

Проф. В. В. Охотин, В. Л. Демидов, Г. Ф. Богданов

# ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ



ЛЕНИНГРАД

1 9 3 5

## УСАДКА И СВЯЗНОСТЬ ГРУНТОВ.

Всякий грунт в природных условиях представляет собой дисперсную систему, состоящую из двух фаз, — водного раствора грунта, называемого дисперсионной средой и частичек самого грунта, называемых дисперсионной фазой.

Все грунты распадаются на две группы, различные по своим свойствам: а) грунты связные и б) грунты рыхлые; или по терминологии Пигулевского: а) грунты, обладающие внутренними ресурсами к цементации и б) грунты не обладающие таковыми.

### Капиллярная теория усадки и связности грунтов.

Теория, объясняющая явления усадки и связности или внутренней цементации дисперсных систем впервые дана Zsigmondy в применении к гелям, впоследствии эта теория Terzaghi была приложена и к грунтам. Теория Zsigmondy основывается на законах капиллярности, почему она и получила название "капиллярной".

Водная коллоидная система, как и грунт, является дисперсной системой, состоящей по крайней мере из двух фаз: а) растворителя — дисперсионной среды и б) вещества, взвешенного в растворителе — дисперсионной фазы. Дисперсная фаза коллоидов характеризуется определенной степенью раздробленности. Система называется коллоидной тогда, когда ее дисперсная фаза состоит из частиц, размерами от  $0,1\mu$  до  $1\mu$ . Жидкая коллоидная система, когда дисперсная фаза равномерно распределена в растворителе, называется золем, а если растворителем является вода, то она носит название гидрозола. Если под влиянием каких-либо причин происходит укрупнение дисперсионной фазы, т. е. увеличение размеров частиц, что возможно только при соединении отдельных частиц в более крупные агрегаты, то такой процесс называется коагуляцией.

Частички дисперсионной фазы коллоидов, относимых по клас-

сификации Zsigmondy к классу обратимых коллоидов и по второму подклассу необратимых коллондов, в процессе коагуляции соединяется друг с другом, как бы склеивается, образуя сеткоподобные разветвления, между отдельными нитями которых заливается растворитель. Это соединение частиц дисперской фазы золя в одну связанную массу изменяет свойства всей системы, и она получает название геля. Водяной золь или гидрозоль, превратившийся в гель, называется гидрогелем.

Гидрогели обычно содержат в себе большое количество воды, которая высушиванием может быть удалена. Процесс обезвоживания в гелях происходит постепенно и непрерывно. Эти процессы подробно были изучены van Belwellen'ом на многих гелях. У набухающих гелей процесс обезвоживания сопровождается изменением упругости пара и уменьшением объема. При обезвоживании гидрогеля кремневой кислоты, сильно сводненного, изменения упругости пара и объема можно изобразить в виде кривой, пред-<sup>D</sup>ставленной на диаграмме 1, где по оси абсцисс отложена степень своднения, а по оси ординат упругость водяного пара и объема. Прямая  $BD_1$  выражает собой упругость насыщенного водяного пара.

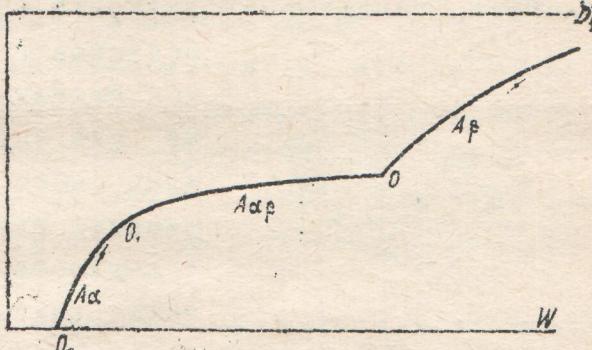


Диаграмма 1.

Прозрачный, сильно сводненный гель кремневой кислоты, при испарении воды сначала сокращается в объеме и упругость его пара и объема уменьшается по кривой  $A_B$ , причем гель остается таким же прозрачным, каким он был и вначале. Когда упругость пара достигнет величины, обозначенной точкой  $O$ , то он становится молочно-белым, непрозрачным (поворотная точка). При дальнейшем обезвоживании изменение упругости пара происходит по кривой  $A_d$ .

Как видно из чертежа дальнейшее обезвоживание практически не вызывает уменьшения упругости пара, точно также объем геля почти не изменяется. Это наблюдается до тех пор, пока обезвоживание не достигнет предела, обозначенного буквой  $O_1$ . При обезвоживании геля в интервале между точками

О и  $O_1$ , он из молочного-белого постепенно просветляется и в точке  $O_1$  становится таким же прозрачным, как и ранее. Дальнейшее обезвоживание, происходящее уже при нагревании геля, сопровождается падением упругости пара по кривой  $O_1O$ . Если прокаливанием вода будет почти вся удалена, то гель превращается в белый порошкообразный кремневый ангидрид.

Явления изменения упругости пара и объема геля кремневой кислоты Zsigmondy<sup>1)</sup> объясняет следующим образом. Сначала обезвоживание геля сильно оводненного происходит при давлении насыщенного водяного пара. При этом часть воды находится на поверхности геля и покрывает его тонким слоем. Когда обезвоживание дойдет до такой степени, что на одну молекулу  $SiO_2$  будет приходиться, примерно, 6 молекул воды, то давление пара при дальнейшем обезвоживании начинает падать по кривой  $A\bar{P}$ . В это время вода уже не будет сплошным слоем обволакивать гель, капиллярные каналы его обнаруживаются, поверхность жидкости в них принимает вид вогнутых менисков и разрез геля будет иметь вид, как схематически представлено на рисунке, где черные многоугольники представляют собой отдельные частицы и их комплексы, заштрихованное же пространство — жидкость, заполняющую пространство между ними. На рисунке видны вогнутые мениски, которые заканчиваются наружу столбиками жидкости, находящимися в капиллярах.

Давление пара жидкости, находящейся в капиллярной трубке, тем меньше, чем меньше радиус мениска, т.е. чем больше его вогнутость. Следовательно, появление менисков на поверхности геля является причиной падения упругости пара при обезвоживании по кривой  $A\bar{P}$ . Высота поднятия смачивающей жидкости зависит от радиуса капилляра и выражается формулой

$$h = \frac{2 \sigma}{r \rho g},$$

где  $h$  — высота поднятия в см.,

1)

Zeitschrift fur anorganische Chemie, 71, 356 (1911)

$\sigma$  - поверхностное натяжение  $\frac{\text{дин}}{\text{см}}$ ,

$r$  - радиус капилляра в см,

$d$  - плотность жидкости ( для воды  $d = 1$  ),

$g$  - ускорение силы тяжести (  $g = 981$  ).

В гелях капилляры очень тонкие. Zsigmondy принимает ширину этих капиллярных каналов в среднем равной 5 мк. В таких тонких капиллярах подъемная сила менисков будет очень велика. Сила эта, приложенная к стенкам капилляров, и является причиной сжатия геля в интервале его обезвоживания от начального состояния до точки О. Сжатие геля влечет за собой уменьшение диаметров капилляров, а вместе с этим уменьшение радиуса менисков, что в свою очередь вызывает понижение упругости пара, увеличение гидростатического давления, которое вызывает дальнейшее уменьшение объема геля.

В точке  $O_1$ , в поворотной точке, гель будет сжат до той наименьшей величины, до которой он вообще может скиматься гидростатическим давлением, развивающимся в его наиболее тонких каналах. Поэтому дальнейшее обезвоживание происходит без изменения в объеме геля, и упругость пара при дальнейшей потере воды изменяется по кривой (а $\beta$ ), т.е. почти не меняется, так как капилляры более не изменяют своего диаметра.

В точке поворота О гель мутнеет, становится непрозрачным и, наконец, превращается в молочно-белый. Это явление Zsigmondy объясняет тем, что вода с поверхности менисков испаряется и заставляет их передвигаться вглубь тела геля, что вызывает образование в капиллярах геля пустот, которые заполняются воздухом и паром. Хотя показатели преломления креиневой кислоты и воды различны, но малые размеры агрегатов геля и капиллярных каналов между ними создают впечатление прозрачной гомогенной массы геля. Появление пузырьков воздуха в капиллярахзначаще не нарушает прозрачности, так как пузырьки очень маль. По мере же испарения жидкости количество пузырьков воздуха и пара все увеличивается, они соединяются друг с другом и занимают уже значительные пространства, чем нарушается однородность студня, и он начинает казаться все более и более мутным. Когда же

жидкости в гелее остается весьма мало и главная масса капилляров будет заполнена воздухом, т.е. опять восстановится какущаяся гомогенность геля, то он снова становится прозрачным, что и наблюдается при приближении обезвоживания к точке  $O_1$ , где гель является снова прозрачным.

Обезвоживание по кривой  $(A)$  идет уже за счет жидкости, находящейся в капиллярах, но адсорбированной их стенками, почему упругость пара в этой стадии падает очень быстро.

Капиллярная теория, разработанная Zsigmondy по отношению к гелям, применена была Terzaghi к грунтам. Terzaghi различает в грунтах два вида сцепления: 1) истинное сцепление, обусловленное взаимным притяжением частиц и 2) какующееся сцепление, обусловленное поверхностным натяжением воды в капиллярных синихах грунта. Истинное сцепление представляет собой в грунтах даже тяжело-глинистых, величину неизначительную, обуславливающую сопротивление срезу не более  $20 \text{ г/см}^2$ , тогда как какующееся сцепление дает величину сопротивления на срез до  $100 \text{ кг/см}^2$ . При определении капиллярного давления в глинах по средней величине диаметров пор (Приложенная в капиллярах глина поверхностное натяжение воды равны 75 дин на 1 см, как и в крупных капиллярах) и при вычислении капиллярного давления на основании опытов по определению давлений на глину под водой при отсутствии бокового расширения, выясняющего такое же уменьшение объема глины, как и капиллярное давление, оказалось, что капиллярное давление в глинах должно быть в несколько раз больше, чем такое вычисление по среднему диаметру капилляров. В виду такого расхождения Terzaghi принимает, что вязкость воды в тонких капиллярах глины больше нормальной и, следовательно, поверхностное натяжение в них значительно больше 75 дин на 1 см. Эта большая вязкость воды в капиллярах грунта обоснована им на основании исследований водопроницаемости глин.

Наличие связности в грунтах в сухом состоянии, когда поры грунта, вследствие испарения освобождаются от воды, Terzaghi объясняет тем, что пленки воды, заключенные в самых узких местах пор, находятся в молекулярной связи с частицами, поэтому вода этих пленок не удаляется при нагре-

вания грунта даже до  $100^{\circ}\text{C}$ . При вспахивании грунта, когда воздух проникает внутрь его массы, свободная поверхность воды втягивается в самое узкое место капилляров и поверхностное натяжение связывает частицы, как молекулярные силы связывают частицы зернистого твердого тела. Так как ширина узких мест каналов значительно меньше средней величины диаметров каналов, то при втягивании воды в узкие места каналов прочность грунта увеличивается.

#### Усадка грунтов с изменением содержания воды.

Связанные грунты, насыщенные водой, в большей или меньшей степени дают усадку. Усадка грунта увеличивается с уменьшением в нем содержания воды и при некоторой влажности, по исследованиям Atterberg'a, американских исследователей

Hagentogler Wintermeyer, Wiegels, Terzaghi и др. достигает предельной величины. Состояние, при котором грунт перестает давать усадку, называется пределом усадки, граничной усадки или поворотной точкой (van Bemellen).

При уменьшении воды ниже границы усадки объем грунта не изменяется. Усадка грунта по Terzaghi прекращается в тот момент, когда сопротивление грунта сжатию станет больше, чем наибольшее капиллярное давление в порах грунта.

Для определения границы усадки Atterberg приготовлял призмы, размерами  $85 \times 20 \times 20$  мм, при влажности на 3% большей влажности при границе раскатывания. У концов призмы проводились две тонких поперечных черты. Призма ставилась для сушки, и расстояние между чертами измерялось через каждые 3 часа. Когда усадка прекращалась, призма взвешивалась, висуливалась при  $100^{\circ}\text{C}$  и по потерре воды вычислялась граница усадки. По данным Atterberg'a грунты I класса пластичности при границе усадки содержали воду на 42% меньше, чем при границе раскатывания в проволоку, грунты II класса на 48% и III на 41%<sup>1)</sup>.

Американские исследователи<sup>2)</sup> при изучении усадки с

1) Atterberg. Пластичность глин. Intern. Mitt. für Bodenk.

2) Сборник "Константы грунтов". Перевод под ред. Братцева. ЦИАМ.

изменением содержания в грунте воды находит, что усадка грунта обратно пропорциональна уменьшению в нем воды, пока со-

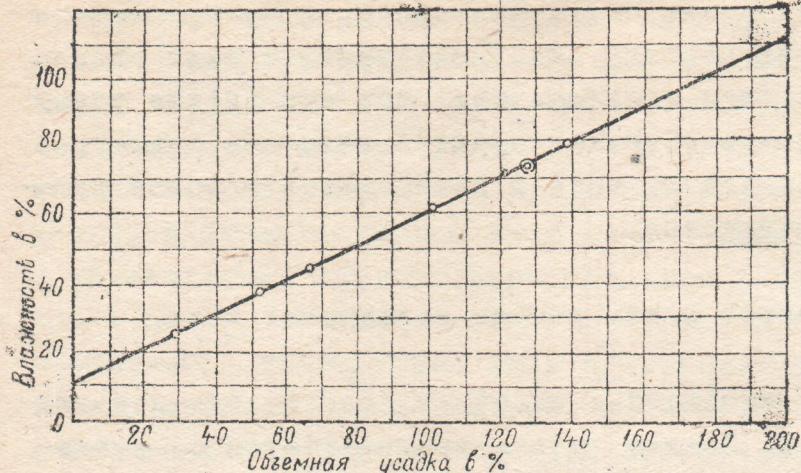


Диаграмма 2. Усадка глины с с. Кубы.

сухого грунта, за по оси ординат влажность, выраженная в процентах от веса также высушенного образца.

Из чертежа видно, что точки, отмеченные кружками, лежат почти на прямой линии, пересекающей ось ординат у 11,1% влажности. Поэтому исследователи принимают, что при уменьшении влажности от 11,1% до 0, изменения объема грунта не имеют места, и величина 11,1% является пределом усадки.

Предел усадки американскими исследователями кроме графического метода определяется также и вычислением, исходя из предположения, что после предела усадки объем грунта совершенно не изменяется. Если объем влажного грунта обозначить через  $V$  и сухого через  $V_0$ , то изменение объема в интервале между первоначальной влажностью и пределом усадки будет  $V - V_0$ . Вес испарившейся воды в том же интервале равен

$$\frac{W W_0}{100} - \frac{S W_0}{100} = \frac{W_0(W - S)}{100},$$

где  $W$  — первоначальная влажность в процентах по отношению к весу сухого грунта;

$S$  — влажность в процентах при пределе усадки по отношению к весу сухого грунта;

$W_0$  — вес абсолютно сухого образца.

содержание последней выше предела усадки. Результаты их исследований над грунтом с с. с. Куба приведены на диаграмме 2, где по оси абсцисс наложена изыскания объема в процентах от объема

Если измерения производятся в системе CGS, то вес испарившейся воды равен объему той же воды, т.е.

$$\frac{W_o(W - S)}{100} = V - V_o,$$

где  $V$  — объем сырого грунта и

$V_o$  — грунта при пределе усадки.

Из этого уравнения путем преобразований можно вывести, что

$$S = W - \frac{V - V_o}{W_o} \cdot 100.$$

Определяя этим путем предел усадки образца с о-ва Кубы, исследователи нашли, что он равен 11,1%, т.е. вполне совпадает с величиной, найденной графическим методом.

Нами также было изучено изменение усадки с уменьшением содержания воды в двух глинах — часов-ярской и кембрийской. Образцы глины были сформованы в виде цилиндров, имевших основание 25 см<sup>2</sup> и высоту 5 см при нижней границе текучести, и сушились на воздухе до воздушно-сухого состояния, а затем

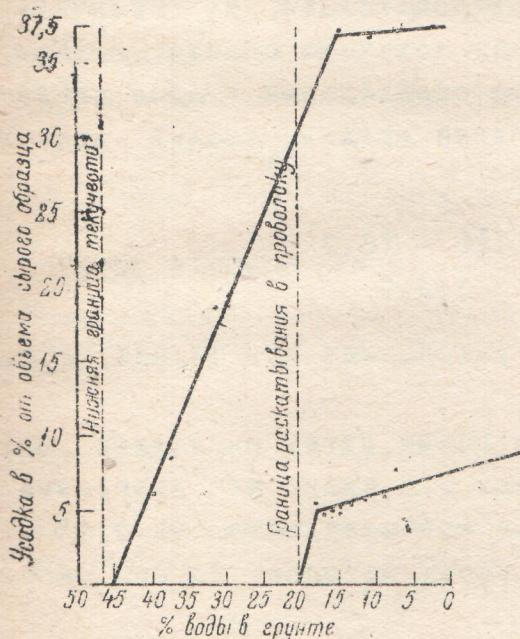


Диаграмма 3.

Усадка часов-ярской глины.

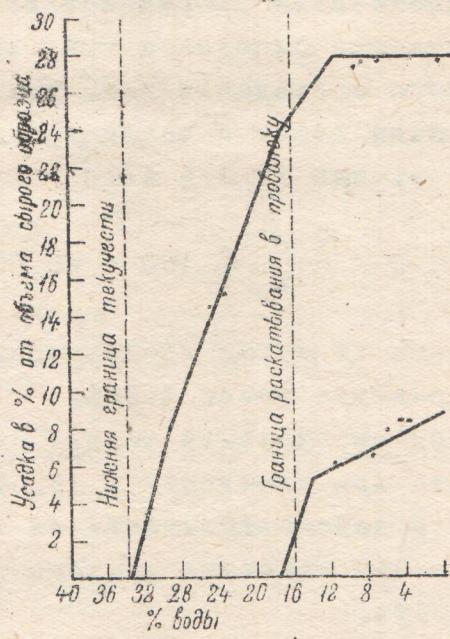


Диаграмма 4.

Усадка кембрийской глины.

в сушильном шкафу при 105°С до постоянного веса. Во время сушики в образцах, через промежутки 3-4 часа производилось определение объемной усадки и количества испарившейся воды.

На почь образцы обертивались восковой бумагой во избежание их вспашания. Результаты опытов приведены в таблицах 1 и 2 и на диаграммах 3 и 4, где по оси абсцисс отложена влажность в процентах от веса сухого грунта, а по оси ординат усадка в процентах от объема грунта при первоначальной влажности, т.е. влажности, соответствующей нижней границе текучести.

Усадка часов-ярской глины в интервале влажности от нижней границы текучести до предела усадки изменяется почти по прямой линии, как это было установлено американскими исследователями. При пределе усадки, влажности содержится на 5,7% меньше, чем при границе раскатывания в проволоку или, если содержание воды при границе раскатывания принять за 100%, ее содержание будет равняться 68%, т.е. меньше на 32%, что близко к тем величинам, которые указал Atterberg.

В интервале между пределом усадки и абсолютно сухим состоянием объем глины почти не изменяется, объемная усадка здесь равна только 0,6%.

Если определить влажность при пределе усадки методами, предложенными американскими исследователями, то величина получается близкая к той, которая получена опытно, однако, полного совпадения нет. Так, при определении усадки аналитическим путем в часов-ярской глине предел усадки должен был быть при 12,97% воды

$$S = W - \frac{V - V_0}{V_0} \cdot 100 = 45,56 - \frac{125 - 78,2}{143,6} \cdot 100 = 12,97,$$

опытным же путем предел усадки установлен при 14,83%, т.е. расхождение равно 1,86%.

При определении усадки графическим путем он должен был лежать при влажности в 15,5%, как это видно из диаграммы 5, а в действительности он лежит при влажности на 0,67% ниже. Что касается расхождения обоих методов, то оно равно 2,57%.

Кроме изменения усадки в глине, в зависимости от содержания воды, увлажненной до нижней границы текучести, она была определена также в образцах, увлажненных до границы раскатывания в проволоку и сформованных под нагруз-

кой 100 и 200 кг/см<sup>2</sup>. Результаты опытов приведены на диаграмме 6.

Как видно из полученных данных, усадка всех образцов небольшая и при утрамбовке в 100 кг/см<sup>2</sup> несколько больше, чем при утрамбовке 200 кг/см<sup>2</sup>. Отличие в ходе усадки данных образцов от сформованных при нижней границе текучести состоит в том, что предел усадки лежит при большем содержании воды (17 и 18%), а также и в том, что здесь предел усадки выражен менее резко, и после предела усадки объем грунта сокращается на значительную величину, достигающую 4%.

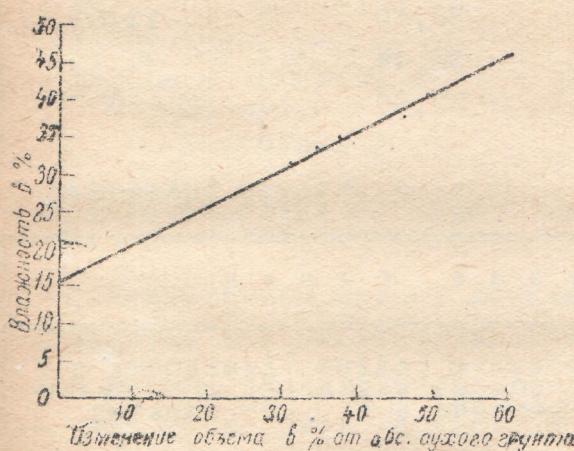


Диаграмма 5.

Определение предела усадки часов-ярской глины графически.

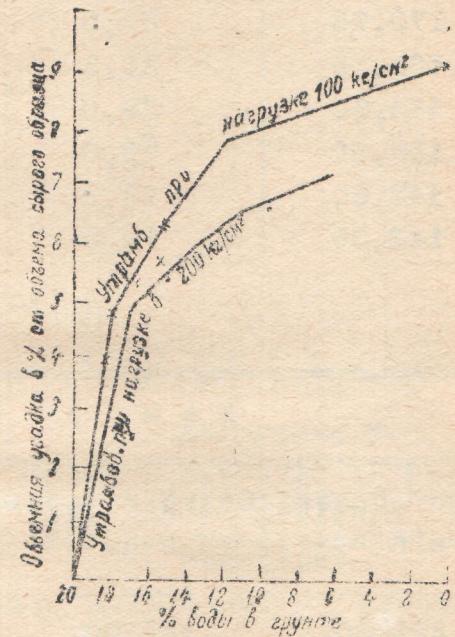


Диаграмма 6.

Усадка часов-ярской глины, сформованной при грав. раскатке, в проволочку.

Таблица 1

Часов-ярская глина			
Вес образца в г	Объем образца в см <sup>3</sup>	Съемная усадка от объема влажн. образца в %	Влажность в % от веса сухого образца
209,20	125,0	0	47,32
201,37	117,0	6,4	41,80
197,50	114,5	8,4	39,08

## Ч а с о в - я р с к а я г л и н а

Вес образца в г	Объем образца в см <sup>3</sup>	Объемная усадка от объема влажн. образца в %	Влажность в % от веса сухо- го образца
193,55	108,0	13,6	36,30
191,32	105,5	15,6	34,73
188,70	103,0	17,6	32,88
186,22	100,3	19,76	31,14
183,57	97,8	21,76	29,27
180,12	94,0	24,80	26,84
170,75	84,0	32,80	20,24
166,75	80,5	35,60	17,42
164,90	79,0	36,80	16,12
158,50	79,0	36,80	11,61
143,60	78,2	37,44	1,12
142,00	78,0	37,60	0

Таблица 2

## К е м б�и й ск а я г л и на

Вес образца в г	Объем образца в см <sup>3</sup>	Объемная усадка от объема влажн. образца в %	Влажность в % от веса сухо- го образца
229,30	125,00	0	34,74
221,25	115,00	8	30,01
217,52	111,00	11,20	27,82
213,79	107,00	14,40	25,63
211,60	106,00	15,20	24,34
209,05	102,50	18,00	22,83
206,80	100,50	19,60	21,40
204,00	97,50	22,00	19,88
200,80	94,50	24,40	17,99
191,70	90,30	27,76	12,65
187,92	91,00	27,20	10,43
186,85	90,80	27,40	9,80
182,82	90,50	27,60	7,43
171,60	90,50	27,60	0,84
170,27	90,50	27,60	0

Изменение усадки кембрийской глины ( см. диаграмму 4 )  
присходит так же, как и часов-ярской.

Предел усадки должен лежать при 13,52% влажности:

$$S = W - \frac{V - V_0}{W_0} \cdot 1000 = 33.62 - \frac{125 - 90.5}{171.6} \cdot 100 = 13.52.$$

Спределяя влажность предела усадки графически, получим 14,5% ( диаграмма 7 ).

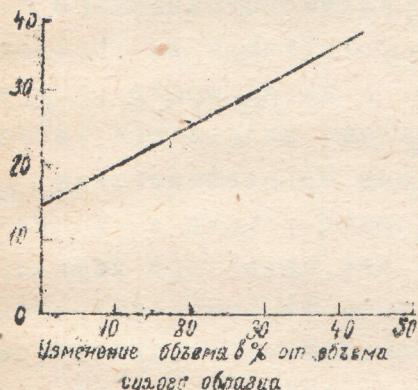


Диаграмма 7.

Определение предела усадки кембрийской глины графично.

Опытным путем предел усадки установлен при 11,5%. Однако, по ходу кривой, из диаграмме 8 видно, что точно этот предел не уловлен и должен лежать при большей влажности, а именно, при влажности 14,5%.

Предел усадки данной глины, как видно из диаграммы, лежит близко к границе раскатывания в проволоку, разница составляет только 1,5% или, если влажность границы раскатывания принять за 100, то при пределе усадки она будет равна 90,8%, т.е. меньше на 9,4%. Кембрийская глина, как и часов-ярская, является по пластичности глиной 1-го класса, и здесь отклонение от пределов, указанных Atterberg'ом, значительное.

В образцах, утрамбованных при Формовке 200 кг/см<sup>2</sup> и 80 кг/см<sup>2</sup> ( см. диаграмму 8 ) предел усадки лежит при той же влажности, как и у образца сформованного при нижней грв-

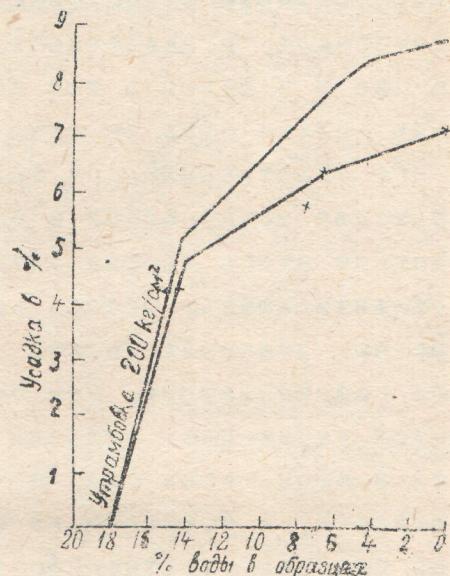


Диаграмма 8.

Усадка кембрийской глины, сформованной при влажности близкого к границе раскатывания, в проволоку.

нице текучести, но усадка, как и у часов-ярской глины, после предела имела место и достигала величины 3,6%.

### Сопротивление раздавливанию грунта в зависимости от условий уплотнения.

Сопротивление раздавливанию грунтов колеблется в большом интервале, в зависимости от их гранулометрического состава, но и в одном и том же грунте сопротивление раздавливанию 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 коэффициенты внутреннего трения и сцепления увеличиваются. Отсюда вытекает, что грунт при всех других равных условиях должен обладать тем большим сопротивлением раздавливанию, чем больше его объемный вес, который является выражением степени уплотненности грунта. Чтобы убедиться в этом, нами были взяты две глины - часов-ярская и кембрийская, и испытаны на сопротивление раздавливанию при разной степени уплотненности, одновременно с этим в них был определен и объемный вес. Все образцы глин приготавливались в виде кубиков  $5 \times 5 \times 5$  см. Нагрузка при формовке образцов изменялась от  $15 \text{ кг}/\text{см}^2$  до  $400 \text{ кг}/\text{см}^2$ , влажность их 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 формовке всех образцов вода из грунта не выступала. После формовки образцы сушились при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния, а затем в сушильном шкафу при  $105^\circ\text{C}$  до постоянного веса. В абсолютно сухом состоянии в образцах, после их предварительного охлаждения в экскаваторе, определялся объемный вес на приборе Богданова и сопротивление раздавливанию на масляном прессе. Результаты этих исследований приведены в таблице 3 и на диаграмме 9.

Как видно из полученных результатов, в общем, сопротив-

Таблица 3

Наименование образцов	Нагрузка при форм. в кг/см <sup>2</sup>	Влажность при форм. в %	Объемный вес	Сопротивление раздавлению в кг/см <sup>2</sup>	Усадка при сушке
Часов-ярская глина	15	20,7	1,47	29,1	8,8
" "	60	21,2	1,78	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	17,8	2,0	129,0	8,8

ление раздавливания растет с увеличением объемного веса. Если рассмотреть отношения между объемными весами и сопротивлением раздавливанию при разных нагрузках во время уплотнения часов-ярской глины, то оказывается, что при уплотнении в 15 кг/см<sup>2</sup>, сопротивление раздавливанию не большое и соответственно объемный вес мал. Очевидно, трение в грунте, при влажности в 20,7%, при которой производился опыт, было настолько велико, что обвязать частицы не удалось и не получилось равномерной плотности во всей массе.

При уплотнении в 60 кг/см<sup>2</sup>, при той же почти влажности, как сопротивление раздавливанию, так и объемный вес повысились значительно, еще большей величины достигли при уплотнении в 100 кг/см<sup>2</sup>, однако, возрастание этих величин идет медленнее, чем при увеличении уплотнения от 15 кг/см<sup>2</sup> до 60 кг/см<sup>2</sup>. Еще более слабое увеличение сопротивления

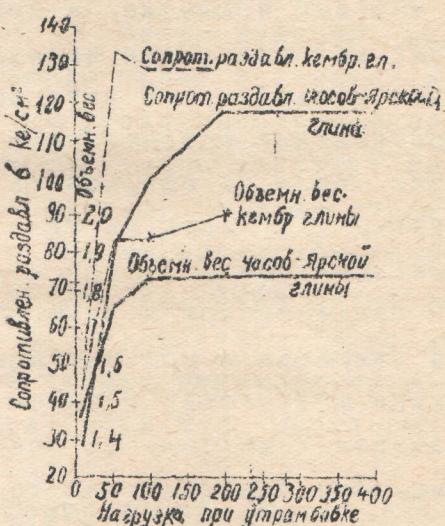


Диаграмма 9.

Сопротивление раздавливанию и объемный вес часов-ярской и кембрийской глины, сформов. при разных нагрузках.

раздавливанию 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 вызывает никакого увеличения ни сопротивления раздавливанию, ни объемного веса. Это явление можно объяснить тем, что влажность при которой формовались 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 вследствие этого дальнейшего уплотнения происходить не могло, так как вследствие краткости нагрузки избыток воды не мог оттаять. Что касается кембрийской глины, то ход изменения при разной нагрузке сопротивления раздавливанию и объемного веса тот же самый, что и в часов-ярской глине, только максимальной величине сопротивление раздавливанию достигло при меньшей величине, а именно при  $60 \text{ кг}/\text{см}^2$ .

Так как глины при вспахании испытывают большое капиллярное давление, то интерес представляло выяснить, какое сопротивление раздавливанию и какой объемный вес будет в глинах, если из сформовать без утрамбовки и затем дать высокнуть, т.е. дать им уплотниться при вспахании за счет капиллярных сил. С этой целью были приготовлены образцы из глин часов-ярской и кембрийской следующим образом: масса была замешана с количеством воды, соответствующим нижней границе текучести, и затем из нее сформованы кубики под давлением  $7 \text{ кг}/\text{см}^2$ . Во время трамбовки грунт выжимался из формы. Это указывает на то обстоятельство, что давление целиком воспринималось водой и не передавалось на грунт. После того, как образцы были сформованы, они были просушенны сначала при комнатной температуре, а затем в сушильном шкафу при  $105^\circ \text{C}$  до постоянного веса. В высшенных образцах затем был определен объемный вес и сопротивление раздавливанию. Результаты испытаний получились такие (табл. 4):

Таблица 4.

Наименование грунта	Объемный вес	Сопротив. раздавливанию в $\text{кг}/\text{см}^2$ .
Часов-ярская	1,82	30
Кембрийская	1,94	70

Из приведенной таблицы видно, что объемные веса глин при уплотнении их капиллярными силами получились такими же, как и в образцах, сформованных при больших нагрузках, что же касается сопротивления раздавливанию, то оно значительно ниже. В кембрийской глине оно меньше почти в 2 раза, чем в той же глине, сформованной при нагрузке 60 кг/см<sup>2</sup> и больше, а в часов-тарской глине оно меньше почти в 4 раза. Это явление мы объясняем так. Когда изготавливаются образцы, прессуются, перемешиваются с водой, то частицы в массе грунта находятся в хаотическом состоянии, поры между ними в разных местах массы неодинакового порядка. Когда грунт высыпает под влиянием капиллярных сил, 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 раздавливанию 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, massa 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 раздавливанию образцов, спрессованных под давлением, несравненно выше.

Что при утрамбовке происходит перераспределение частиц и получается равномерные капилляры, доказывает следующий опыт. Нами была взята кембрийская глина при нижней границе текучести и из нее приготовлен образец под давлением 7 кг/см<sup>2</sup> и 30 кг/см<sup>2</sup>. 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 вода отжималось большое количество, а затем отжимания не было заметно. Следовательно, в конце опыта количество воды в грунте было, примерно, такое, которое соответствует данной нагрузке. Через двое суток образцы были вынуты из форм, высушены сначала

при комнатной температуре, а затем в сушильном шкафу при  $105^{\circ}\text{C}$  до постоянного веса. В абсолютно сухих образцах были замерены объемная усадка, объемный вес и определено сопротивление раздавливанию. Результаты получились такие (см. таблицу 5):

Таблица 5

Нагрузка, при которой формовались образцы $\text{кг}/\text{см}^2$	Объемн. усадка в % к сырому образцу	Объемный вес	Сопрот. раздавл. 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 (см. диаграмму 9) и в образцах, уплотнившихся исключительно под влиянием капиллярных сил (см. таблицу 4). Что же касается сопротивления раздавливанию, то оно было значительно больше того, которое наблюдалось в образцах, уплотнение которых происходило исключительно за счет капиллярных сил 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 выхималась 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 первоначальная влажность грунта будет больше той влажности, которая может удержаться при данной нагрузке в данном грунте. Как видно из результатов опыта образца, сформованного под нагрузкой в  $7 \text{ кг}/\text{см}^2$  и в  $30 \text{ кг}/\text{см}^2$ , дали практически сопротивление раздавливанию одного и того же порядка, следовательно,

большое сопротивление раздавливанию их обусловлено было не нагрузкой во время формовки, а уплотнением их при сушике силами капиллярного давления. Что это так, видно из того, что после действия нагрузки при вспахании они дали большую усадку, т.е. уплотнялись силами капиллярного давления. 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 осуществиться тогда, когда избыток воды был удален, так как до этого времени нагрузка воспринималась водой, а не грунтом и потому она (нагрузка) не могла производить перераспределяющего действия на частицы, или оказывала действие малое. Что это так, вытекает из следующих опытов по определению сопротивления раздавливанию в грунтах, сформованных при разной влажности, но при одной и той же нагрузке.

Для опытов нами были взяты два грунта: часов-ярская глина и черновецкий средний суглинок ( $\text{частиц } < 0,005 \text{ мм}$   $17,6\%$ ). Из этих грунтов было приготовлено два ряда образцов: один ряд с разным содержанием воды утрамбовывался на нагрузкой в  $15 \text{ кг}/\text{см}^2$  и второй ряд нагрузкой в  $3 \text{ кг}/\text{см}^2$ . Нагрузка при формировании, когда грунт не выпирал из формы, длилась 3 минуты, при больших же влажностях, когда грунт выпирал, 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  $105^\circ\text{C}$  до постоянного веса. Взвешенные образцы испытывались на сопротивление раздавливанию.

Результаты испытаний часов-ярской глины приведены на диаграмме 10, где по оси абсцисс отложена влажность, при которых формовались образцы, а по оси ординат сопротивление раздавливанию в  $\text{кг}/\text{см}^2$  абсолютно сухих образцов. Когда образцы формовались нагрузкой  $15 \text{ кг}/\text{см}^2$  при большой влаж-

ности (42%), то после высушивания они дали сравнительно малое сопротивление раздавливанию, при уменьшении воды в образцах при формовке сопротивление раздавливанию увеличивается и достигает наибольшей величины при влажности 32,8%. При этой влажности сформованные кубики дали сопротивление раздавливанию близкое к тому, что получалось при нагрузках 200 и 400 кг/см<sup>2</sup>. Малое сопротивление при большой влажности объясняется тем, что при утрамбовке их нагрузка воспринималась почти исключительно водой и потому перераспределения частиц грунта не происходило, они оставались в хаотическом состоянии. С уменьшением влажности нагрузка от частиц уже перераспределяла частицы и при влажности 32,8% это перераспределение, в условиях опыта, достигло наибольшей величины, а так как сопротивление раздавливанию кубиков, сформованных при этой влажности, лежит близко к тому, что дает большие нагрузки, то можно думать, что данная влажность близка к той, которая соответствует данной нагрузке на часо-арскую глину, если последняя под нагрузкой находится продолжительное время и избыток воды из нее отжат. Образцы, сформованные при влажностях ниже 32,8% дают сопротивление раздавливанию меньшее, и тем меньше влажность

при формовке. Это явление объясняется тем, что при этих влажностях трение между частицами больше, и примененная нагрузка не могла произвести перераспределения и сближения частиц в заметной степени.

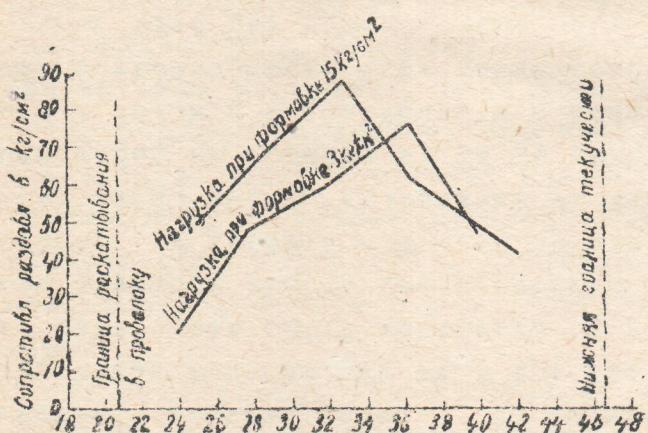


Диаграмма 10.

Сопротивление раздавливанию образцов часо-арской глины, сформ. при разной влажности.

сформованных под нагрузкой 15 кг/см<sup>2</sup>, однако, максимальная

изменение сопротивления раздавливанию образцов часо-арской глины с нагрузкой при формовке 3 кг имеет тот же характер, что и

величина сопротивления раздавливанию здесь меньше. Это можно объяснить во-первых тем, что в условиях опыта не была уделена влажность, которая соответствует данной нагрузке на часов-ярскую глину. При ее продолжительном действии, во-вторых, может быть отчасти объясняется и тем, что данная нагрузка вообще слишком мала, чтобы вызвать полное перераспределение частиц в этой глине.

Изменение сопротивления раздавливанию образцов суглинистого чернозема, сформованных по тому же принципу, что и часов-ярская глина, приведены на деж-граммме 11.

Как видно из диаграммы, ход изменения сопротивления раздавливанию, в зависимости от влажности при формовке образцов, тот же самый, какой наблюдался и при испытании часов-ярской глины, т.е. образца, сформованные при большой влажности, дают малое сопротивление раздавливанию, 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, как видно из диаграммы, максимальное сопротивление раздавливанию образцов, сформованных под нагрузкой в  $15 \text{ кг}/\text{см}^2$ , при влажности 11,6% равно таковому же из образцов, сформованных под нагрузкой  $3 \text{ кг}/\text{см}^2$  при влажности 15,1%. Надо полагать, что влажность 11,1% является влажностью близкой к той, которая в данном грунте вообще может содержаться при нагрузке  $15 \text{ кг}/\text{см}^2$ , действующей продолжительное время на него, точно так же, как и влажность 16,1% является близкой к той, которая удерживается в грунте под нагрузкой в  $3 \text{ кг}/\text{см}^2$ .

На основании рассмотрения результатов этих опытов видно, что не только длительная нагрузка на грунт вызывает пере-

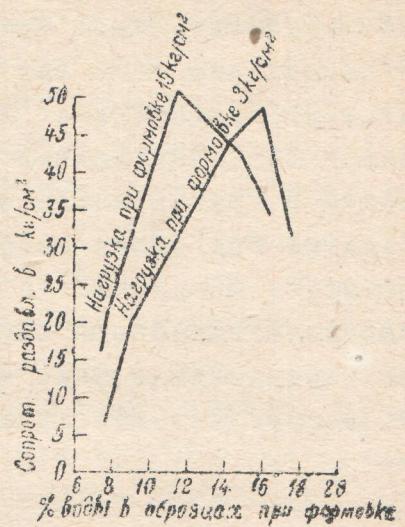


Диаграмма 11.  
Сопротивление раздавливанию образцов черноземного суглинка, сформованных при разной влажности.

распределение частиц, но и нагрузка моментальная, если только она производится на грунт, при таком содержании в нем воды, которое удерживается под данной нагрузкой, действующей продолжительное время.

Ввиду того, что при укатке применяется нагрузка моментальная, представляет практический интерес выяснить: а) зависит ли моментальная нагрузка налие перераспределение частиц в грунте после однократного ее приложения или необходимо повторить нагрузку и сколько раз; б) если нужно повторить нагрузку, то сколько раз для грунтов различного гранулометрического состава; в) на какую глубину происходит перераспределение частиц и как при этом с глубиной должна распределяться влажность.

#### Условия укатки связных грунтов.

Вновь построенная грунтовая дорога, даже если ее состав — оптимальная смесь, является рыхлой и мало сопротивляется образованию деформаций при проезде. В устойчивое состояние такая дорога приходит только на второй год ее существования. Изменение свойств дороги во времени обуславливается, с одной стороны, тем, что она постепенно уплотняется многократным действием капиллярных сил в периоды просыхания. С другой стороны, устойчивость дороги повышается и от перераспределения в ней частиц грунта. В сырье периоды года, весной и осенью, а также в сильные дожди летом, через дорогу фильтруются выпадающие осадки. Эти осадки увлекают с собой тонкие частицы грунта, перераспределяют их в массе грунта и вследствие этого значительно повышают его устойчивость.

Перераспределение частиц в дорожном грунте, совершающееся в природе медленно, может быть ускорено укаткой, если таковая производится при благоприятных условиях. На основании выполненных лабораторных опытов можно полагать, что укатка дает благоприятные результаты в том случае, когда укатываемый верхний слой дороги будет иметь влажность, близкую к той, которая в дорожном грунте может быть удержанна

при длительном воздействии на него нагрузки, равной давлению катка. При больших влажностях перераспределения частиц в грунте происходит не будет вследствие того, что нагрузка от катка будет восприниматься водой, заключенной в грунте; при влажностях значительно меньших каток не сможет перераспределить частицы потому, что силы, необходимые для скатия грунта и перераспределения частиц в нем значительно больше давления, осуществляемого катками. Так как давление катка на грунт с глубиной уменьшается, то, если грунт будет на всю укатываемую глубину иметь одну и ту же влажность, степень перераспределения частиц с глубиной будет быстро затухать. Если же влажность грунта с глубиной увеличивается, то перераспределение частиц грунта будет происходить в большем слое, так как при большей влажности перераспределение частиц в грунте происходит при меньших нагрузках. Поэтому наиболее благоприятным состоянием грунтовой дороги для укатки будет тогда, когда влажность верхнего слоя дороги соответствует или близка к той, которая удерживается в грунте под длительной нагрузкой, равной давлению катка на грунт и с глубиной повышается, т.е. наиболее выгодно укатку производить в период просыхания дороги, когда влажность верхнего ее слоя будет близка к влажности, удерживаемой в грунте под нагрузкой равной давлению катка.

Для определения благоприятного момента укатки необходимо, с одной стороны, учитывать влажность дорожного грунта, с другой, определить зависимость между влажностью и давлением нагрузкой на грунт.

Эта зависимость определяется следующим образом. В металлическую чашечку диаметром в высотой 4-5 см кладется испытуемый грунт слоем около 1 см при влажности заведомо большей той, которая может в ней содержаться под задаваемой нагрузкой. Поверх испытуемого грунта кладется слой около 1-2 см тонкого песка и сверху песка металлическая крышка, имеющая диаметр на 1 см меньше внутреннего диаметра чашечки. Затем чашечка ставится под ручажный пресс, и на крышку дается нагрузка, равная давлению катка. Грунт сверху заливается водой, во избежание его просыхания во время опыта. Нагрузка

на грунт оставляется до тех пор, пока он не перестанет уплотняться, на что обычно требуется 3-4 суток. Конец опыта можно определять измерительными приборами, например, мессурой, которые показывают прекращение деформаций в испытуемом грунте. После опыта вода, стоявшая над грунтом, удаляется фильтрованной бумагой, чашечка вынимается из под пресса, песок из нее тщательно удаляется, из средины грунта берется проба 5-7 г, и в ней определяется влагосодержание содержание воды.

### Выводы.

На основании проделанной работы можно прийти к следующим выводам:

Усадка: 1) изменение усадки связного грунта с уменьшением содержания в нем воды происходит почти по прямой линии, как это было установлено американскими исследователями; 2) предел усадки связных грунтов может быть определен аналитическим путем и графическим, как это предложено американскими исследователями, однако, это определение является только приближенным; 3) влажность при пределе усадки несколько изменяется в зависимости от условий формовки образцов.

Связность: 1) величина объемного веса грунта не является показателем степени его устойчивости, так как грунт при одном и том же объемном весе может обладать различной связностью, что зависит от различного распределения частиц грунта относительно друг друга; 2) капиллярные силы, вызывающие уплотнение грунта, не изменяют взаиморасположения частиц; 3) уплотнение грунта нагрузками соответствующими влажности изменяет взаимное расположение частиц, переводя их из хаотического состояния в более устойчивое, и тем способствует большей связности грунта.

Укатка: 1) укатка грунта, как можно судить на основании лабораторных опытов, должна дать наибольший эффект в том случае, когда укатываемый слой содержит воды столько, сколько может удерживаться в нем под на-

грунок, равной давлению катка; 2) перераспределение частиц грунта при укатке будет происходить на большую глубину тогда, когда верхний слой имеет влажность, удерживаемую грунтом под нагрузкой, равной давлению катка и края постепенно увеличивается.

-----oooo-----

## ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

в книге В. В. Охотина и др. „Физико-механические свойства грунтов“.

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	Почьей вине
15	Табл. 2	На <u>м. экв.</u> 100 г	На 9 <u>м. экв.</u> 100 г	корректора
47	5 сверху	увеличивается	увеличивающейся	автора
61	Диаграмма № 6 (подпись)	возможностях	влажностях	корректора
67 и 69	Табл. 2 и 3	Содержание Na в погло- щающем комплексе в мил- лиэквив.	Содержание Na в погло- щающем комплексе в мил- лиэквив. на 100 г	автора
69	17 сверху	миллиэquivалентор	миллиэквивалентов	корректора
71	Табл. 4	Насыщенность натрия в миллиэквив.	Насыщенность натрия в миллиэквив на 100 г	автора