка воды в капилляры. При отсутствии таковой гигроскопичность грунта, насыщенного Ca и Na, одинакова, следовательно и гидрофильность обменного Ca и Na в отношенении паров воды одинакова.

Таблица 39

Наименование образца	% адсорбированной воды	
	при относи- тельной влажн. 90%	при относи- тельн. влажн. 80%
Часовская глина насыщена Na	8,03	4,65
Та же глина насыщена Ca	8,04	4,63

На основании исследований Андерсона, Алешина и др. (см. табл. 37а и 37б) можно притти к выводу, что и грунты при насыщении их водородом не изменяют своей способности адсорбировать водяные пары. Те отклонения, которые имеют место в опытах указанных авторов, вполне объясняются неточностью эксперимента, при котором не учитывалась конденсация паров.

При той относительной влажности, при которой дальнейшее изменение отношения гигроскопичностей грунтов, насыщенных Ca и Na, перестает изменяться, диаметр капилляра будет равен двойной толщине адсорбированного слоя воды. И, следовательно, по этой гигроскопичности можно определить абсолютную величину поверхности дисперсного тела. Если в опытах с часовской глиной относительную влажность в 90%, в качестве первого приближения, принять за таковую, то радиус мениска по формуле будет равен 10^{-6} см.

Объем воды адсорбированной 1 г глины при 90% относительной влажности (и температуре 30,5°C) равен $0,08 \text{ см}^3$, принимая плотность гигроскопической воды за единицу.

Умножая толщину пленки воды, равную радиусу капилляра, на поверхность 1 г глины S , получим объем воды:

$$10^{-6} \cdot S = 0,08, \text{ откуда } S = \frac{0,08}{10^{-6}} = 80000 \text{ см}^2.$$

Если определить поверхность 1 г этой глины, при насыщении ее Na, по гранулометрическому составу (табл. 41), приняв все частицы за шары, то она получается равной 8,8 м. Как видно из цифр, оба метода дают величины одного порядка.

Так как поверхность грунтов, насыщенных Ca и Na, определенная по гигроскопичности (при отсутствии конденсации), оказывается одной и той же, то, следовательно, этим методом мы можем выявить «элементарную» поверхность грунтов, поверхность, образуемую теми минералами, из которых состоит грунт. Если изучать в образцах одного и того же грунта, из которых одни насыщены Na, а другие Ca, физические свойства, то они будут различны: в грунте, насыщенном Na, глинистые свойства выражены в значительно большей степени. Отсюда вытекает, что физико-механические свойства структурных грунтов, насыщенных Ca, Mg, в первую очередь обусловливаются не элементарной удельной поверхностью их частиц, а удельной поверхностью микроструктурных агрегатов, которые, как увидим ниже, являются очень прочными и не разрушаются от механических воздействий, даже очень сильных. Поэтому при суждении о физико-механических свойствах грунтов особый интерес представляет микроструктурная или «активная» поверхность, а в связи с этим и методы ее определения. «Активная» поверхность, являясь в грунтах структурных отличной от элементарной, в грунтах бесструктурных будет тождественной с ней.

Хотя главнейшее значение в отношении физических свойств в структурных грунтах имеет «активная» поверхность, однако и величина элементарной поверхности, можно думать, не остается без влияния. Некоторые косвенные данные говорят за то, что в том случае, когда зерна грунта представляют собой агрегаты более мелких частиц, их глинистые свойства будут выражены сильнее. Этого нужно ожидать также, исходя из соображений наличия различных количеств свободной поверхностной энергии.

Мы имели растертый в агатовой ступке мусковит, механический анализ которого дал такие результаты (см. табл. 39а):

Таблица 39а

$>0,005$	$0,005-0,001 \text{ мм}$	$0,001-0,0005 \text{ мм}$	$<0,0005 \text{ мм}$	$<0,005 \text{ мм}$
не определялись	8,99%	19,73%	46,27%	74,99%

Число пластичности мусковита получилось равным 8.

Если сравнить этот материал с одним из образцов, приведенных выше, насыщенных двухвалентными основаниями, то можно видеть, что число пластичности их значительно выше, а процент частиц $<0,0005 \text{ мм}$ ниже. Так, образец грунта из Элисты, насыщенный Ca, имел число пластичности 29,8 и гранулометрический его состав был таков (см. табл. 39б):

Таблица 39б

$0,005-0,001 \text{ мм}$	$0,001-0,0005 \text{ мм}$	$<0,0005 \text{ мм}$	$<0,005 \text{ мм}$
10,78	12,21	21,53	44,52

Такое высокое число пластичности по сравнению со слюдой при содержании частиц $<0,0005 \text{ мм}$, вдвое меньшем, нам кажется, можно объяснить в некоторой доле наличием в грунте из Элисты агрегатного состояния даже самых мельчайших частиц. Правда, в данном случае мы не знаем степени дисперсности частиц $<0,0005 \text{ мм}$ как в грунте из Элисты, так и в слюде.

Как экспериментальные данные по гигроскопичности при высокой относительной влажности, так и данные по теплоте смачивания показывают, что образцы почв, насыщенных Ca, дают больший тепловой эффект по сравнению с образцами тех же почв, насыщенных Na. Так, по данным Чапека¹, теплота смачивания для чернозема и аллювиального суглинка получилась такая (см. табл. 39в).

Увеличение теплоты смачивания грунта, насыщенного Ca, надо думать, объясняется тем, что в процессе его смачивания происходит конденсация воды внутри микроструктурных отдельностей, каковое и увеличивает количество выделяющейся теплоты.

Характеристика «активной» поверхности грунтов по набуханию

Впервые к определению «активной» поверхности подошел Митчерлих² (Митчерлих эту поверхность назвал «наружной») по отношению количества паров воды, поглощаемых грунтом, к количеству паров бензола (и других органических жидкостей) из смеси 20% бензола и 80% масла. Однако этот метод не дал положительных результатов.

Пфейфер³, исходя из того положения, что толщина пленки равна одному молекулярному слою, вычисляет величину наружной поверхности по формуле:

$$F_T = W_T \cdot 172,55 \text{ м}^2/\text{г},$$

где F_T — наружная поверхность и W_T — количество поглощаемых грунтом паров тетрахлорметана.

Так как пары тетрахлорметана могут адсорбироваться не только активной или наружной поверхностью грунтов, но и внутри микроягрегатов,

¹ Чапек М., О гидрофильности почв. Ж. Почвов. 1933 г. № 2.

² Mitscherlich, Die Bestimmung der äusseren Bodenoberflächen. Landw. Jahrb. 1911.

³ Зауэрбрай, Обзор современных германских работ по установлению связи между водными свойствами и механическим составом почво-грунтов. 1928 г.

Таблица 39в

Наименование почвы	Теплота смачивания
Чернозем из каменной стени насыщен Ca	8,18
Тот же чернозем насыщен Na	7,02
Аллюв. суглинок насыщен Ca	4,00
Тот же суглинок насыщен Na	3,12

то и эту формулу нельзя считать надежной. К тому же еще не установлено, какое количество молекул имеется в адсорбированной пленке.

Мы попытались подойти к вычислению активной поверхности через определение количества воды, поглощаемое грунтом при набухании.

При набухании грунтов, насыщенных Ca и Na, между ними выявляется резкая разница. Грунт, насыщенный Na, набухает значительно больше, чем тот же грунт, но при насыщении его Ca. Так как грунт, насыщенный Ca и Na, адсорбирует водяные пары одинаково, то нет никаких оснований предполагать, что при адсорбции воды из жидкой фазы Ca и Na будут вести себя различно. Если же в действительности мы видим громадную разницу в адсорбции грунтов, насыщенных Ca и Na, то она объясняется не природой катионов, насыщающих грунт, а разницей физического состояния грунта: грунт, насыщенный Ca, есть грунт микроагрегатный, в грунте же, насыщенном Na, элементарные частицы находятся в раздельном состоянии. В случае обединения элементарных частиц в агрегаты, последние облекают общую водяную пленку, об'ем которой значительно

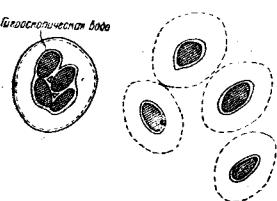
вырастает, если элементарные частицы станут существовать отдельно. Схематически это представлено на фиг. 43.

Увеличение суммарного об'ема адсорбированной водной оболочки и обуславливает больший эффект набухания при насыщении грунта Na, хотя, толщина ее на элементарных частицах грунта, насыщенного Na, такая же, как и на микроагрегатных частицах грунта, насыщенного Ca.

Для характеристики удельной поверхности грунта по набуханию, имеющий широкое распространение седиментационный метод (Рутковского)¹ с определением конечного об'ема грунта после его осаждения из равномерной суспензии, не может быть применен по следующей причине.

Для того чтобы добиться оседания сильно дисперсных частичек грунта, приходится вводить коагулятор, который изменяет агрегатное строение грунта, и потому результаты, полученные по этому методу, получаются только грубо приближенные. Не лучшие результаты получаются и при отсутствии коагулятора, так как в этом случае нельзя добиться тождественности взаимного расположения частиц грунта в осадке при параллельных определениях, и его плотность и объем варьируют в заметных пределах.

Первые опыты по определению набухания грунтов, поставленные нами, были таковы. Образцы кембрийской глины формовались при влажности, отвечающей нижней границе текучести, и затем подвергались различному уплотнению. Один из них подвержен был продолжительной нагрузке в 3 кг/см² до отжатия всей избыточной для данного давления воды; другой образец подвергался уплотнению только во время формования. Высушенные при 105°C до постоянного веса, они имели объем-



Фиг. 43. Схема расположения воды адсорбированной из жидкой фазы в грунтах микроструктурных и безструктурных.

ный вес: первый, 1,99 и второй 1,85 (при удельном весе в 2,57). Образцы в абсолютно сухом состоянии ставились на набухание в металлической форме. Дно этой формы имело мелкие отверстия, и диаметр ее (40 мм) был несколько больше диаметра высущенных образцов. Увлажнение образцов происходило капиллярным путем. Увеличение вертикальных размеров определялось с помощью мессур. Боковое расширение грунта прямо не определялось, так как в обоих случаях грунты в процессе набухания вступали в непосредственное соприкосновение с боковыми стенками формы. Конечный об'ем образца с об'емным весом 1,99 был определен в 137,63 см³, что по отношению к абсолютно сухому объему составляет 143,8%, конечный объем образца с объемным весом в 1,857 равнялся 135,65 см³, что по отношению к абсолютно сухому объему составляет 129,0%. Расхождение в величине набухания при таком способе его учета достигает в грунте, вследствие его различного исходного состояния, 14%.

Гораздо более совпадающие цифры получаются при сравнении в обоих случаях конечного объема с объемом твердой фазы (при вычислении объема, заключающего в себе 1 г абсолютно сухого грунта). При этом методе вычисления для грунта с объемным весом 1,99 получились такие цифры: 1 г абсолютно сухой твердой фазы после набухания имел объем 0,696 см³. В грунте с объемным весом 1,857 после набухания 1 г вещества содержался в 0,722 см³. Расхождение в величинах получается равным 3,6%.

При рассмотрении полученных данных, можно видеть, что грунт, имевший первоначальный объемный вес больший, после набухания на каждый грамм твердой фазы имел меньшее количество воды, чем грунт с меньшим начальным объемным весом. Так как сосуды, в которых набухали грунты, имели диаметры немногим больше диаметров цилиндров из грунтов, то в процессе увлажнения грунты соприкоснулись с боковыми стенками сосуда еще раньше полного насыщения их водой и в дальнейшем могли увеличивать свой объем только в вертикальном направлении. Увеличение объема в вертикальном направлении должно было происходить с преодолением трения грунта о боковые стени сосуда. В грунте с большим объемным начальным весом давление на боковые стени и трение должны быть большими, чем в образце с меньшим начальным объемным весом, вследствие чего процесс насыщения водой грунта с большим объемным весом встречал большие препятствия, чем процесс насыщения грунта с меньшим объемным весом.

Учитывая это обстоятельство, последующие опыты были поставлены так. Взяты были образцы часовярской глины и из них сделаны 4 цилиндра следующим образом:

	Влажность при формовке	Уплотняющее давление	Время уплотнения
I	42,5%	7 кг/см ²	5 мин.
II	42,5%	7 кг/см ²	10 мин.
III	42,5%	7 кг/см ²	60 мин.
IV	42,5%	7 кг/см ²	12 сут.

После формования, доведенные до абсолютно сухого состояния, образцы были поставлены на набухание. При этом образцы не заключались в

1 П. Земятченский, В. Охотин, В. Яновский и С. Рутковский, Методы и указания по исследованию грунтов для дорожного дела. 1928 г.

сосуд, а в свободном состоянии были поставлены на фильтровальную бумагу в эксикаторе, в нижнюю часть которого была налита вода. Увлажнение образцов происходило через фильтровальную бумагу, находившуюся под образцами и увлажнявшуюся капиллярным путем. Результаты получились такие (см. табл. 39г):

Таблица 39г

Номера цилиндров	I	II	III	IV
Влажность в %	34,93	35,69	35,69	35,96

Как видно из приведенных цифр, сходимость результатов удовлетворительная, и, следовательно, для характеристики глины можно пользоваться методом набухания ее в свободном состоянии.

То положение, что количество адсорбированной воды из жидкой фазы в глине определяется, прежде всего, величиной ее активной удельной поверхности, доказывают нижеприведенные опыты. Нами были взяты глины различные по минералогическому составу — глуховский каолин, кембрийская глина, часовская, насыщенная Ca и Na, и латная.

Глуховский каолин по своему составу отвечает химической формуле каолинита¹.

Кембрийская глина² совершенно другого минералогического состава, „Частицы, составляющие синюю глину, принадлежат, главным образом, к полевым шпатам и хлоритоподобным минералам, частично слюде и мелким зернам кварца. Другие минералы, находимые в кембрийской глине, как то: пирит, доломит, бурый шпат и пр., не играют роли в проявлении характерных свойств ее как глины”.

Латная³ глина содержит в себе (определенные сорта) от 81,12 до 90, 26% каолинита и, следовательно, является каолинитовой. Полевой шпат найден во всех исследованных образцах. Слюдя имеется в большинстве образцов. Кварц присутствует во всех образцах, составляя главную массу крупных фракций ($> 0,01 \text{ мм}$). Рутил, турмалин, циркон и гранат встречены в виде отдельных зерен.

Часовская глина⁴ по минералогическому составу является каолинитово-слюдисто-кварцевой, в ней (рядовые глины) содержится 18—27 проц. кварца, 40—50 проц. каолинита и 25—30 проц. слюды.

Во всех образцах глин был определен гранулометрический состав с разделением на большое количество фракций, и содержание воды после набухания. Процесс набухания в глинах продолжался 4 месяца. Результаты испытаний приведены в табл. 40

Таблица 40г

Наименование образца	Диаметры фракций в м.м	Количество воды при набухании на 1 г твердой фазы										
		<0,0002	0,0002—0,0004	0,0004—0,0006	0,0006—0,0008	0,0008—0,001	0,001—0,002	0,002—0,004	0,004—0,006	0,006—0,008	0,008—0,01	>0,10
Часовская глина, насыщ. Ca	4,80	16,00	15,60	16,80	5,20	10,80	1,60	14,40	5,20	0,3569 г		
Та же глина, насыщ. Na	0,85	15,48	9,25	5,11	8,53	2,97	1,29	17,90	32,39	0,8153 *		
Кембрийская глина, естеств. . . .	2,80	12,0	22,40	.	5,60	5,20	2,80	6,40	5,60	6,40	0,3419 *	
Глуховский каолин, естеств. . . .	10,33	5,58	19,79	1,17	1,15	1,12	1,72	19,79	23,20	0,8533		
Латная глина, естеств. . . .	10,4	13,6	2,0	22,0	6,4	5,2	10,0	8,4	8,0	0,3592 *		

¹ П. А. Земятченский. Каолинитовые образования южной России. 1896 г.

² П. А. Земятченский. Кембрийская „синяя“ глина. Труды Гос. иссл. керам. ин-та, 1929 г.

³ П. А. Земятченский. Огнеупорные глины окрестности ст. Латной, Киево-Воронежской ж. д., 1927 г.

⁴ Исколь. Состав глинистых материалов часовской месторождения. Труды Науч.-иссл. керам. ин-та.

Если на основании механического анализа подсчитать поверхность частиц в 1 см³ для всех глин, взяв за единицу поверхность часовярской глины, насыщенной Са, и сравнить в них количество адсорбированной воды, то соотношения получаются такие (табл. 41).

Таблица 41

Наименование образца	Отношения поверхностей глин по мех. анализу	Отношение поверхностей по воде при набухании
Часовярская глина, насыщ. Са	1	1
Та же глина, насыщ. Na	2,45	2,31
Кембрийская глина (естеств.)	0,94	0,96
Глуховский каолин (естеств.)	2,16	2,39
Латная глина (естеств.)	1,1	1,01

Как видно из приведенных цифр, во всех исследованных глинах, при всем различии их минералогического состава, отношения удельных поверхностей получаются близкими как по результатам механического анализа, так и по воде, поглощенной глинами при набухании.

Кроме чистых глин на набухание были поставлены смеси латной глины с фракцией пыли 0,1—0,06 мм. Смеси набухали в течение 4 месяцев. Результаты испытаний приведены в таблице 42.

Таблица 42

Наименование образца	Содержание воды после набухания в проц., полученное в опыте	Количество воды адсорбированной вычисленное в процентах
Латная глина	35,92	—
75% глина +25% песку	26,75	28,03
60% > +40% »	24,43	23,45
50% > +50% »	22,71	20,34
40% > +60% »	20,39	17,22
30% > +70% »	20,96	14,11
20% > +80% »	20,98	12,99
10% > +90% »	22,04	8,87

При вычислении адсорбированной воды в смесях была принята во внимание как адсорбция глиной, так и песком, которая по данным Лебедева А. Ф. для фр. 0,1—0,05 мм равна 4,75%.

Как видно из таблицы, совпадение результатов, полученных опытно и вычисленных, наблюдается только в тех смесях, в которых добавки фр. 0,1—0,06 мм не превосходили 50%, т. е. в смесях, относимых нами по гранулометрической классификации к глинам и тяжелым суглинкам. В более тощих смесях вычисленное количество адсорбированной воды

меньше полученного опытно. Это явление объясняется тем, что в смесях с малым содержанием глины, кроме адсорбированной или пленочной воды, имеется еще вода капиллярная, в тяжелых же глинах с нарушенным сложением и уплотненных капиллярной воды нет, вся вода, поступающая в такую глину, находится в молекулярном притяжении с частицами, т. е. является водой пленочной, которая обладает другими свойствами, чем капиллярная вода, и законы передвижения ее в грунтах другие.

Так как во многих грунтах при их набухании кроме пленочной воды будет содержаться и вода капиллярная, то метод определения активной поверхности грунтов должен быть таким, при котором можно отделять оба вида воды. Таким методом является метод А. Ф. Лебедева¹ определения пленочной воды центрофугированием.

Нами на центрофуге была определена пленочная вода (время центрофугирования 2 мин. и ускорение 60 000g) в тех же глинах, в которых было определено содержание воды при набухании. Если воду, удерживающую часовярской глиной, насыщенной Са, после центрофугирования принять за единицу, то в других глинах содержание воды будет таково:

Таблица 42а

Название глины	Относительное содержание воды после центрофугирования
Часовярская, насыщенная Са	1,0
Та же глина, насыщенная Na	2,33
Кембрийская глина	0,92
Латная глина	1,08

Особенности цифры получаются весьма близко совпадающими с теми, которые были получены при набухании.

Что при центрофугировании грунтов капиллярная вода из них удаляется целиком, доказывают опыты А. Ф. Лебедева. Им были взяты глинистые частицы (<0,005 мм), удерживающие в себе при центрофугировании 44,85% воды, и фр. 0,5—0,25 мм, пленочная вода которой составляла 1,6%. Эти две фракции были смешаны в различных соотношениях и подвергнуты центрофугированию. Результаты получились такие:

Фракц. 0,5—0,25 мм	Фракц. <0,005 мм	Количество воды, удерживаемое при центрофуг. в %	
		полученное экспериментально	вычисленное
100%	0%	1,6	—
0%	100%	45,85	—
20%	80%	36,50	36,20
40%	60%	26,84	27,55
60%	40%	18,92	18,90
80%	20%	9,46	10,25

¹ Проф. А. Ф. Лебедев, Почвенные и грунтовые воды, 1930.

Из приведенных цифр видно, что экспериментальные данные близко совпадают с теоретическим расчетом содержания поленочной воды в смесях. Следовательно, метод центрифугирования является пригодным для определения активной поверхности незасоленных грунтов любого гранулометрического состава.

Влияние активной поверхности на физические свойства грунтов

Влияние активной поверхности на физические свойства грунтов можно видеть из наших опытов¹ по определению пластичности в смесях кембрийской и часовянской глины. В опытах была взята кембрийская глина (частицы $<0,005 \text{ mm}$) и к ней прибавлялись постепенно увеличивающиеся количества крупной пыли (фр. 0,1—0,05 mm), такие же смеси были составлены из часовянской глины (частицы $<0,005 \text{ mm}$). Во всех смесях была определена нижняя граница текучести, граница раскатывания в проволоку и число пластичности. Результаты этих испытаний приведены в таблице 43.

Таблица 43

Состав смеси	Смеси часовянской глины			Смеси кембрийской глины				
	% частиц	% глинистых частиц ($<0,005 \text{ mm}$)	Содержание воды в % при нижней границе текучести	Содержание воды в % при границе раскатывания в проволоку	Число пластичности	Содержание воды в % при нижней границе текучести	Содержание воды в % при границе раскатывания в проволоку	Число пластичности
0,01—0,05 mm	—	100	48,26	22,32	25,94	46,52	19,23	27,29
	20	80	—	—	—	40,35	16,79	23,56
	25	75	40,41	16,57	23,84	—	—	—
	30	70	—	—	—	34,11	14,01	20,10
	40	60	31,72	13,97	17,75	30,34	12,58	17,76
	50	50	28,24	13,25	14,99	26,82	10,77	16,05
	60	40	23,16	11,43	11,73	21,65	9,70	11,95
	70	30	20,27	10,44	9,86	18,42	10,35	8,07
	80	20	16,49	16,43	0,06	16,77	не раскатывается	не пластична

Из приведенных результатов видно, что в смесях как кембрийской, так и часовянской глины при одинаковом содержании глинистых частиц и числа пластичности получаются близкими и настолько же близкими содержание воды при нижней границе текучести и при границе раскатывания.

¹ В. Охотин, Гранулометрическая классификация грунтов на основе их физических и механических свойств. 1933 г.

вания в проволоку. Если же принять во внимание точность определения границ, то цифры можно признать почти совпадающими. Так как кембрийская глина и часовянская по минералогическому составу различны, а по активной поверхности очень близки, то, следовательно, величина пластичности обуславливается только активной поверхностью, а не минералогическим составом.

При сравнении прилипания смесей из глуховского каолина с песчаной пылью (фр. 0,25—0,1 mm) и смесей кембрийской глины с той же песчаной пылью (таблица 44) между ними видна существенная разница как в отношении максимальной величины прилипания, так и в отношении интервала влажностей, в котором прилипание больше 80 г на 1 cm².¹ Как уже указывалось раньше, в глуховском каолине величина активной поверхности почги в два с половиной раза больше таковой кембрийской глины. Следовательно, и в отношении прилипания активная поверхность имеет главное значение.

Таблица 44

Состав смеси	Максимальное прилипание		Интервал влажностей, в которых прилипание > 80 г/cm ² смеси	
	% частиц 0,25—0,1 mm	% глинистых частиц ($<0,005 \text{ mm}$)	смеси глуховского каолина	смеси кембрийской глины
—	—	100	533,6	319,5
	30	70	549,0	366,6
	40	60	543,3	381,1
	50	50	466,7	360,2
	60	40	407,9	296,2
	70	30	271,9	166,5
	80	20	109,9	58,7
	90	10	43,4	31,5

Трение и сцепление в связных грунтах

Коэффициент трения и сцепление в связных грунтах изучались нами на искусственно составленных смесях часовянской глины с фракцией 0,05—0,01 mm полево-шпатового песка.

Работа с искусственной смесью из однородного материала дала возможность избежать влияния целого ряда переменных факторов, с которыми неизбежно пришлось бы столкнуться при проведении опытов на естественных грунтах.

Определение коэффициента трения и сцепления в смесях часовянской глины производилось на приборе Цытовича.

¹ Величина прилипания 80 г/cm² является предельно допустимой в одежде грунтовых дорог.

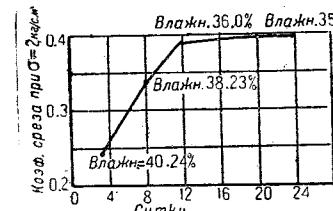
Материал для эксперимента полево-шпатовый песок фр. 0,05—0,01 был получен отмыванием, а для учета частиц $<0,005\text{ mm}$ в смесях произведен механический анализ глины (табл. 45).

Таблица 45

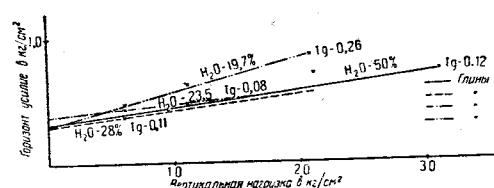
Размеры фракций в мм	0,25—0,05	0,05—0,01	0,01—0,005	0,005—0,001	$<0,001$
% содержания	1,0	0,0	16,66	10,50	69,96

Часовярская глина входила в состав приготовленных смесей в таком количестве, что частиц $<0,005\text{ mm}$ в них содержалось: 50%, 30% и 15%.

Изучение коэффициента внутреннего трения в смесях часовярской глины проводилось нами компрессионным методом и методом предварительного подсушивания грунта.



Фиг. 44. Диаграмма зависимости коэффициента среза от гидродинамических напряжений в кембрийской глине.



Фиг. 45. Коэффициент трения и сцепления в смесях часовярской глины. Метод компрессионного уплотнения.

При определении трения и сцепления компрессионным методом на дно формы укладывалось 5—6 листов фильтровальной бумаги, затем до половины форма загружалась испытуемым материалом, предварительно увлажненным до жидкого состояния. Загрузка формы производилась не сразу, а отдельными порциями с постоянным постукиванием дна формы о край твердого предмета с целью удаления из смеси пузырьков воздуха, которые могли остаться при загрузке формы. В загруженную, таким образом, форму на грунт сверху накладывалось снова 5—6 листов фильтровальной бумаги, затем в форму вставлялся поршень, и вся форма с грунтом помещалась под рычажный пресс.

Под прессом производилось отжатие избытка воды из грунта путем постепенного увеличения давления на грунт, начиная с веса поршня и кончая давлением, под которым производился срез. Процесс отжатия воды считался оконченным, когда прекращалась осадка грунта; в кембрийской глине это наблюдалось, примерно, через 15 суток.

Определение коэффициента среза до полной осадки грунта, вследствие наличия в нем гидродинамических напряжений, дает величины значительно преуменьшенные, как это видно из диаграммы, приведенной на фиг. 44.

Компрессионным методом были проведены определения коэффициента трения и сцепления в смесях при содержании в них глинистых частиц—15%, 30% и 50% и в чистой часовярской глине.

Все испытания проведены при влажности, соответствующей удельной нагрузке в 2 кг.

Результаты испытания приводятся в таблице 46.

Таблица 46

% глины	Вертик. уд. нагрузка при испытании	Горизонт. срывающ. усилие kg/cm^2	Влажность в % при испытании
15	2	0,84	0,41
	1	0,63	20,2
	0,5	0,49	20,2
30	2	0,56	23,4
	1	0,48	26,2
	0,5	0,44	20,9
50	2	0,57	29,0
	1	0,59	27,9
	0,5	0,39	28,9
80	2	0,71	0,355
	1	0,41	51,3
	0,5	0,41	51,8

Нанеся результаты этих испытаний в системе прямоугольных координат, зависимость между горизонтальным срывающим усилием и вертикальной нагрузкой получается в исследованном интервале вертикальных нагрузок прямолинейной, как это видно на фиг. 45.

Коэффициент внутреннего трения и величина сцепления, определенные графическим путем, будут таковы:

Состав смеси	Глина часовярская частиц $<0,005\text{ mm}$ 80%	Часовярск. гли.+фр. 0,05—0,01мм глин. част. 50%	Часовярск. гл.+фр. 0,05—0,01мм частиц $<0,005$ 30%	Часовярск. гл.+фр. 0,05—0,01мм частиц $<0,005$ 15%
Коэф. внутреннего трения	0,12	0,11	0,08	0,26
Угол внутреннего трения	7°	7°	5°	15°
Сцепление в kg/cm^2	0,4	0,5	0,48	0,3

Принимая во внимание точность опыта, можно сказать, что угол внутреннего трения получается в смесях, содержащих глинистых частиц $>30\%$, одинаковым, также и величина сцепления.

Таблица 47

Определение коэффициента трения и сцепления компрессионным методом занимает большой промежуток времени, поэтому нами в дальнейшем был избран другой метод определения, а именно метод сушки образцов на воздухе. Применение этого метода дало большую экономию во времени.

Метод сушки образцов на воздухе отличается от предыдущего тем, что необходимая влажность в испытуемом материале достигается не путем отжатия влаги, а путем сушки образца на воздухе с контролем влажности в образце путем непосредственного его взвешивания.

Подготовка материала к опыту производится следующим образом:

Испытуемый материал увлажняется, примерно, до влажности, соответствующей нижней границе текучести, затем для большей равномерности распределения влажности в грунте он пробивается (проминается) на стеклянной доске, после чего ставится на сутки в эксикатор с водой и по-путно в нем определяется влажность взвешиванием.

На следующий день из приготовленного накануне материала формуются цилиндры площадью 20 см^2 , для чего используется форма Цытовича на срез (срезывающее кольцо закрепляется). Каждый сформованный цилиндр взвешивается, а затем подсушивается на воздухе до того момента, когда влажность в нем будет равна влажности, полученной предварительно компрессионным путем при вертикальной нагрузке, равной наибольшей из тех, при которых предположено сделать срыв. После этого образцы ставятся на сутки в пространство, насыщенноеарами, для более равномерного распределения влажности в образце. Искомая влажность в цилиндре определяется по убыванию веса цилиндра. Расчет производится по формуле:

$$E = \frac{100 + B}{100 + A} \cdot C,$$

где E — вес цилиндра из грунта, который он должен иметь при испытании.

B — влажность, полученная компрессионным путем под нагрузкой, равной максимальной из тех, при которых испытывается образец.

A — влажность в образце в процентах при формовке.

C — первый вес сформованного образца.

Прежде чем перейти от компрессионного метода к методу предварительной сушки на воздухе, последним методом были проведены опыты с тем же материалом (и при тех же условиях), который был испытан компрессионным путем. Предварительно определенная влажность под длительной нагрузкой в 2 кг была такая: для смеси с 15% глинистых частиц — 22,3%, для смеси с 30% — 23,4% и для смеси с 50% — 30,0%. Испытания по определению зависимости срывающего усилия от нагрузки проведены при влажности, которая близко отвечала полученной по компрессионной кривой, результаты получились такие (табл. 47).

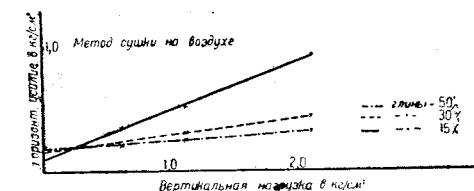
Нанеся результаты испытаний в системе прямоугольных координат, зависимость между срывающим горизонтальным усилием и вертикальной нагрузкой получается прямолинейной, как это видно на фиг. 45а.

Величины коэффициента внутреннего трения и сцепления представлены на табл. 47а.

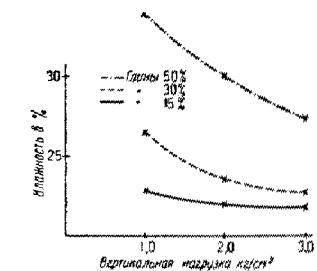
Сопоставляя результаты испытаний, полученные методом предварительной подсушки грунта на воздухе, с таковыми, полученными методом компрессии, получаем следующие данные:

Содержание глинистых частиц в смеси из часовярской глины и фр. 0,05—0,01 мм	Вертикальная нагрузка в kg/cm^2	Горизонтальное срывающее усилие в kg/cm^2	Средняя ошибка в kg/cm^2	Средняя влажность в % при испытании	Отклонения влажности в %
15%	2,12	0,92	0,04 из 3 опред.	20,9	0,03
	1,12	0,52	0,08 » 4 »	20,6	0,4
	0,62	0,28	0,05 » 3 »	22,0	0,3
30%	2,12	0,39	0,07 » 5 »	22,7	0,7
	1,12	0,31	0,05 » 4 »	22,9	1,0
	0,62	0,23	0,0 » 2 »	23,5	0,0
50%	2,12	0,32	0,005 » 2 »	30,2	0,05
	1,12	0,24	0,02 » 2 »	30,3	0,05
	0,62	0,22	0,005 » 2 »	30,3	0,2

рессионным, можно заметить, что величины коэффициентов внутреннего трения как в том, так и в другом случае одного порядка, величины же сцепления в образцах, приготовленных компрессионным путем, значительно больше. Можно думать, что величины сцепления, полученные нами ком-



Фиг. 45а. Коэффициент трения и сцепление в смесях часовярской глины. Метод сушки на воздухе.



Фиг. 45б. Зависимость влажности от давления в смесях часовярской глины с фр. 0,05—0,01 мм.

прессионным путем, являются преувеличенными, так как опыты были проведены без разборных тонких колец, благодаря чему во время уплотнения грунта часть его попадала (что всегда имеет место) между выд-

Таблица 47а

Содержание глинистых частиц в смесях	50%	30%	15%
Коэффициент внутреннего трения	0,07	0,11	0,42
Угол внутреннего трения	4°	7°	22°
Сцепление в kg/cm^2	0,20	0,16	0,05

Таблица 48

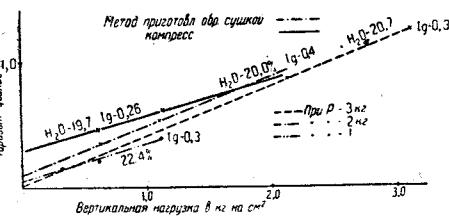
Содержание глинистых частиц в смесях из часовьярской глины и фр. 0,06—0,01 м.м. Вертикальн. нагрузка при испытан. в kN/cm^2	Горизонтальн. срывающ. усилие в kN/cm^2	Средняя ошибка в kN/cm^2		Содержание воды в образце при испытании в %	Примечание	
		Содержание воды в образце при испытании в %				
15%	3,12	1,23	0,2	из 3 опред.	20,6	Количество воды в образцах, удерживаемое при компрессионном уплотнении под нагрузкой в 3 kN/cm^2 —21,8%
	2,12	1,08	0,2	» 2 »	20,6	
	1,12	0,43	0,03	» 2 »	21,6	
	2,12	0,92	0,04	» 3 »	20,9	Кол. воды, удержан. под нагрузкой 2 kN/cm^2 —22,3%
	1,12	0,52	0,08	» 4 »	20,6	
	0,62	0,28	0,05	» 3 »	22,0	
	1,12	0,40	0,05	» 3 »	22,2	Кол. воды, удержан. под нагрузкой в 1 kN/cm^2 —22,8%
	0,62	0,22	0,01	» 3 »	22,2	
	0,37	0,15	0,005	» 2 »	22,9	
30%	3,12	0,68	0,07	» 4 »	22,2	Кол. воды, удержан. под нагрузкой в 3 kN/cm^2 —22,6%
	2,12	0,40	0,01	» 2 »	23,0	
	1,12	0,35	0,01	» 2 »	23,0	
	2,12	0,44	0,04	» 4 »	22,9	Кол. воды, удержан. под нагрузкой в 2 kN/cm^2 —23,4%
	1,12	0,32	0,05	» 4 »	22,9	
	0,62	0,23	0,0	» 2 »	23,5	
	1,12	0,15	0,003	» 3 »	27,4	Кол. воды, удержан. под. нагрузкой в 1 kN/cm^2 —26,4%
	0,62	0,12	0,003	» 3 »	27,2	
	0,37	0,10	0,0	» 2 »	27,5	
50%	3,12	0,5	0,01	» 2 »	26,8	Кол. воды, удержан. под нагрузкой в 3 kN/cm^2 —26,0%
	2,12	0,45	0,005	» 2 »	26,8	
	1,12	0,35	0,005	» 2 »	26,5	
	2,12	0,32	0,005	» 2 »	30,2	Кол. воды, удержан. под нагрузкой в 2 kN/cm^2 —30,0%
	1,12	0,24	0,01	» 2 »	30,5	
	0,62	0,22	0,005	» 2 »	30,4	
	1,12	0,20	0,01	» 3 »	33,9	Кол. воды, удержан. под нагрузкой в 1 kN/cm^2 —33,9%
	0,62	0,16	0,03	» 3 »	34,0	
	0,37	0,14	0,01	» 3 »	33,6	

внужным кольцом и стенкой цилиндра и увеличивала сопротивление сдвига при срезе.

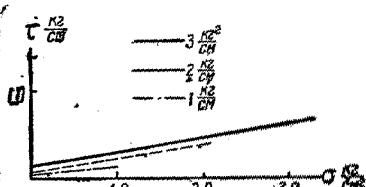
Ввиду сходимости результатов, в отношении коэффициента внутреннего трения, полученных компрессионным путем и путем предварительной подсушки образцов на воздухе, дальнейшие испытания были проведены только последним методом.

При этих испытаниях мы стремились выяснить влияние на коэффициент внутреннего трения и на сцепление вертикальной нагрузки при предельном отвечающем ей содержании в грунте воды. Данные испытаний сведены в таблице 48.

Результаты определений зависимости влажности от давлений во всех смесях приведены в виде кривых на фиг. 45б.



Фиг. 46. Коэффициент трения и сцепления в смеси часовьярской глины 15% + фр. 0,05—0,01 мм.



Фиг. 47. Коэффициент трения и сцепление в смеси часовьярской глины + 30% фр. 0,05—0,01 мм.

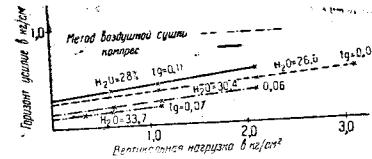
Если результаты всех испытаний на срез нанести в системе прямоугольных координат, то зависимость между срывающим горизонтальным усилием и вертикальной нагрузкой будет прямолинейной, как это видно на фиг. 46, 47 и 48.

Коэффициенты внутреннего трения и величины сцепления будут таковы:

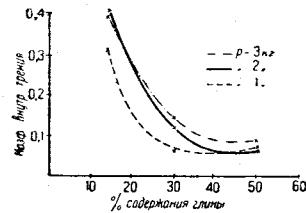
Содержание глинистых частиц в смесях в %	50	30	15	
Коэффициент внутреннего трения	При влажности, отвечающей нагрузке в 3 kN/cm^2	0,08	0,17	0,39
	То же в 2 kN/cm^2	0,07	0,11	0,42
	» в 1 kN/cm^2	0,09	0,10	0,34
Угол внутреннего трения	» в 3 kN/cm^2	4°30'	9°30'	21°
	» в 2 kN/cm^2	4°	6°20'	23°
	» в 1 kN/cm^2	5°	6°	19°
Сцепление	» в 3 kN/cm^2	0,28	0,17	0,06
	» в 2 kN/cm^2	0,20	0,16	0,05
	» в 1 kN/cm^2	0,13	0,08	0,04

Для того чтобы более наглядно представить, как изменяется коэффициент внутреннего трения в зависимости от увеличения в смесях глинистых частиц, величины объединены на диаграммах фигуры 49, где по оси абсцисс отложены проценты содержания глинистых частиц в смесях, а по оси ординат — величина коэффициента внутреннего трения. Как видно из диаграмм, коэффициент внутреннего трения в связанных грунтах зависит от количества глинистых частиц в грунте, уменьшаясь с увеличением содержания последних до известного предела.

При увеличении глинистых частиц от 15 до 30% коэффициент внутреннего трения резко уменьшается, в пределах же изменения их от 30 до 50% коэффициент трения изменяется очень мало. Поэтому все грунты, содержащие глинистых частиц более 30%, по коэффициенту внутреннего трения должны быть объединены в одну группу — «глина».



Фиг. 48. Коэффициент трения и сцепление в смеси часовярской глины 50% + фр. 0,05—0,01 мм.



Фиг. 49. Изменение коэффициента трения с увеличением глинистых частиц, в смеси часовярской глины с фр. 0,05—0,01 мм.

Так как все три диаграммы фигуры 49 однотипны, то можно притти к выводу, что характер изменения коэффициента внутреннего трения в грунтах с различным содержанием глинистых частиц один и тот же при разных вертикальных нагрузках (если воды в них содержится предельное количество, могущее удержаться под данной нагрузкой).

Это положение подтверждается и сравнением величины коэффициента внутреннего трения в смесях с различным содержанием глинистых частиц, уплотненных различно, компрессионным путем и сушкой на воздухе (фиг. 50).

На данной фигуре, как и на фиг. 49, по оси абсцисс отложены проценты содержания глинистых частиц, а по оси ординат — величина коэффициента трения.

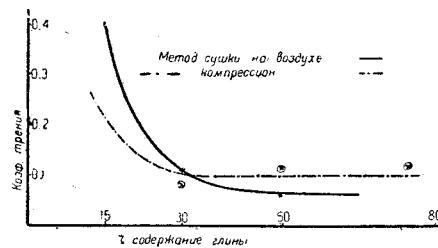
Изменение коэффициента внутреннего трения в связанных грунтах в зависимости от вертикальной нагрузки при предельном содержании в них воды видно на фиг. 51.

Коэффициент внутреннего трения с увеличением нагрузки от 1,12 до 3,12 кг/см² (а вместе с этим с уменьшением влажности) в испытуемом материале имеет тенденцию к возрастанию, хотя величина этого возрастания весьма незначительна. Так, в смеси с содержанием глинистых частиц 15% коэффициент изменяется на 0,1, а в смесях с содержанием глины 30—50% на 0,03—0,05.

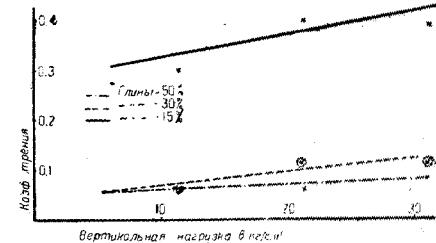
Изменение величины сцепления в грунтах с разным содержанием глинистых частиц приведено на фиг. 52.

Величина сцепления, как видно из приведенной фигуры, возрастает с увеличением содержания глинистых частиц.

Это возрастание тем больше, чем меньше влажность в грунте при испытании. Так, величина сцепления в грунте при вертикальном давлении в 3 кг на см² гораздо выше тех же величин, которые получены при испытании грунта под давлением 1 кг/см².

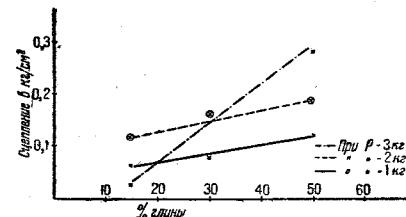


Фиг. 50. Изменение коэффициента трения в смесях часовярской глины с фр. 0,05—0,01 мм при $\sigma = 2 \text{ кг}$.

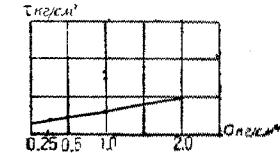


Фиг. 51. Изменение коэффициента трения в смесях часовярской глины с фр. 0,05—0,01 мм от вертикальной нагрузки.

Кроме испытаний на трение и сцепление часовярской глины и ее смесей такие же испытания проводились и с латинской глиной, которая, отличаясь от часовярской по минералогическому составу, близка ей по удельной поверхности. Испытания были проведены компрессионным путем при влажности, которая удерживается в глине под вертикальной нагрузкой в 2 кг/см². Результаты этих испытаний приведены в таблице 49.



Фиг. 52. Изменение величины сцепления в смесях часовярской глины + фр. 0,05—0,01 мм с изменением содержания глинистых частиц.



Фиг. 53. Диаграмма зависимости срывающего усилия от вертикальной нагрузки для латной глины.

Таблица 49

Вертикальная нагрузка в кг/см ²	0,25	0,5	1,0	2,0
Горизонтальное срывающее усилие в кг/см ²	0,18	0,20	0,26	0,40

При нанесении результатов опыта в системе прямоугольных координат (фиг. 53) видно, что зависимость между вертикальной нагрузкой и горизонтальным срывающим усилием является прямолинейной. Коэффициент внутреннего трения, полученный графически, равен 0,13, который

Таблица 50

рому соответствует угол внутреннего трения в $7,5^\circ$ и величина сцепления $0,15 \text{ кг}/\text{см}^2$.

Сравнивая величину угла внутреннего трения латинской глины с таковой часовярской глины, полученную компрессионным путем, видно, что они одинаковы, разница равна $0,5^\circ$, что лежит в пределах ошибки опыта.

Временное сопротивление сжатию грунта в зависимости от условий уплотнения¹

Временное сопротивление сжатию грунтов зависит от многих факторов, из которых важнейшими являются влажность грунта, содержание в нем глинистых частиц, дисперсность глинистых частиц и состав скелета. Так как определение временного сопротивления сжатию в грунтах обычно производится в абсолютно сухом состоянии, то при сравнении этого свойства в различных грунтах будут иметь особое значение три последних фактора. Но и в одном и том же грунте сопротивление сжатию должно быть не одно и то же, в зависимости от степени его уплотнения; при большей степени уплотнения частицы приходят между собой в более тесное соприкосновение и вследствие этого коэффициент внутреннего трения и сцепление в грунте увеличиваются. Отсюда вытекает, что грунт при всех других равных условиях должен обладать тем большим сопротивлением сжатию, чем больше его объемный вес, который является выражением степени уплотненности грунта. Чтобы убедиться в этом, нами были взяты две глины — часовярская и кембрийская и испытаны на сопротивление сжатию при разной степени уплотненности. Все образцы глин приготовлялись в виде кубиков $5 \times 5 \times 5 \text{ см}$. Нагрузка при формовке образцов изменялась от $15 \text{ кг}/\text{см}^2$ до $400 \text{ кг}/\text{см}^2$, влажность при формировке образцов изменялась от $20,7\%$ до $17,6\%$. Нагрузка на образцы лежала в пределах рабочего состояния и была близка к границе раскатывания в проволоку. Утрамбовка производилась на масляном прессе и длительность ее равнялась 3 мин. При формировке всех образцов вода из грунта не выступала. После формовки образцы сушились при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния, а затем в сушильном шкафу при 105° С до постоянного веса. В абсолютно сухом состоянии в образцах, после их предварительного охлаждения в эксикаторе, определялись объемный вес на приборе Богданова и сопротивление сжатию на масляном прессе. Результаты этих испытаний приведены в табл. 50 и на диаграммах (фиг. 54).

Как видно из полученных результатов, в общем, сопротивление сжатию растет с увеличением объемного веса.

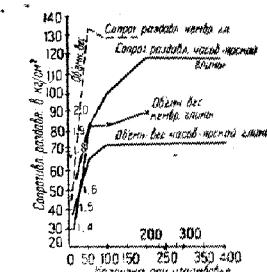
Если рассмотреть отношение между объемным весом и сопротивлением сжатию образцов часовярской глины, спрессованных разными нагрузками, то оказывается, что при уплотнении в $15 \text{ кг}/\text{см}^2$ сопротивление сжатию небольшое и соответственно объемный вес мал. Очевидно, трение в грунте, при влажности в $20,7\%$, при которой производилось прессование, было настолько велико, что сблизить частицы не удалось и не получилось равномерной плотности во всей массе. При уплотнении в $60 \text{ кг}/\text{см}^2$ при той же почти влажности как сопротив-

¹ Раздел разработан совместно с Г. Ф. Богдановым.

Наименование образцов	Нагрузка при форм. в $\text{кг}/\text{см}^2$	Влажн. при форм. в %	Объемн. вес	Сопр. сжатию в $\text{кг}/\text{см}^2$	Объемная усадка при сушке в %
Часовярск. глина	15	20,7	1,47	29,1	8,8
	60	21,2	1,76	83,0	8,4
	100	20,9	1,83	100,0	9,2
	200	21,5	1,84	118,0	7,2
	400	—	1,84	118,0	5,2
Кембрийская глина	15	18,2	1,65	44,8	8,0
	60	18,2	1,93	133,0	7,2
	100	18,0	1,93	129,6	6,8
	200	17,6	2,0	129,0	8,8

ление сжатию, так и объемный вес повысились значительно. Еще большей величины они достигли при уплотнении в $100 \text{ кг}/\text{см}^2$, однако, возрастание этих величин здесь идет медленнее, чем при увеличении уплотнения от $15 \text{ кг}/\text{см}^2$ до $60 \text{ кг}/\text{см}^2$. Еще более слабое увеличение сопротивления сжатию и объемного веса наблюдается при возрастании нагрузки от $100 \text{ кг}/\text{см}^2$ до $200 \text{ кг}/\text{см}^2$. Наконец, увеличение нагрузки от $200 \text{ кг}/\text{см}^2$ до $400 \text{ кг}/\text{см}^2$ не вызвало никакого увеличения ни сопротивления сжатию, ни объемного веса. Это явление можно объяснить тем, что влажность, при которой формировались кубики с нагрузкой в $400 \text{ кг}/\text{см}^2$, была избыточная и, когда масса уплотнилась до такого состояния, что все поры заполнились водой, нагрузка стала восприниматься последней, а не частицами грунта, и дальнейшего уплотнения происходит не могло, так как, вследствие краткости нагрузки, избыток воды не мог отжаться. Что касается кембрийской глины, то ход изменения при разной нагрузке сопротивления сжатию и объемного веса тот же самый, что и в часовярской глине, только максимальной величины сопротивление сжатию достигло при меньшей величине, а именно при $60 \text{ кг}/\text{см}^2$.

Так как глина при высыхании увеличивает связность, то интерес представляло выяснить, какое сопротивление сжатию и какой объемный вес будет в глинах, если их сформовать при малом уплотнении и затем дать высохнуть. С этой целью были приготовлены образцы из глин часовярской и кембрийской следующим образом: масса была замешана с количеством воды, соответствующим нижней границе текучести, и



Фиг. 54. Сопротивление сжатию и объемный вес часовярской и кембрийской глины, сформованных при разных нагрузках.

затем из нее сформованы кубики под давлением $7 \text{ кг}/\text{см}^2$. Во время уплотнения грунт выжимался из формы. Это указывает на то обстоятельство, что давление целиком воспринималось водой, содержащейся в грунте и не передавалось на его частицы. Сформованные образцы были просушенны сначала при комнатной температуре, а затем в сушильном шкафу при 105°C до постоянного веса. В высушенных образцах затем был определен объемный вес и сопротивление сжатию. Результаты испытаний получились такие (табл. 51):

Таблица 51

Наименование грунта	Объемный вес	Сопротивление сжатию в $\text{кг}/\text{см}^2$
Часовярская глина	1,82	30
Кембрийская глина	1,94	70

Из приведенной таблицы видно, что объемные веса глин, сформованных при нижней границе текучести, получились такими же, как и в образцах, сформованных при больших нагрузках, что же касается сопротивления сжатию, то оно значительно ниже. В кембрийской глине оно меньше почти в два раза, чем в той же глине, сформованной при нагрузке $60 \text{ кг}/\text{см}^2$ (и при больших), а в часовярской глине оно меньше почти в 4 раза. Это явление, нам кажется, можно объяснить так: когда изготавливаются образцы — просеиваются, перемешиваются с водой, то после этого частицы в массе грунта находятся в хаотическом состоянии, поры между ними в разных местах неодинакового порядка. Когда грунт высыхает, то хотя частицы грунта и приближаются друг к другу, но относительное их расположение остается прежним, т. е. неравномерным, а поэтому и связность его в сухом состоянии неодинакова, а в различных участках различна, вследствие этого и сопротивление сжатию сравнительно невелико. Когда грунт формуется под нагрузкой при такой влажности, что нагрузка воспринимается грунтом, а не водой, в нем находящейся, то от нагрузки происходит не только сближение частиц грунта, но и их перемещение относительно друг друга. Частицы из хаотического состояния переходят в устойчивое, масса во всех участках имеет одни и те же размеры пор, вследствие этого и усадка ее происходит равномерно, и внутри ее нет перенапряжений, а потому и сопротивление сжатию образцов, спрессованных под давлением, несравненно выше.

Что при утрамбовке происходит перераспределение частиц, доказывает следующий опыт. Нами была взята кембрийская глина при нижней границе текучести и из нее приготовлены образцы под давлением $7 \text{ кг}/\text{см}^2$ и $30 \text{ кг}/\text{см}^2$. Чтобы во время утрамбовки грунт не выдавливался из формы, снизу и сверху грунта был проложен слой мелкого песка. Образцы под нагрузкой оставались в течение двух суток. Вначале из образцов воды отжималось большое количество, а затем отжимания не было заметно. Следовательно, в конце опыта количество воды в грунте

было более или менее близкое к тому, которое соответствует данной нагрузке. Через двое суток образцы были вынуты из форм, высушены сначала при комнатной температуре, а затем в сушильном шкафу при 105°C до постоянного веса. В абсолютно сухих образцах были замерены объемная усадка, объемный вес и определено сопротивление сжатию. Результаты получились такие (табл. 52):

Таблица 52

Нагрузка, при которой формировались образцы в $\text{кг}/\text{см}^2$	Объемн. усадка в % к сырому образцу	Объемн. вес	Сопрот. сжатию в $\text{кг}/\text{см}^2$	Влажность после окончания формовки
30	13,72	1,91	106,0	23,71
7	17,6	1,91	122,2	28,41

Как видно из полученных результатов, объемный вес испытанных образцов получился того же порядка, что и в образцах, сформованных при больших нагрузках (фиг. 54), и в образцах, уплотнявшихся исключительно от высыхания (табл. 50). Что же касается сопротивления сжатию, то оно было значительно больше того, которое наблюдалось в образцах, уплотнение которых происходило исключительно за счет высыхания и практически было равно тому, что получилось в образцах, сформованных при больших нагрузках. Очевидно, в течение того времени, когда образцы находились под нагрузкой, из них не только выжидалась вода и частицы приближались друг к другу, но происходило и перераспределение частиц из первоначального хаотического состояния в устойчивое, обусловливающее равномерность величины пор и отсутствие в грунтах перенапряжений.

Из этих опытов также вытекает и то, что перераспределение частиц грунта из хаотического состояния в устойчивое может быть произведено малой нагрузкой, если влажность в грунте компрессионным путем будет доведена до той, которая может удержаться под данной нагрузкой в грунте. Как видно из результатов опыта, образцы, сформованные под нагрузкой в $7 \text{ кг}/\text{см}^2$ и в $30 \text{ кг}/\text{см}^2$, дали практически сопротивление сжатию одного и того же порядка, следовательно, большое сопротивление сжатию их обусловлено было не нагрузкой во время формовки, а уплотнением их при сушке. Что это так, видно из того, что после действия нагрузки при высыхании они дали большую усадку. Однаковая же величина объемного веса образцов указывает, что силы эти были одинаковы. Следовательно, действие нагрузок при уплотнении выражалось только в том, что они перераспределяли частицы в устойчивое состояние, и это перераспределение было в одинаковой степени осуществлено как нагрузкой в $7 \text{ кг}/\text{см}^2$, так и нагрузкой в $30 \text{ кг}/\text{см}^2$. В условиях данного опыта, когда отжимание воды происходило в течение двух суток, перераспределение частиц могло осуществляться тогда, когда избыток воды был удален, так как до этого времени нагрузка воспри-

нималась водой, а не грунтом и потому она (нагрузка) не могла производить перераспределения действия на частицы или оказывало действие малое. Что это так, вытекает из следующих опытов по определению сопротивления сжатию в грунтах, сформованных при разной влажности, но при одной и той же нагрузке.

Для опытов нами были взяты два грунта: часовярская глина и черноземный средний суглинок, содержащий частиц $<0,005 \text{ mm}$ — 17,6%. Из этих грунтов было приготовлено два ряда образцов: один ряд с разным содержанием воды утрамбовывался нагрузкой в 15 kg/cm^2 и второй ряд — нагрузкой в 3 kg/cm^2 . Нагрузка при формировании, когда грунт не высыпал из формы, длилась 3 минуты, при больших же влажностях, когда грунт высыпал, давалось уплотнителю погрузиться в форму до соприкосновения с ней вставки задерживателя. После формовки образцы сушились на воздухе до воздушно-сухого состояния и затем в сушильном шкафу при 105°C до постоянного веса. Высушенные образцы испытывались на сопротивление сжатию.

Результаты испытаний часовярской глины приведены в виде диаграмм на фиг. 55, где по оси абсцисс отложены влажности, при которых формовались образцы, а по оси ординат — сопротивление сжатию в kg/cm^2 абсолютно сухих образцов. Когда образцы формовались нагрузкой 15 kg/cm^2 при большой влажности (42%), то после высушивания они дали сравнительно малое сопротивление сжатию; при уменьшении воды в образцах при формировке сопротивление сжатию увеличивается и достигает наибольшей величины при влажности 32,8%. Кубики, сформованные при этой влажности, дали сопротивление сжатию, близкое к тому, что получалось при нагрузках 200 и 400 kg/cm^2 . Малое сопротивление при большой влажности объясняется тем, что при уплотнении их нагрузка воспринималась почти исключительно водой и потому перераспределение частиц грунта не происходило, они оставались в хаотическом состоянии. С уменьшением влажности нагрузка отчасти уже перераспределяла частицы, и при влажности 32,8% это перераспределение, в условиях опыта, достигло наибольшей величины, а так как сопротивление сжатию кубиков, сформованных при этой влажности, лежит близко к тому, что дают большие нагрузки, то можно думать, что данная влажность близка к той, которая соответствует данной нагрузке на часовярскую глину, если последняя под нагрузкой находится продолжительное время и избыток воды из нее отжат. Образцы, сформованные при влажностях ниже 32,8%, дают сопротивление сжатию меньшее и тем меньше, чем меньше влажность при формировке. Это явление объясняется тем, что при этих влажностях трение между частицами большое и примененная нагрузка не могла произвести перераспределения и сближения частиц в заметной степени.

Фиг. 55. Сопротивление сжатию образцов часовярской глины, сформованных при разной влажности.

Изменение сопротивления сжатию образцов часовярской глины с нагрузкой при формировке 3 kg имеет тот же характер, что и сформо-

ванных под нагрузкой 15 kg/cm^2 , однако, максимальная величина сопротивления сжатию меньше. Это можно объяснить, во-первых, тем, что в условиях опыта не была уловлена влажность, которая соответствует данной нагрузке на часовярскую глину, при ее продолжительном действии, во-вторых, может быть отчасти объясняется и тем, что данная нагрузка вообще слишком мала, чтобы вызывать полное перераспределение частиц в этой глине.

Изменение сопротивления сжатию образцов суглинистого чернозема, сформованных по тому же принципу, что и часовярская глина, приведено в виде диаграмм на фиг. 56.

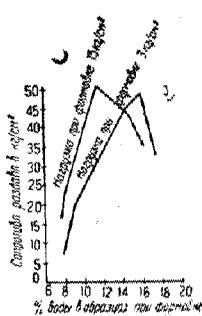
Как видно из диаграмм, ход изменения сопротивления сжатию, в зависимости от влажности при формировке образцов, тот же самый, какой наблюдался и при испытании часовярской глины, т. е. образцы, сформованные при большой влажности, дают малое сопротивление сжатию, с уменьшением влажности до известного предела (причем этот предел разный для различных нагрузок и лежит тем при большей влажности, чем меньше нагрузка на грунт) сопротивление растет, а затем снова начинает падать. При испытании данного грунта максимальное сопротивление сжатию образцов, сформованных под нагрузкой в 15 kg/cm^2 , при влажности 11,6% равно таковому же в образцах, сформованных под нагрузкой 3 kg/cm^2 , при влажности 16,1%. Надо полагать, что влажность 11,1% является влажностью, близкой к той, которая в данном грунте может содержаться под нагрузкой 15 kg/cm^2 , действующей продолжительное время на него, точно так же, как и влажность 16,1% является близкой к той, которая удерживается в грунте под нагрузкой в 3 kg/cm^2 .

На основании рассмотрения результатов этих опытов видно, что не только длительная нагрузка на грунт вызывает перераспределение частиц, но и нагрузка кратковременная производит это в значительной степени, если только она производится на грунт при таком содержании в нем волны, которое удерживается в нем под данной нагрузкой, действующей продолжительное время.

Из вышеприведенных опытов можно сделать следующий практический вывод: искусственное уплотнение грунтов рационально производить только при влажностях, близких к той, которая удерживается в них при компрессионном уплотнении под нагрузкой, равной удельному давлению на грунт уплотняющего снаряда. В настоящее время этот вывод полностью подтвержден наблюдениями грунтоведа Егорова над уплотнением катками и другими снарядами грунтов насыпей автомагистрали.

Влияние обменных оснований на физические и механические свойства грунтов

Во всех природных грунтах при замене в них обменного Ca на Na происходит изменение гранулометрического состава, поэтому установить, насколько каждый из этих факторов влияет на физико-механические



Фиг. 56. Сопротивление сжатию образцов черноземного суглинка, сформованных при разной влажности.

свойства грунтов представляет большие трудности. Для выяснения этого вопроса нами было предположено взять минерал, основания которого только двухвалентные, и, раздробив его до большой степени дисперсности, испытать на отдельные свойства. После этого насытить его Na и вновь определить те же свойства. При такой постановке степень дисперсности материала не могла увеличиться при насыщении его Na.

Основываясь на получении качественных данных о способности минералов в тонкодисперсном состоянии отдавать свои основания при воздействии на них нейтральных солевых растворов, мы решили проверить количественно: происходит ли вытеснение атома, входящего в структуру частицы, в эквивалентном отношении к поглощенному из солевого раствора катиону. Для этого свежий невыветрившийся микроклин был доведен до тонкого дисперсного состояния в агатовой ступке. (Полученный порошок при кипячении его давал с фенол-фталеином слабо-розовую окраску, что указывает на наличие слабого гидролиза).

Навеска материала весом в 12 г обрабатывалась на фильтре 1N раствором BaCl_2 в количестве 1,5 л. В собранном фильтре был определен калий, количество которого, перечисленное в $\frac{\text{м. -эквив.}}{100 \text{ г}}$, оказалось равным 10,6. После полного удаления из материала BaCl_2 промыванием его на фильтре горячей водой навеска обрабатывалась раствором хлористого аммония до полного вытеснения поглощенного Ba. Количество вытесненного Ba оказалось равным $36,5 \frac{\text{м. -эквив.}}{100 \text{ г}}$. Такое превышение количества бария над вытесненным им калием можно объяснить тем, что при диспергировании твердой кристаллической частицы на поверхности ее получаются свободные (ненасыщенные) связи. Однако, заподозрив возможность прочной адсорбции хлористого бария, опыт был повторен в следующей вариации. Тот же материал, теперь насыщенный аммонием, вторично продолжительно обрабатывался 1N раствором BaCl_2 (2,5 л). После вторичного насыщения материала Ba, главная масса хлористого бария была отмыта водой, навеска высушена на фильтре при 100°C , и в ней опять было определено количество поглощенного Ba объемным путем, взвешивая ее с определенным объемом титрованной серной кислоты и произведя обратную оттитровку. (Метод этот, как известно, исключает ошибку от возможного присутствия BaCl_2 .) Количество поглощенного Ba, определенное таким образом, оказалось равным $40 \frac{\text{м. -эквив.}}{100 \text{ г}}$. Расхождение с первым определением на $3,5 \frac{\text{м. -эквив.}}{100 \text{ г}}$ вероятно объясняется неполным насыщением в первый раз 1,5 л раствора. Нельзя отрицать и той возможности, что постоянно идущий гидролиз материала приводил к накоплению аморфных продуктов, которые увеличивали емкость поглощения материала.

Для получения тонкодисперсного порошка из минерала, содержащего двухвалентные основания, были раздроблены образцы лабрадора, роговой обманки, змеевика, известково-глиноватого граната, везувиана и биотита. При этом оказалось, что все они сильно подвержены гидролизу, холодная вода производит извлечение заметных количеств Ca и Mg.

Известно, что минералы, содержащие K и Na, труднее подвергаются

гидролизу, чем содержащие Ca или Mg, и тем не менее, мы не могли исходить из материала, содержащего Na или K и замещать их двухзначными катионами, так как было установлено, что при этом образуются микроагрегаты.

Нами была получена в тонкодисперсном состоянии слюда-мусковит такого гранулометрического состава:

	$> 0,005 \text{ м.м.}$	$0,005-0,001 \text{ м.м.}$	$0,001-0,0005 \text{ м.м.}$	$< 0,0005 \text{ м.м.}$
Не определялись . .	8,99%	19,73%	46,27%	

После насыщения этого образца кальцием из раствора CaCl_2 , гранулометрический состав его изменился следующим образом:

	$> 0,05 \text{ м.м.}$	$0,05-0,01 \text{ м.м.}$	$0,01-0,005 \text{ м.м.}$	$< 0,005 \text{ м.м.}$
Не определялись . .	16,56%	3,63%	32,60%	

Таким образом, из минералов единственно пригодными для выяснения влияния обменных оснований на физико-механические свойства грунтов являются минералы с двухвалентными основаниями. В этом случае, хотя наличие гидролиза может влиять на степень дисперсности материала, однако, это влияние при сравнительно малых количествах воды, применяемых при опытах, и небольшом времени ее воздействия, можно думать, существенного значения иметь не будет.

До настоящего времени этих исследований, за отсутствием в нашем распоряжении пригодного механического прибора для раздробления минералов, мы произвести не могли, и все испытания были проведены с природными грунтами.

В более ранней работе¹ нами было исследовано влияние обменного Ca и Na на липкость, пластичность, размокание, временное сопротивление сжатию и сопротивление вдавливанию почво-грунтов. Образцами являлись суглинистый чернозем и пермская бескарбонатная глина. Оба образца в естественном состоянии были насыщены Ca и Mg, причем Mg содержался в значительно меньших количествах. Емкость поглощения чернозема была 31,5 и пермской глины 40,1 м-экв. на 100 г.

При насыщении естественных образцов Na гранулометрический состав изменялся очень сильно в сторону увеличения их степени дисперсности, как это видно из приводимых ниже цифр (табл. 53).

Вместе с изменением гранулометрического состава в образцах усилились свойства пластичности, липкости, увеличилось время размокания в воде и временное сопротивление сжатию (табл. 54).

¹ В. В. Охотин и О. Ф. Смирнова, Физико-механические свойства солонцов и их изменение при действии солей. Ж. Почвоведение. 1933 г.

Таблица 53

Наименование образца	0,05— 0,01 мм	0,01— 0,005 мм	0,005— 0,001 мм	<0,001 мм
Чернозем естественный	51,19%	26,66%	8,60%	7,31%
Тот же чернозем, насыщ. Na	50,03%	7,65%	2,55%	24,74%
Глина пермская бескарбонатная . .	19,14%	24,14%	4,57%	13,05%
Та же глина, насыщ. Na	12,75%	10,33%	3,34%	41,01%

Примечание. В таблице приведены только фракции $= 0,05 \text{ мм}$

В той же работе был выяснен вопрос об изменении пластичности, прилипания и временного сопротивления сжатию в зависимости от степени насыщения почвы Na. Для этой цели были взяты образцы чернозема и насыщены в разной степени Na. Разная степень насыщения полу-

Таблица 54

Наименование образца	Число пластичности	Максимальное прилипание в $\text{кг}/\text{см}^2$	Время размокания в проточной воде в мин. и сек.	Временное сопротивление сжатию в $\text{кг}/\text{см}^2$
Чернозем естественный	6,73	99,2	16'0 "	44,0
Тот же чернозем, нас. Na	16,98	216,6	57'30"	65,7
Пермская глина из под Вятки, естеств.	16,18	345,0	11'30"	135,0
Та же глина, насыщ. Na	20,55	661,0	30'12"	146,0

чалась при обработке отдельных образцов различными количествами NaCl. После обработки все образцы были освобождены от избытка NaCl. Результаты получились такие (табл. 55).

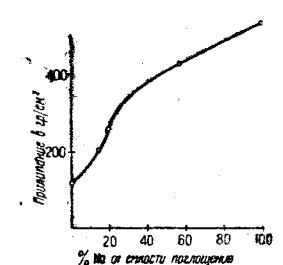
Таблица 55

Степень насыщения чернозема Na в % от емкости поглощения	0	17,4	21,0	22,3	57,0	70,4	100
Максимальное прилипание в $\text{кг}/\text{см}^2$	157,4	202,1	239,8	251,8	430,0	—	528,5
Временное сопротивление сжатию в $\text{кг}/\text{см}^2$	79	92	101	—	112	120	101
Число пластичности	14,7	16,85	17,34	—	18,26	18,22	—

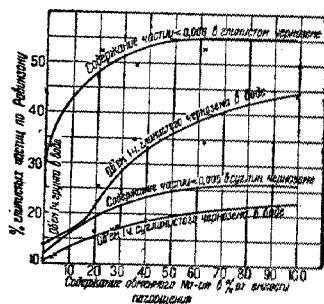
Как видно из приведенных результатов, величина прилипания при увеличении содержания Na до 17,4% возрастает медленно, а затем быстрее, причем в остальном интервале насыщенности нарастание величины прилипания идет по криволинейному закону (фиг. 57).

Величина временного сопротивления сжатию в интервале содержания Na от 0 до 70% тоже увеличивается по кривой, а затем уменьшается. Число пластичности возрастает при увеличении содержания Na до 57%.

В дальнейшем нами было прослежено изменение гранулометрического состава и объема единицы веса почвы в воде при различном их насыщении Na. Определение объема почвы в воде производилось по методу Рутковского. Разница в проведении опыта состояла, во-первых, в том,



Фиг. 57. Величина прилипания при различном содержании в грунте обменного Na.



Фиг. 58. Содержание глинистых частиц в грунте и его объем в воде при разном содержании обменного Na.

что образцы брались по весу (каждый раз 7 г), чтобы избежать ошибок при взятии проб по объему, вследствие неодинаковости объемных весов различных образцов, и, во-вторых, в том, что коагулятор (CaCl_2) прибавлялся через 2 суток после смешения образца с водой. Специально поставленные опыты показали, что время прибавления коагулятора влияет на величину объема грунта в воде, а именно, чем позднее прибавляется коагулятор, тем больше объем грунта, однако замедление срока прибавления коагулятора свыше двух суток на объем грунта не влияет.

Для опытов были взяты два чернозема: один глинистый, содержащий 30,54% глинистых частиц и имевший емкость поглощения 43,2 М-экв, на 100 г и другой легкосуглинистый с содержанием глинистых частиц 11,5% и обладавший емкостью поглощения в 23,5 М-экв на 100 г. Результаты испытаний приводятся в таблице 56.

Те же результаты приведены в виде диаграммы на фиг. 58, где по оси абсцисс отложено содержание обменного Na в процентах от емкости поглощения, а по ординате — объем 1 г воздушно-сухого грунта в воде и процент глинистых частиц по Робинзону.

Как видно из полученных результатов, количество глинистых частиц в глинистом черноземе при увеличении содержания обменного Na до 200% растет очень сильно, а в дальнейшем остается почти одно и то же. Это явление можно объяснить тем, что вначале идет пептизация наибо-

Таблица 56

Глинистый чернозем			Суглинистый чернозем		
Содержание обменного Na в милли-эквивалент.	Содержание глинистых частиц (<0,005 м.м.) по Робинзону в %	Объем 1 г возд.-сухого образца в воде в см ³	Содержание обменного Na в милли-эквивалент.	Содержание глинистых частиц (<0,005 м.м.) по Робинзону в %	Объем 1 г возд.-сухого образца в воде в см ³
0,0	30,54	1,68	0,0	11,5	1,07
0,73	32,93	1,79	0,32	13,54	1,21
1,64	33,84	1,93	0,82	13,40	1,29
8,75	47,76	2,27	4,77	23,05	2,39
9,00	52,40	4,14	5,00	19,68	2,50
15,05	49,34	5,00	6,75	25,74	2,71
26,92	52,80	5,86	17,03	22,03	3,57
(полное насыщение Na)	49,73	7,79			

лее крупных микроструктурных агрегатов до величины, отвечающей глинистым частицам, т. е. до величины меньшей 0,005 м.м.; в дальнейшем же происходит раздробление всех микроструктурностей до элементарных частиц. Что касается изменения объема образца в воде, то он при насыщении Na до 20% увеличивается сравнительно мало, затем имеет место (при увеличении содержания Na от 20,2 до 20,8%) резкое увеличение и в дальнейшем оно нарастает медленнее, но все же и здесь оно значительное.

В легкосуглинистом черноземе на основании экспериментальных данных можно считать, что возрастание глинистых частиц имеет место при увеличении содержания обменного Na до 28%, в дальнейшем же оно остается постоянным и наблюдающиеся колебания скорее всего нужно отнести к ошибке опыта. Что касается изменения объема в воде, то он нарастает постепенно, и того скачка, который наблюдался в глинистом черноземе, нет. Однако, эта плавность, может быть, происходит потому, что в данном черноземе не был определен объем при 20% содержания Na, при котором в глинистом черноземе произошло сильное увеличение объема грунта в воде.

При изучении влияния обменных оснований на механические свойства грунтов была взята часовская глина.

Емкость поглощения ее определена в $12,04 \frac{\text{м.эkv.}}{100 \text{ г}}$ (средняя цифра из двух определений, из которых одно 11,9 и другое $12,18 \frac{\text{м.эkv.}}{100 \text{ г}}$). В естественном состоянии глины почти полностью насыщена Ca. Образцы глины были насыщены +Na и +H. Насыщение глины натрием

производилось, как обычно, на фильтре из раствора NaCl до исчезновения следов Ca, с последующим дialisом до полного удаления Cl.

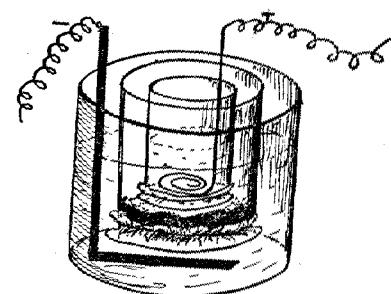
Насыщение водородным ионом было произведено электролитически, в приборе, конструкции В. Л. Демидова. Этот прибор прост, легко содержится в чистоте и в нем отсутствуют неудобства от оседания суспензии. В приборе материал для электродиализа помещается в среднюю камеру, ограниченную двумя горизонтальными животными перепонками. Камера эта образуется от вдвигания одного в другой двух обыкновенных цилиндрических дialisаторов с натянутой внизу перепонкой. Дialisаторы помещаются в большой батарейный стакан, на дне которого лежит металлическая пластинка, являющаяся катодом. Другой электрод анод помещается в верхней камере (внутри меньшего дialisатора). Анод должна быть взята платиновая спираль (схема прибора см. на фиг. 59).

В анодную и катодную камеру наливалась дистиллированная вода, которая по мере надобности сливалась сифоном. Вследствие большого объема камер, концентрация приносимых током веществ возрастала не быстро. В самом начале электролитического насыщения жидкость сменялась из камер около электродов несколько раз в день. В дальнейшем, когда накопление выносимого Ca в катодной камере происходило медленнее, смена воды производилась 1—2 раза в сутки.

Не желая подвергать обрабатываемый грунт слишком энергичному воздействию идущих ионов водорода, чтобы избежать разрушения поглощающего комплекса глины, токи употреблялись слабые. Сила тока, идущего через прибор, с самого начала не превышала 50 милли-ампер, а в камере насыщения падала до 10—15 милли-ампер. Плотность тока в каждом горизонтальном сечении рабочей камеры (где находилась суспензия) при размерах нашего прибора не превышала 0,1 милли-ампера. Ток применялся постоянный, напряжением в 240 в.

Насыщение глины H при таких условиях происходило очень медленно. После месяца электролитического насыщения (прибор работал 6 часов в сутки) количество обменного водорода в глине равнялось $7,7 \frac{\text{м.эkv.}}{100 \text{ г}}$. Емкость поглощения, определенная при этой степени насыщенности глины, оказалась равной $12 \frac{\text{м.эkv.}}{100 \text{ г}}$, т. е. она осталась неизменной по сравнению с естественной глиной.

Образец глины, наполовину насыщенной водородом, подвергся дальнейшему насыщению водородом еще в течение 1 месяца. В конце насыщения оказалось, что обычно получающаяся в катодном сосуде (при сохранении жидкости от CO₂ воздуха) щелочная реакция с фенол-фталенином почти исчезла. Вторичное непосредственное определение водорода



Фиг. 59. Схема электродиализатора конструкции В. А. Демидова.

Таблица 57

Наименование образцов	Фракции в мм				
	>0,01 мм	0,01— 0,005 мм	0,005— 0,001 мм	0,001— 0,0005 мм	< 0,0005 мм
Естеств. часовярская глина . . .	Не определена	30,59%	14,50%	21,31%	16,50%
Та же глина, насыщ. Н . . .	не определена	15,30%	19,31%	16,35%	
Та же глина, насыщенная Na . . .	24,85%	11,31%	16,76%	43,31%	

дало на этот раз $10,7 \frac{м\text{-экв.}}{100\text{ г}}$ при прежней емкости поглощения. Емкость поглощения, определенная после повторного насыщения, оказалась равной $12,6 \frac{м\text{-экв.}}{100\text{ г}}$ (превышение в $0,6 \frac{м\text{-экв.}}{100\text{ г}}$ по сравнению с прежними определениями нужно отнести к ошибке опыта).

В образцах, насыщенных Na и H, и в естественной глине был определен гранулометрический состав (табл. 57). Из приведенной таблицы видно, что естественная глина является микроструктурной и насыщенное Na сильно увеличивает процент самых мельчайших частиц. Коагулирующее действие водородного иона по этим данным очень близко к действию кальция.

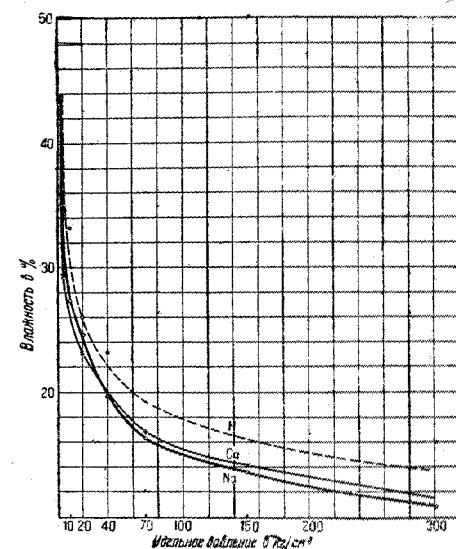
Таблица 58

Наименование образца	Влажность образцов в % под нагрузкой kg/cm^2										
	0,25	0,5	1,36	2,0	5,0	10	20	40	70	150	300
Естественная часовярская глина . . .	44,6	—	—	33,8	29,5	26,0	23,3	20,2	16,8	14,2	11,5
Та же глина, насыщ. Na . . .	48,6	45,3	—	35,7	31,8	27,2	24,5	19,8	16,3	13,8	10,8
Та же глина, насыщ. H . . .	69,0	56,3	44,0	—	36,2	33,2	26,2	23,3	—	—	13,7

В образцах глины естественной и насыщенной Na и H была определена зависимость между давлением и влажностью. Образцы с заведомо большей влажностью, чем та, которая соответствует конечному давлению, ставились в стаканчиках Терцаги под пресс, на который постепенно давалась возрастающая нагрузка, вплоть до конечной. После того, как конечная нагрузка была приложена на пресс, образцы под этой нагрузкой оставались в течение 10 дней (при больших нагрузках) и 12 дней (при малых нагрузках). Время, достаточное для установления равновесия, которое определялось по прекращению деформации с помощью мессера.

Результаты опытов представлены на табл. 58, а также на диаграммах фиг. 60.

При рассмотрении полученных результатов видно, что при всех давлениях от $0,25 \text{ kg}/\text{cm}^2$ до $300 \text{ kg}/\text{cm}^2$ процент влажности образца, насыщенного водородом, выше образцов, насыщенных кальцием и натрием при соответствующих давлениях. Чтобы выяснить, не происходит ли это от накопления в образце аморфных гидратов алюминия или кремнезема, которые могли получиться в результате продолжительного действия водородного иона, из естественной глины и глины, насыщенной водородом, была сделана щелочная вытяжка (5% KOH) по Гедройцу. В вытяжке определялись SiO_2 и Al_2O_3 . Результаты получились такие:



Фиг. 60. Компрессионные кривые часовярской глины, насыщенной Са, Н и Na.

Наименование образца	SiO_2	Al_2O_3	Примечание
Естественная часовярская глина . . .	3,71%	3,07%	% от веса абс. сухого грунта
Та же глина, насыщ. H . . .	3,62	2,75	

Если предположить, что алюминий и кремний в глине образуют соединение $2\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3$, то кремнекислота находится в избытке, равном $0,0008 \cdot 2\text{SiO}_2$ для естественной глины и $0,003 \cdot 2\text{SiO}_2$ для глины, насыщенной водородом.

щенной водородом. Эти количества свободной кремнекислоты в процентном выражении являются равными 0,1% для естественной глины и 0,36% для глины, насыщенной водородом. Вряд ли можно допустить, что избыток кремнекислоты в 0,26% мог значительно увеличить водоудерживающую способность глины. Скорее это явление обусловливается физическим состоянием глины, насыщенной водородом, именно строением ее микроагрегатов.

Сравнивая влажности образцов, насыщенных кальцием и натрием, при равных давлениях, видно что при давлениях до 20 кг/см² влажность образца, насыщенного натрием, все время остается больше влажности образца, насыщенного кальцием, и кривые все время практически следуют одному закону. При давлениях, несколько больших 30 кг/см², происходит пересечение кривых, после которого влажность глины, насыщенной кальцием, больше глины, насыщенной Na, причем кривые опять повторяют конфигурацию друг друга.

Пористость часовоярской глины, насыщенной Na, при давлениях меньше 20 кг/см², все время остается больше пористости глины, насыщенной Ca. При давлениях в 30 кг/см² они сравниваются, после чего пористость глины, насыщенной Na, становится меньшей. В таблице 59 приводятся величины приведенной пористости¹ в зависимости от уплотняющих давлений.

Таблица 59

Наименование образца	Приведенная пористость в зависимости от уплотняющего давления						
	Вертикальное давление в кг/см ²	0,25	0,5	2,0	5,0	10,0	20,0
Часовая глина, насыщенная Na	1,322	1,232	0,971	0,865	0,740	0,650	
Та же глина, насыщенная Ca	1,213	—	0,917	0,803	0,707	0,634	
Наименование образца	Приведенная пористость в зависимости от уплотняющего давления						
	Вертикальное давление в кг/см ²	30,0	40,0	50,0	70,0	150,0	300,0
Часовая глина, насыщенная Na	0,585	0,538	0,495	0,443	0,375	0,294	
Та же глина, насыщенная Ca	0,585	0,549	0,514	0,454	0,383	0,313	

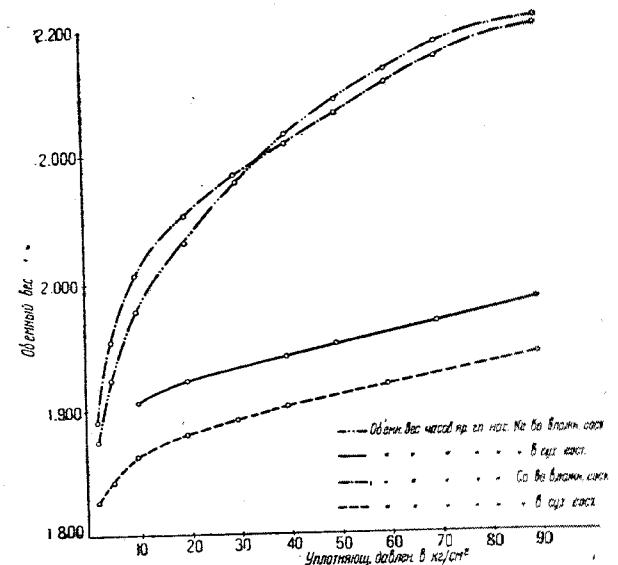
¹ Под приведенной пористостью разумеется отношение объема пор к объему твердой фазы грунта.

В соответствии с этим в той же закономерности изменяется в зависимости от уплотняющего давления объемный вес компрессионно уплотненных образцов (табл. 60 и фиг. 61).

Таблица 60

Наименование образца	Объемный вес в зависимости от уплотняющего давления				
	2	5	10	20	30
Часовая глина, насыщ. Na	1,874	1,922	1,978	2,032	2,080
Та же глина, насыщ. Ca	1,897	1,954	2,008	2,053	2,085

Наименование образца	Объемный вес в зависимости от уплотняющего давления				
	40	50	60	70	90 кг/см ²
Часовая глина, насыщ. Na	2,118	2,146	2,170	2,192	2,212
Та же глина, насыщ. Ca	2,110	2,135	2,160	2,181	2,207



Фиг. 61. Объемный вес образцов часовской глины в сухом и влажном состоянии при насыщении Ca и Na.

Таблица 61

Избыток воды в глине, насыщенной Са, при уплотняющих давлениях, больших $30 \frac{kg}{cm^2}$, по сравнению с глиной, насыщенной На, остается почти одинаковым во всем интервале вплоть до $300 \frac{kg}{cm^2}$. Этот избыток, нам кажется, можно объяснить наличием в первой глине микроструктурных агрегатов. Вода в микроагрегатах, вследствие их прочности и неизменяемости от приложенных нагрузок, не отжималась во время компрессионного процесса.

При изучении сопротивления сжатию влажных образцов часовьярской глины, насыщенных Са и На, они изготавливались при разном компрессионном уплотнении.

Приготовление образцов производилось в цилиндрических формах с отвинчивающимся решетчатым дном. Диаметр формы 5,05 см (площадь 20 см^2). Глина, замешанная с водой, взятой в количестве 80—100% от сухого грунта, заливалась в форму частями, при сильном постукивании дна формы для выхождения на поверхность воздушных пузырьков. Постепенно увеличивающимся давлением вода, находившаяся всегда в большом избытке, отжималась. При достижении рассчитанного давления образцы оставались под постоянной нагрузкой в течение 12—15 суток; по прошествии этого срока, нагрузка удалялась, от образца срезался самый верхний и нижний слой (толщиной 0,3—0,5 см), несколько намокающие в момент, когда удалена нагрузка.

В приготовленных, таким образом, образцах объемные веса, определенные экспериментально и вычисленные по формуле: $\gamma = \frac{1 + \omega}{\omega + \frac{1}{D}}$, были

одинаковы. Так как примененная формула, в которой γ — объемный вес во влажном состоянии, ω — влажность волях единицы и D — удельный вес грунта, верна только при условии отсутствия в грунте защемленного воздуха, то, следовательно, образцы его не имели.

Испытание сопротивления сжатию компрессионно уплотненных образцов производилось на прессе проф. Давиденкова при непрерывно увеличивающейся нагрузке. Деформации сжатия записывались по показаниям мессера, соответственно нагрузке в данный момент.

Разрушение всех испытанных образцов происходило в виде среза по наклонной плоскости, причем одна часть образца сдвигалась относительно другой по хорошо выраженной плоскости, с углом наклона близким к 45° .

Угол среза образцов изменялся в зависимости от уплотняющего давления при приготовлении образцов и обменного основания. Для глины, насыщенной На, при равных компрессорных давлениях угол среза был меньше, чем для глины, насыщенной Са, что может зависеть от различной влажности, соответствующей одному компрессионному давлению, а также от разницы в коэффициенте трения микроагрегатного материала по сравнению с бесструктурным. Угол среза изменялся следующим образом (табл. 61).

При влажности образцов большей 27% часовьярской глины, насыщенной На, и большей 29% для глины, насыщенной Са, роль внутреннего трения, очевидно, очень мала по сравнению со сцеплением грунта.

Уплотняющее давление при компрессионном уплотнении образцов в $\frac{kg}{cm^2}$	2	5	10	20	90
Часовьярская глина, насыщенная На . . .	45°	45°	45°	46°	50°
Та же глина, насыщенная Са . . .	—	45°	46°	$47-48^\circ$	52°

Это следует из того, что угол среза не отклоняется, в пределах точности нашего наблюдения, от 45° , т. е. угла, получающегося теоретически (без учета трения), — для материалов более или менее однородных.

Если расположить данные временного сопротивления образцов при сжатии в зависимости от их пористости, то получаются такие соотношения (табл. 62 и диаграммы фиг. 62, нанесенные прерывистыми линиями):

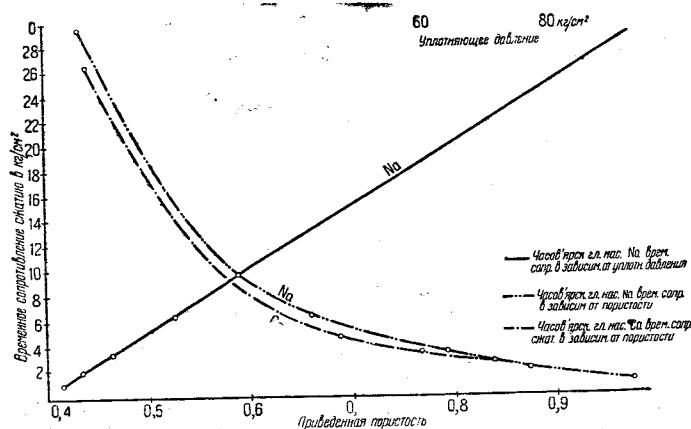
Таблица 62

Часовьярская глина, насыщенная На		Часовьярская глина, насыщенная Са	
Приведен. порист. сырых образцов	Времен. сопр. сжатию в $\frac{kg}{cm^2}$	Приведен. порист. сырых образцов	Временное сопротивл. сжатию в $\frac{kg}{cm^2}$
0,977	1,00	0,840	2,62
0,875	1,95	0,769	3,60
0,794	3,45	0,687	4,80
0,660	6,45	0,440	26,5
0,587	9,75	—	—
0,432	29,50	—	—

Рассматривая полученные данные на фиг. 62, видно, что приведенные точки не ложатся на одну кривую, кривые пересекаются в точке, соответствующей 0,84% приведенной пористости. Эта пористость для глины, насыщенной На, получается при $6 \frac{kg}{cm^2}$ компрессионного уплотнения и при $3,6 \frac{kg}{cm^2}$ для глины, насыщенной Са. При уменьшении приведенной пористости, кривые несколько расходятся и дальше (с приведенной пористостью = 0,55 и ниже) сохраняют по вертикали более или менее выдержаный интервал ($1,0-1,6 \frac{kg}{cm^2}$).

То обстоятельство, что образцы с равной пористостью, но различными обменными основаниями оказались не равносиммыми в смысле прочности, говорит за различный характер пор. Внутриагрегатная пористость грунта, насыщенного Са, по всей вероятности сравнительно очень невелика, так как микроагрегатные отдельности обладают большой прочностью и устойчивостью по отношению к механическим воздействиям. Поэтому при сравнении образцов, насыщенных На и Са, с равно сум-

марной пористостью следует допустить для микроструктурных образцов наличие более крупных пор между агрегатами и при значительных давлениях, т. е. обособленность микроагрегатов не исчезает при тех удельных давлениях, до которых они доводились при изготовлении образцов (до $90 \text{ кг}/\text{см}^2$). Это обстоятельство и приводит к снижению прочности образцов, насыщенных Ca.



Фиг. 62. Временное сопротивление сжатию образцов часовоярской глины, насыщенных Ca и Na, в зависимости от пористости и уплотняющего давления.

Другой характер принимает зависимость между прочностью образцов и уплотняющим давлением компрессионного процесса при изготовлении образцов. Ниже приводится расположение величин временных сопротивлений в связи с уплотняющим давлением (табл. 63).

Таблица 63

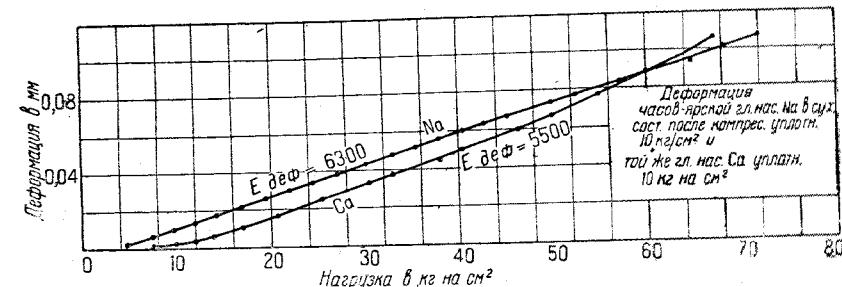
	Часовоярская глина, насыщенная Na						Часовоярская глина, насыщенная Ca					
Уплотняющ. давл. в $\text{kg}/\text{см}^2$	2	5	10	20	30	90	2	5	10	20	30	90
Временное сопр. влажн. образцов в $\text{kg}/\text{см}^2$	1,00	1,9	3,4	6,4	9,75	29,5	—	2,6	3,6	4,8	—	26,5

Для глины, насыщенной Na, зависимость между уплотняющим давлением и сопротивлением сжатию является прямолинейной, что согласуется с имеющимися в литературе данными. Прямая проходит через начало координат и отношение временного сопротивления к компрессионному уплотнению сохраняется постоянным и равным 0,328 (см. на фиг. 62 диаграмму, изображенную сплошной линией). Для глины, насыщенной Ca, ясной линейной зависимости не получилось. Линия имеет перелом, точное расположение которого не было установлено.

Зависимость деформаций от нагрузок в компрессионно уплотненных сырьих образцах получалась криволинейной, однако в каждой кривой можно было выделить участки прямолинейные. С увеличением уплотненности образцов прямолинейные участки увеличивались, и при уплотненности, соответствующей $90 \text{ кг}/\text{см}^2$, они занимали больше трех четвертей всей длины кривой деформации.

Если высоту образца обозначить через l и его вертикальную деформацию через Δl , то деформация на единицу высоты определяется уравнением: $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$, где ϵ будет представлять собой относительную деформацию.

Обозначив силу, приложенную на 1 см^2 площади образца и выраженную в кг , или напряжение через σ , для прямолинейного участка кри-



Фиг. 63. Деформации часовоярской глины, насыщенной Na, в сухом состоянии, после компрессионного уплотнения $10 \text{ кг}/\text{см}^2$ и той же глины, насыщенной Ca и уплотненной $10 \text{ кг}/\text{см}^2$.

вой деформации можно написать уравнение: $\epsilon = K \sigma$. Так как коэффициент "K" представляет собой очень малую дробь, то его удобнее заменить выражением: $K = \frac{1}{E}$, тогда предыдущее уравнение примет вид: $\epsilon =$

$= \frac{\sigma}{E}$, или $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$. E для прямолинейного участка каждого грунта, изготовленного при определенном компрессионном уплотнении, есть число постоянное и может быть названо модулем деформации.

Для образцов, приготовленных при компрессионном уплотнении $90 \text{ кг}/\text{см}^2$, модули деформации получились такие: для часовоярской глины, насыщенной Na, — 1150 и для насыщенной Ca — $970 \text{ кг}/\text{см}^2$.

При изучении временного сопротивления сжатию образцов часовоярской глины, высущенных до абсолютно сухого состояния, как и при прежних испытаниях образцов черноземов и пермской глины, оказалось, что оно больше в образцах, насыщенных Na.

При наблюдении деформаций тех же образцов выяснилось, что кривые деформаций имеют прямолинейные участки почти на всем протяжении, и только при приближении к отдельным напряжениям они дают значительный изгиб.

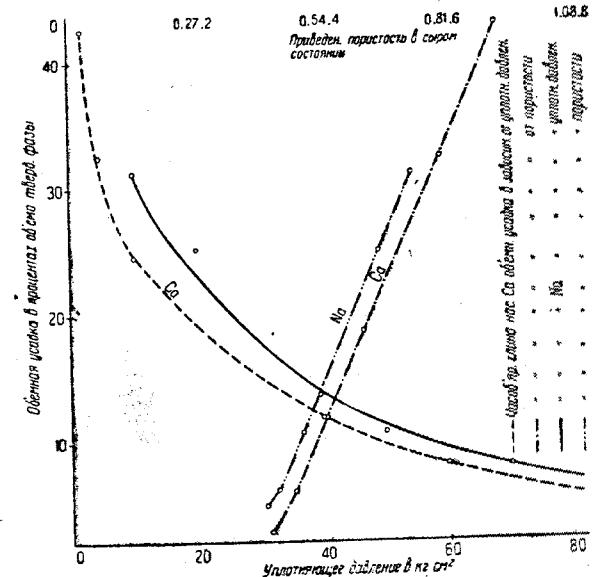
О характере кривых деформаций можно судить по диаграммам на фиг. 63, где представлены их прямолинейные части, дающие возможность

Таблица 6

	2	5	10	20	40	50
Объемн. усадка в долях объема тверд. фазы	—	—	0,3120	0,2512	0,1373	0,1055
	60	70	90	Уплотн. давл. в кг/см ²		
Объемн. усадка в долях объема тверд. фазы	—	0,0614	0,0479	Часовярск. глина, насыщеная Na		
	0,0608	—	—	Часовярск. глина, насыщеная Ca		

кривая образца глины, насыщенной Na, во всем исследованном интервале лежит выше кривой образца, насыщенного Ca (фиг. 64).

Если величину объемной усадки поставить в зависимость от первоначальной пористости компрессионно уплотненных образцов (экспери-



Фиг. 64. Объемная усадка часовярской глины, насыщенной Ca и Na в зависимости от уплотняющего давления и приведенной пористости.

ментальные данные приведены в таблице 66), то получается строго линейная зависимость, выдержанная у глины, насыщенной Na, вплоть до 70 кг/см², а у насыщенной Ca — вплоть до 90 кг/см².

Линия усадки часовярской глины, насыщенной Na, для уплотняющих давлений выше 70 кг/см², дает изгиб в сторону начала координат (фиг. 64). По техническим условиям мы не могли приготовить образцы

определить модули деформации, остающиеся постоянными для образцов на большем протяжении кривых деформаций. Приведенные диаграммы относятся к образцам часовярской глины, насыщенной Ca и Na, уплотненным компрессионно 10 кг/см² и высушеным до абсолютно сухого состояния. Модуль деформации глины, насыщенной Na, оказался равным 6300 и для насыщенной Ca — 5500 кг/см².

Величина объемного веса глины в сухом состоянии зависит от первоначальной пористости (влажности) образца. Для компрессионно уплотненных под разными нагрузками образцов часовярской глины, насыщенных Ca и Na, величины объемных весов в сухом состоянии приведены в табл. 64.

Таблица 64

Уплотняющее давление в кг/см ²	2	5	10	20	30	40	50	60	70	90
Объемный вес в сухом сост. часовярской глины, насыщ. Na	—	—	1,905	1,922	—	1,947	1,950	—	1,968	1,986
Объемный вес в сухом сост. часовярской глины, насыщ. Ca .	1,826	1,842	1,862	1,880	1,891	1,902	—	1,918	—	1,942

Если в прямоугольных координатах по абсциссе отложить уплотняющее давление, а по ординате об'емные веса, то зависимость между этими величинами выражается плавными кривыми подобной друг другу конфигурации с постоянной выдержанной разницей в об'емном весе в 0,04, при сравнении точек с одинаковыми предварительными уплотнениями (фиг. 61).

Если же по оси абсцисс отложить величины приведенной пористости, взяв их данные из табл. 59 для соответствующих точек компрессионного давления, то окажется, что зависимость между приведенной пористостью и объемным весом образца выражается почти прямой линией (с отрицательным угловым коэффициентом).

В соответствии с этим находятся данные по объемной усадке компрессионно уплотненных образцов глин, насыщенных Ca и Na.

Ввиду того, что измерение объема влажных образцов в ртути связано с значительными неудобствами (сильная деформация образца), величина объемного веса во влажном состоянии вычислялась теоретически из величины средней влажности, что для образцов с отсутствием воздушно-наполненных пор дает совершенно удовлетворительные результаты.

Величины объемной усадки, вычисленные в долях объема твердой фазы (т. е. отнесенные к постоянному объему), приведены в таблице 65.

Графически в прямоугольных координатах зависимость между уплотняющим давлением и объемной усадкой выражается кривой, причем

с компрессионным уплотнением выше $90 \text{ кг}/\text{см}^2$ и проследить явление в более широких пределах.

Направление линии усадки часовярской глины, насыщенной Ca, выявляет ясную тенденцию пересечь ось абсцисс в точке, соответствующей 14% влажности (что достигается $155 \text{ кг}/\text{см}^2$ компресс. уплотнения). Это обстоятельство, повидимому, говорит за то, что здесь мы имеем предел усадки микроагрегатной часовярской глины.

Таблица 66

Уплотняющее давление в $\text{кг}/\text{см}^2$	2	5	10	20	40	50
1. Приведенная пористость	—	—	0,7398	0,6464	0,5386	0,5005
2. Усадка в долях объема твердой фазы	—	—	0,3120	0,2512	0,1373	0,1055
3. Приведенная пористость	0,917	0,803	0,707	0,634	0,549	—
4. Усадка в долях объема твердой фазы	0,4272	0,3258	0,2464	0,1370	0,1194	—

Уплотняющее давление в $\text{кг}/\text{см}^2$	60	70	90	
1. Приведенная пористость	—	0,4434	0,4175	
2. Усадка в долях объема твердой фазы	—	0,0614	0,0480	
3. Приведенная пористость	0,4787	—	0,4270	
4. Усадка в долях объема твердой фазы	0,0606	—	0,0270	

Зависимость между первоначальной пористостью и величиной усадки является линейной. Линейный характер функции выдерживается (несмотря на то, что конечная плотность материала переменна) вследствие того, что объемный вес в сухом состоянии сам представляет, как указывалось выше, линейную функцию от первоначальной пористости.

Характерно для приведенных прямых, что ход их почти параллелен, так что для образцов часовярской глины, насыщенной Na и Ca, взятых с одинаковой пористостью, разница в величине усадки остается выдержанной, более или менее постоянной.

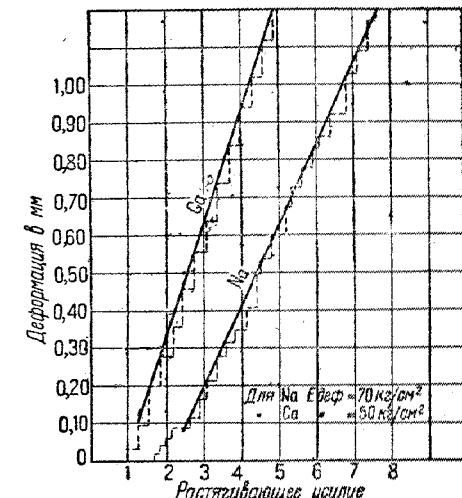
В отношении деформации и сопротивления растяжению образцы глины, насыщенной Ca и Na, изучались компрессионно уплотненные нагрузкой $40 \text{ кг}/\text{см}^2$ в специально приспособленной восьмерочной форме. По окончании компрессионного процесса восьмерки разрывались на прессе Михаэлиса, нагрузки давались отдельными порциями по 20 г на конец рычага (отношение 1 : 50), вызываемые деформации растяжения отмечались на мессуре. Очередная добавка груза производилась по затуханию деформации от предыдущей нагрузки. Ход деформации в зависимости от нагрузки оказался совершенно прямолинейным (фиг. 65).

На диаграмме пунктирная линия показывает фактический ход деформации при прерывистом характере увеличения нагрузки. Модуль деформации растяжения равняется для глины, насыщенной Na, в $70 \text{ кг}/\text{см}^2$, а для глины, насыщенной Ca, — в $50 \text{ кг}/\text{см}^2$. При вычислении модуля деформации за растягиваемую длину принималось расстояние между захватами, в которых помещалась испытуемая восьмерка. Во всех опытах это расстояние равнялось 15 мм.

Величина модулей деформации и временных сопротивлений показывает, что при описанных условиях микроструктурное строение часовярской глины, насыщенной Ca, сохраняется, что вызывает разницу в величине ее сцепления, по сравнению с глиной, насыщенной Na.

Связные грунты обнаруживают резкое различие в физико-механических свойствах при изменении в них состава обменных оснований. Грунты, насыщенные двухвалентными основаниями и водородом, являются микроструктурными и, насыщенные одновалентными (K, Na, Li) — бесструктурными, отсюда активная поверхность первых грунтов значительно меньше, чем вторых. Поэтому свойства, в первую очередь обусловливаемые активной поверхностью — пластичность, прилипание, сцепление и др., в грунтах, насыщенных двухвалентными основаниями и водородом, выражены слабее, чем при насыщении их одновалентными основаниями. Более слабая выраженность свойств, обусловливаемых активной поверхностью, сохраняется в грунтах, насыщенных двухвалентными основаниями, и после таких сильных и длительных на них механических воздействий, как нагрузки в $40-90 \text{ кг}/\text{см}^2$ и большие, приложенные в течение 15 суток. Отсюда можно прийти к выводу, что в грунтах, насыщенных двухвалентными основаниями, микроструктурные агрегаты сохраняются при сильных на них механических воздействиях, иначе сказать, микроструктурные агрегаты являются очень стойкими против действия приложенных к ним механических сил. Из этого вывода, как следствие, вытекает, что различие физико-механических свойств грунтов при насыщении их различными основаниями зависит от величины их активной поверхности, которая меньше в грунтах микроструктурных.

Что микроструктурное состояние в грунтах сохраняется при сильных механических на них воздействиях доказывается и опытами профессора М. М. Филатова¹. Проф. Филатов уплотнял грунты (глуховский каолин,



Фиг. 65. Деформации при растяжении часовярской глины, насыщенной Ca и Na.

кудиновская белая глина, покровный тяжелый суглинок) в воздушно-сухом состоянии нагрузкой $530 \text{ кг}/\text{см}^2$. При этом оказалось, что гранулометрический их состав как до опыта, так и после был один и тот же. Так как в поглощающем комплексе грунтов, испытанных проф. Филатовым, трудно предполагать наличие Na , то они должны быть микроструктурными, и это состояние сохранялось в них после уплотнения.

При изучении физико-механических свойств природных грунтов, насыщенных различными основаниями, прямых указаний, насколько влияют обменные основания сами по себе на эти свойства, не получено. Однако некоторые явления дают косвенные доказательства того положения, что если это влияние и имеет место, то оно должно быть подчиненным и менее важным, чем влияние активной поверхности.

Количество гигроскопической воды при одинаковой температуре, при одинаковой упругости водяных паров окружающего пространства и в отсутствии явлений конденсации в грунте, насыщенном различными основаниями, в пределах точности произведенных опытов, одно и то же, следовательно и толщина пленки гигроскопической воды одинакова.

Количество адсорбированной (пленочной) воды из жидкой фазы при свободном набухании и остающейся при центрофугировании в грунтах разного минералогического состава и в одном и том же грунте, при насыщении его различными основаниями, пропорционально активной поверхности. Следовательно, толщина пленки и этой воды также не зависит в грунтах от их обменных оснований.

Изучение при разной влажности грунтов, их временного сопротивления сжатию, деформаций при сжатии и других свойств показало, что эти свойства являются функцией влажности или толщины водной пленки, причем характер этих функций в грунте остается одинаковым при изменении в нем обменных оснований.

На основании вышеизложенного можно притти к выводу, что обменные основания сами по себе, поскольку они не влияют на толщину водной пленки, не должны оказывать существенного влияния на физико-механические свойства грунтов, и изменение этих свойств в грунте, при насыщении его различными обменными основаниями, обусловливается, главным образом, изменением его физического состояния (микроагрегатное и бесструктурное состояние) и вместе с этим изменением величины его активной поверхности.

З а к л ю ч е н и е

Сыпучие грунты

Физические и механические свойства грунтов (пористость, фильтрация, высота капиллярного поднятия, угол внутреннего трения и др.) имеют различные показатели в грунтах разного минералогического состава и разной круosti.

Пористость грунтов

1. При одинаковой крупности частиц наибольшая пористость наблюдается в грунтах, состоящих из пластинчатых частиц — слюдистых, меньше — в полевошпатовых и еще меньше — в кварцевых (табл. 2, 3 и 4).

2. Окатанность частиц сильно уменьшает пористость грунтов (сравн. табл. 1 и 2).

3. Под статической нагрузкой уменьшение пористости грунтов из твердых и неупругих минералов (кварц, полевой шпат) незначительное, в грунтах же слюдистых оно достигает большой величины (фиг. 3, 3а, 4, 4а, 4б, 4в и 5).

4. Упругие деформации в слюдистых грунтах значительно больше остаточных, и их изменение в зависимости от нагрузок происходит по криволинейному закону, приближающемуся к параболическому (табл. 9 и фиг. 7).

5. Остаточные деформации в слюдистых грунтах возрастают с увеличением на них нагрузок по прямолинейному закону (фиг. 7).

6. В грунтах разного минералогического состава и разной окатанности различие в пористости с уменьшением размеров частиц уменьшается. В грунтах из частиц с диаметром $2—1 \text{ мм}$ разница в пористости достигает 47% , в грунтах же из частиц $0,1—0,06 \text{ мм}$ — 33% (фиг. 1 и 1а).

Коэффициент фильтрации грунтов

1. Коэффициент фильтрации в грунтах при уменьшении размеров их частиц в два раза уменьшается в $2—4$ раза.

2. При одинаковых размерах частиц наибольший коэффициент фильтрации наблюдается в грунтах кварцевых, меньше (но близок к нему) в полевошпатовых и еще меньше в слюдистых (табл. 10).

3. Окатанность частиц грунтов увеличивает их коэффициент фильтрации (табл. 10).

4. Различие в коэффициенте фильтрации грунтов разного минералогического состава и разной степени окатанности с уменьшением размеров частиц постепенно затухает (табл. 11 и фиг. 9).

Высота капиллярного поднятия воды в грунтах

1. Высота капиллярного поднятия воды в грунтах с уменьшением размеров в два раза составляющих их частиц увеличивается примерно в 2 раза.

2. Наибольшая высота капиллярного поднятия при одинаковых размерах частиц наблюдается в грунтах слюдистых (табл. 12).

Угол естественного откоса

1. Угол естественного откоса в грунтах зависит от окатанности их частиц: в воздушно-сухом состоянии в грунтах, состоящих из остроугольных частиц, он имеет большую величину, чем в грунтах из частиц окатанных (табл. 13).

2. Под водой угол естественного откоса меньше, чем в воздушно-сухом состоянии, причем в грунтах из остроугольных частиц он снижается сильнее, чем в грунтах из окатанных частиц (табл. 14).

Угол внутреннего трения

1. Угол внутреннего трения в грунтах зависит от содержания в них воды: в воздушно-сухом состоянии он меньше, чем во влажном, и даже при влажности, равной капиллярной влагоемкости, он больше, чем в возв.

душно-сухом состоянии. Под водой угол внутреннего трения значительно ниже, чем в воздушно-сухом состоянии (фиг. 11).

2. Угол внутреннего трения уменьшается в грунтах с уменьшением размеров составляющих их частиц (табл. 18, 22 и 28).

3. Угол внутреннего трения в грунтах зависит от их минералогического состава: наибольший угол внутреннего трения наблюдается в кварцевых грунтах, меньше — в полевошпатовых и наименьший — в слюдистых.

4. В грунтах из окатанных частиц угол внутреннего трения меньше, чем в грунтах из частиц остроугольных (ср. табл. 18 и 22).

5. Зависимость угла внутреннего трения от минералогического состава и окатанности, ясно выраженная в крупнозернистых грунтах, постепенно затухает с уменьшением размеров частиц (фиг. 38).

6. Для интервала вертикальных нагрузок от 0,05 до 4,1 кг/см² зависимость между горизонтальным срывающим усилием (τ) и вертикальной нагрузкой (σ) подчиняется криволинейному закону и может быть выражена в общем виде многочленом пятой степени:

$$\tau = a + b\sigma + c\sigma^2 + d\sigma^3 + e\sigma^4 + f\sigma^5$$

7. Угол внутреннего трения уменьшается с увеличением прилагаемых на грунт нагрузок. Поэтому определение его в грунтах как строительном материале для расчета устойчивости разного рода сооружений должно производиться при нагрузках, близких к тем, которые будут передаваться на грунт сооружением.

8. Наличие в песчаных грунтах частиц слюды уменьшает их угол внутреннего трения. В грунтах, содержащих слюду 10%, угол внутреннего трения близок к тому, какой наблюдается в чисто слюдистых грунтах. На основании этого характеризовать пески как строительный материал должно не только по их гранулометрическому составу, но и по минералогическому.

9. Введение в песчаный грунт заполнителей — пылеватых частиц — уменьшает их пористость и увеличивает коэффициент внутреннего трения. Введение в грунт, состоящий из кварцевых окатанных частиц 0,5—0,25 мм и имеющий пористость 33,7% и угол внутреннего трения 27°, фракции 0,05—0,005 мм в количестве 35%, уменьшило его пористость до 22,5% и увеличило угол внутреннего трения до 42°.

Способность грунтов удерживать битумы

1. С увеличением дисперсности грунтов увеличивается количество удерживаемого ими битума (табл. 34 и фиг. 39).

2. Количество удерживаемого битума зависит от минералогического состава грунта, но эта зависимость выражена слабее, чем от степени его дисперсности.

3. Прочность удерживания битума меньше в грунтах кварцевых и больше — в полевошпатовых (табл. 35).

4. Пористость песков не влияет на их способность удерживать битумы.

Связные грунты

1. Физико-механические свойства связных грунтов прежде всего зависят от количества и характера содержащихся в них глинистых частиц, обуславливающих пластичность, связность, липкость, усадку и другие глинистые свойства.

К глинистым частицам в грунтоведении относят такие, которые имеют диаметр $< 0,005 \text{ mm}$ и скорость падения в воде менее $\frac{1 \text{ см}}{36 \text{ мин}}$.

Из различных теорий, объясняющих свойства глинистых частиц, наиболее отвечающей действительности является теория текстурная, которая свойства глинистых частиц и, прежде всего, их пластичность объясняет величиной их удельной поверхности.

2. Наиболее распространенными методами определения удельной поверхности грунтов являются: а) метод непрерывного механического анализа; б) метод измерения адсорбции грунтами паров воды (максимальная гигроскопичность) и в) метод измерения теплоты смачивания грунтов.

Из указанных методов первый, вследствие различной формы частиц и различного удельного веса, не может дать точного представления об их удельной поверхности.

3. При определении максимальной гигроскопичности грунтов по методу Робинсона и Митчерлиха положительных результатов не было получено, так как в опытах равновесия паров воды над раствором серной кислоты и водой, адсорбированной грунтом, не наступало и влажность грунтов все время увеличивалась (фиг. 40).

Положительные результаты были получены (фиг. 42) при употреблении расчетного процента серной кислоты, выбранного так, чтобы во время опыта сохранялось неравенство:

$$P_{T_1} \geq P_{T_2C} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)$$

где: T_1 — абсолютная наименьшая температура в термостате T_1 .

T_2 — " наибольшая

P_{T_1} — упругость водяных паров над водой при температуре T_1 .

P_{T_2C} — упругость водяных паров над раствором серной кислоты концентрации C и при температуре T_2 .

Постоянство веса грунта получалось при этих условиях на 9—12 сутки.

4. При определении гигроскопичности грунтов по разработанной методике при относительной влажности в камере около 98% оказалось, что грунты, насыщенные двухвалентными основаниями, имеют большую гигроскопичность, чем те же грунты при насыщении одновалентными основаниями. Двухвалентные и одновалентные катионы по гигроскопичности располагаются в ряд: $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Ba} > \text{Na} > \text{K}$ (табл. 36).

По исследованиям Андерсона катионы располагаются в тот же ряд, по исследованиям же Бавера и Алешина они располагаются в другой ряд: $\text{Mg} > \text{H} > \text{Ca} > \text{Ba} > \text{Na}$.

5. Гигроскопичность при относительной влажности 98% глины из под Вятки (содержащей в поглощающем комплексе $\text{Ca} = 27,9 \frac{\text{м.эkv.}}{100 \text{ г}}$ и $\text{Mg} = 12,2 \frac{\text{м.эkv.}}{100 \text{ г}}$), насыщенной Na , и вторично, после насыщения Na , насыщенной Ca , оказалась неодинаковой (табл. 37).

Наличие фактов: а) при исследовании различных почв в отношении адсорбции ими водяных паров обменные основания не укладываются в один ряд и б) глина при повторном ее насыщении Ca имела дру-

гую максимальную гигроскопичность — дает право сделать следующее предположение: разность в отношении гигроскопичности грунта при насыщении его различными обменными основаниями обусловливается не природой этих оснований, а физическим состоянием грунта (неодинаковое строение микроагрегатов или их отсутствие при насыщении Na).

Это предположение подтверждается тем, что в опытах при определении гигроскопичности образцов часовярской глины, насыщенной Ca и Na, при малых относительных влажностях в камере, влажность их оказалась одинаковой (табл. 39).

Опыты Алешина дают основания полагать, что гигроскопичность грунта при насыщении его водородом не изменяется. По его данным краснозем при насыщении его разными основаниями (Ca, Mg, H, Na) имел гигроскопичность одинаковую (табл. 37б).

6. При наличии микроагрегатов в грунте элементарные частицы, образующие их, можно полагать, находятся в более тесном соприкосновении между собой, чем в грунтах бесструктурных. Поэтому пленки, образующиеся при адсорбции паров воды и облегающие элементарные частицы, в микроструктурных грунтах внутри агрегатов скорее могут сомкнуться и образовать мениск. Упругость водяных паров над плоской поверхностью больше, чем над вогнутой, и эта разница определяется формулой:

$$\ln \frac{P_1}{P_2} = \frac{2\sigma v M}{R T r},$$

где: P_2 — упругость водяных паров над плоской поверхностью.

P_1 — " " над мениском.

σ — поверхностное натяжение воды.

v — удельный объем воды.

M — молекулярный вес паров воды.

R — постоянная уравнения Клапейрона.

T — абсолютная температура.

r — радиус мениска.

При наличии менисков в микроагрегатах внутрь их из камеры будет происходить перекачка воды и с момента начала конденсации воды отношение влажностей грунта микроструктурного и бесструктурного сделается больше единицы и будет увеличиваться.

В начальный момент конденсации паров воды толщина пленки гигроскопической воды должна быть равна радиусу мениска, что дает возможность вычислить поверхность элементарных частиц единицы веса или объема твердой фазы грунта в абсолютных цифрах. Если в опытах с часовярской глиной относительную влажность 90%, в качестве первого приближения принять за такую, при которой начинается конденсация, то радиус мениска по формуле будет равен 10^{-6} см. Приняв плотность пленки гигроскопической воды за 1, поверхность 1 г часовярской глины будет равна 8 m^2 .

Поверхность той же глины, при насыщении ее Na, вычисленная на основании непрерывного механического анализа с разделением частиц до 0,0002 мм, равняется $8,8 \text{ m}^2$. Таким образом, цифры, полученные обоими методами, являются близкими.

7. Грунт при насыщении Ca и Na, обладая одинаковой элементарной поверхностью, существенно различен в отношении физико-механических свойств, следовательно, эти свойства определяются не элементарной его поверхностью, а "активной". "Активная" поверхность для грунта, насыщенного Ca, будет тождественна с его микроструктурной и для грунта, насыщенного Na, — с элементарной.

Относительные величины активной поверхности глин, разного минералогического состава и при насыщении их поглащающего комплекса различными катионами, вычисленные на основании непрерывного механического анализа, очень близки к относительным количествам воды в них при свободном набухании и к относительным количествам пленочной воды, определяемой центрофугированием (метод проф. А. Ф. Лебедева), (см. табл. 41 и табл. 42а).

Активная поверхность глинистых грунтов может быть определена по воде при их свободном набухании и для незасоленных грунтов любого гранулометрического состава методом центрофугирования.

8. Свойства глинистых грунтов обусловливаются их активной поверхностью.

При изучении пластичности и угла внутреннего трения в глинах — кембрийской, часовярской и латинской, которые различны по минералогическому составу, но имеют примерно одинаковую активную поверхность, оказалось, что численные выражения этих свойств одинаковы. Однаковую величину эти свойства имели и в смесях этих глин с пылью при одинаковом содержании в них глинистых частиц (табл. 43).

Величина липкости в глуховском каолине значительно больше, чем в кембрийской глине, и активная поверхность каолина в два с половиной раза больше, чем у кембрийской глины (табл. 44).

9. Временное сопротивление сжатию связных грунтов в сильной степени зависит от взаимного расположения их частиц. Грунты в наиболее устойчивое положение приходят при компрессионном их уплотнении. Перераспределение частиц в грунте под действием повторных кратковременных нагрузок происходит в значительной степени тогда, когда влажность в грунте близка к той, которая удерживается в нем при компрессионном уплотнении под нагрузкой равной кратковременному давлению, воспринимаемому грунтом. На основании этого искусственное уплотнение возводимых насыпей, плотин и другого рода сооружений является рациональным только в том случае, когда влажность их грунтов лежит вблизи точки компрессионной кривой, отвечающей удельной нагрузке уплотняющего снаряда.

10. При замене в поглащающем комплексе грунтов двухвалентных оснований на одновалентные, сильно увеличивается в них дисперсность и вместе с этим пластичность, набухание, липкость, модуль деформации при сжатии и растяжении и другие свойства. Соотношения этих свойств в грунтах остаются и после того, как они были подвергнуты сильным и длительным механическим воздействиям, как например, компрессионное уплотнение, равное 90 kg/cm^2 в течение 15 суток. По опытам проф. М. М. Филатова степень дисперсности в глинистых грунтах, в которых трудно предполагать наличие натрия, после уплотнения нагрузкой в 530 kg/cm^2 не изменялась. Все эти явления позволяют сделать вывод, что микроагрегаты грунтов не разрушаются при механических на-

них воздействиях, а следовательно, при этом в грунтах не изменяется и активная поверхность.

Так как в грунтах толщина пленки адсорбированной воды не зависит (в пределах точности произведенных опытов) от природы обменных оснований и в то же время такие свойства грунтов, как временное сопротивление сжатию, величина деформаций, и др. являются функцией толщины этой пленки, то можно полагать, что природа обменных оснований не влияет или влияет мало на физико-механические свойства грунтов. Значение же их обусловливается тем, что они изменяют дисперсность грунтов.

