

К

186129

Е. Г. ЧАПОВСКИЙ

ПРАКТИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ  
ПО ГРУНТОВЕДЕНИЮ  
И МЕХАНИКЕ ГРУНТОВ

ГОСГЕОЛИЗДАТ  
1946



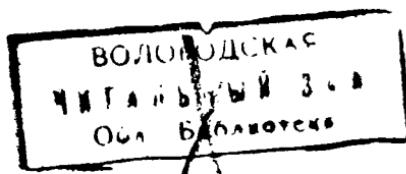
КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ ГЕОЛОГИИ ПРИ СНК СССР

Е. Г. ЧАПОВСКИЙ

ПРАКТИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ  
ПО ГРУНТОВЕДЕНИЮ  
И МЕХАНИКЕ ГРУНТОВ

Допущено Всесоюзным Комитетом  
по делам Высшей школы при СНК СССР  
в качестве учебного пособия для геолого-разведочных техникумов

186/29



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
КОМИТЕТА ПО ДЕЛАМ ГЕОЛОГИИ ПРИ СНК СССР

1945

МОСКВА

ЛЕНИНГРАД

6924  
4-19 6924 (вт)

Настоящая книга является практическим руководством к лабораторным исследованиям по грунтоведению и механике грунтов.

Книга содержит 8 тем и 25 заданий применительно к программе по курсу инженерной геологии гидрогеологической специальности геолого-разведочных и горных вузов.

Каждая тема и каждое задание практикума содержит, кроме инструктивного изложения методики работ, описание аппаратуры и примеры обработки опытных данных, а также краткие указания на другие, не вошедшие в настоящее пособие, методы.

Книга предназначается в качестве учебного пособия для студентов-гидрогеологов, но может быть полезна и для практических работников лабораторий инженерной геологии и грунтоведения.

Ответственный редактор Д. Я. Стерлин.

Сдано в набор 19/VII 1945 г.

Подписано к печати 10/XII 1945 г.

Формат 62×94.

Тираж 3000

М 06301.

Учетно-изд. листов 10,70.

Печ. листов 9½ + 1 вкл.

Заказ № 1454.

4-я типография им. Евг. Соколовой треста «Полиграфшиг»  
ОГИЗа при СНК РСФСР, Ленинград, Измайловский пр., 29.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие составлено в соответствии с программой курса инженерной геологии Московского геолого-разведочного института и имеет целью помочь студентам в их самостоятельной работе в лаборатории грунтоведения.

По программе курса инженерной геологии лабораторным работам предшествуют теоретические курсы грунтоведения и механики грунтов. Поэтому в настоящей книге теоретические положения грунтоведения или опущены или изложены очень кратко, в самой общей форме, только для того, чтобы помочь студенту быстро вспомнить пройденное и приступить сознательно к самостоятельным лабораторным работам по изучению физико-механических свойств грунтов.

В книге дано перечисление главнейших методов по определению основных величин, характеризующих физико-механические свойства грунтов. Методы, предусмотренные программой для самостоятельной проработки студентами в лаборатории, описаны в виде практических заданий; по остальным же методам сделаны только ссылки на соответствующую литературу.

Содержание каждой практической работы изложено в инструктивной форме с достаточной подробностью как в части постановки самого опыта, так и в отношении последующего расчета его результатов.

При изложении методики практических работ автор придерживался решений Совещания по исследованию грунтов 1940 г.

Наименование величины	Условные обозначения
Объем всего грунта при некоторой степени увлажнения . . . . .	$V$
Объем всего грунта в абсолютно-сухом состоянии . . . . .	$V_d$
Объем скелета . . . . .	$V_s$
Объем пор . . . . .	$V_n$
Объем воды . . . . .	$V_w$
Объем воздуха . . . . .	$V_a$
Вес скелета (или вес абсолютно-сухого грунта) . . . . .	$G_s$
Вес воды . . . . .	$G_w$
Вес влажного грунта . . . . .	$G$
Удельный вес грунта . . . . .	$\gamma$
Объемный вес влажного грунта . . . . .	$\gamma_1$
Объемный вес твердой фазы (скелета грунта) . . . . .	$\delta$
Объемный вес грунта под водой . . . . .	$\delta_u$
Объемный вес абсолютно-сухого (высшенного при 105° С) грунта . . . . .	$\delta_d$
Полная влажность при данной пористости (весовая пористость) . . . . .	$W$
Влажность (весовая) . . . . .	$w$
Пористость . . . . .	$n$
Объемная влажность . . . . .	$n_w$
Приведенная пористость (коэффициент пористости) . . . . .	$\epsilon$
Приведенная объемная влажность . . . . .	$\epsilon_w$
Относительная влажность (степень влажности, коэффициент насыщения) . . . . .	$K_w$
Максимальная гигроскопичность . . . . .	$w_h$
Максимальная молекулярная влагоемкость . . . . .	$w_m$
Капиллярная влагоемкость . . . . .	$w_k$
Полная влагоемкость . . . . .	$W_t$
Предел усадки . . . . .	$W_c$
Нижний предел пластичности . . . . .	$W_p$
Предел липкости . . . . .	$W_x$
Верхний предел пластичности . . . . .	$W_f$
Предел текучести . . . . .	$W_l$
Число пластичности . . . . .	$M_p$
Степень плотности песка . . . . .	$D$
Уплотняемость песка . . . . .	$F$
Показатель консистенции . . . . .	$K_p$
Коэффициент фильтрации . . . . .	$K$
Коэффициент уплотнения глин . . . . .	$a$
Коэффициент внутреннего трения . . . . .	$f$
Угол внутреннего трения . . . . .	$\Phi$
Угол сдвига (угол внутреннего сопротивления) . . . . .	$\psi$
Сцепление . . . . .	$C$
Коэффициент бокового давления . . . . .	$\xi$
Относительный модуль сжатия . . . . .	$E$
Скорость фильтрации . . . . .	$v$
Напорный градиент . . . . .	$I$

## ТЕМА ПЕРВАЯ

# ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

*Под гранулометрическим (механическим) составом грунтов понимается относительное (в процентах) содержание в них (по весу) частиц различной величины.*

Для определения гранулометрического состава грунтов производится так называемый гранулометрический анализ. Гранулометрический анализ состоит в расчленении грунта на составные частицы по величине этих частиц, начиная от самых крупных.

В настоящее время разработано много методов гранулометрического анализа грунтов, которые разделяются на следующие группы:

1. Глазомерный или визуальный метод, заключающийся в сравнении на глаз или с помощью лупы изучаемого грунта с эталонами, механический состав которых известен.

Визуальный метод имеет несколько вариантов [3].

2. Полевые методы Филатова и Рутковского.

Метод Филатова [11] заключается в оценке гранулометрического состава грунта по числу набухания и механическому числу, определяемым в специальной воронке и трубке.

Описание метода Рутковского дано ниже.

3. Гидравлические методы.

Эти методы основаны на принципе деления грунта по скорости падения его частиц, взвешенных в жидкости. Среди методов этой группы различают: а) методы отмучивания в спокойной воде — Сабанина, Аттерберга, Вильямса и др.; б) методы разделения током воды, например способ Шене [6; 19].

4. Непрерывные методы анализа.

В качестве примеров этих методов можно указать следующие:

а) способы, основанные на последовательном взятии проб из приготовленных суспензий, например охарактеризованный ниже пипеточный анализ по Робинзону;

б) способы, заключающиеся в непосредственном взвешивании осадков, последовательно выпадающих из суспензии при ее отстаивании; примером может служить способ Свен-Одена [6];

в) способы, основанные на учете изменения плотности супензии или гидростатического давления супензии, в числе которых могут быть названы описанный ниже ареометрический анализ и метод Вигнера [19].

### 5. Метод центрифугирования.

Этот метод гранулометрического анализа основан на осаждении частичек грунта центробежной силой, развивающейся при вращении центрифуги [15; 29].

Из всех перечисленных выше методов в инженерно-геологической практике наибольшее распространение получили: ситовой анализ, метод Сабанина, метод Робинсона, ареометрический анализ и полевой метод Рутковского.

Совещание по исследованию грунтов, происходившее в 1940 г., приняло за стандартный метод гранулометрического анализа при массовых работах метод отсеивания и ареометр.

## Предварительная подготовка грунтов к гранулометрическому анализу

Предварительная подготовка грунтов к гранулометрическому анализу состоит в том, чтобы тем или иным способом разрушить существующие в грунте связи между частицами.

Существующие способы подготовки грунта к гранулометрическому анализу можно разделить на две группы: 1) физико-механические и 2) химические. К первым относятся: а) взбалтывание грунта с водой, б) кипячение его и в) растирание. Химическая подготовка состоит в обработке грунта тем или иным реагентом (щелочью, кислотой и т. п.).

При подготовке грунта различными способами получаемая степень дисперсности грунта оказывается различной. Поэтому и результаты анализа при разной подготовке грунта получаются совершенно разные, несравнимые.

При химической подготовке происходит наиболее глубокое изменение состава грунта, некоторые составные части его растворяются и, следовательно, не могут быть учтены при гранулометрическом анализе. Поэтому химические способы подготовки грунтов к гранулометрическому анализу применяются только в специальных случаях по особому заданию.

Основным методом предварительной подготовки глинистых грунтов к гранулометрическому анализу в настоящее время принят способ размачивания и кипячения в дистиллированной воде с последующим растиранием. Грунты же, содержащие соли-электролиты, кроме кипячения, иногда подвергаются также предварительной отмыке водой до полного удаления водорастворимых солей, вызывающих коагуляцию.

В зависимости от того или иного сочетания перечисленных выше приемов различают следующие три схемы подготовки грунтов к гранулометрическому анализу: первая схема — дис-

персный анализ, вторая схема — полудисперсный анализ и третья схема — агрегатный анализ.

Первая схема (дисперсный анализ). По этой схеме грунт приводится в состояние максимальной дисперсности путем замещения всех обменных катионов катионом  $\text{Na}^+$ . Ход подготовки следующий.

1. Воздушно-сухой грунт размельчают в фарфоровой ступке резиновым пестиком и просеивают сквозь сито 0,5 мм.

2. Из прошедшего сквозь сито мелкозема берут две навески грунта по 20 г.

3. Каждую навеску помещают на отдельный бумажный фильтр и промывают шестью порциями (по 50 см<sup>3</sup> каждая) нормального раствора хлористого натрия ( $\text{NaCl}$ ).

4. После этого каждую навеску промывают тремя порциями (по 50 см<sup>3</sup>) нормального раствора соды ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).

5. Промывают каждую навеску на фильтре двумя порциями (по 25 см<sup>3</sup> каждая) дистиллированной воды.

6. Смывают одну из навесок грунта с фильтра в коническую колбу, доливают дистиллированной воды до получения общего объема 200 см<sup>3</sup> и, добавив 1 см<sup>3</sup> нормального раствора едкого натра, кипятят содержимое колбы в течение часа, после чего подготовка к дисперсному анализу считается оконченной.

7. Вторую навеску снимают с фильтра, высушивают до абсолютно-сухого состояния и определяют ее вес, который и служит для дальнейших счетных операций.

Как уже было сказано, этот способ подготовки грунта к гранулометрическому анализу применяется только в специальных случаях для получения представления о максимально возможной степени дисперсности грунта.

Вторая схема (полудисперсный анализ). По этой схеме грунт приводится в состояние естественно-элементарного расщепления без энергичного химического воздействия. Ход подготовки следующий:

1. Воздушно-сухой грунт размельчается в фарфоровой ступке резиновым пестиком и просеивается сквозь сито 0,5 мм.

2. Из прошедшего сквозь сито мелкозема отвешивают пробу 10 г для глин, 15 г для суглинков и 20 г для тяжелых супесей, если анализ будет вестись пипеточным методом (Робинсона), или 20 г для глин, 30 г для суглинков и 40 г для супесей, если анализ будет вестись ареометрическим методом. Одновременно берут вторую пробу в количестве 5 г для определения гигроскопической влаги.

3. Производят опробование грунта на коагуляцию: около 2 г грунта растирают в фарфоровой чашке резиновым пестиком с 10 см<sup>3</sup> дистиллированной воды.

Прибавив 20 см<sup>3</sup> воды, кипятят в течение 5—10 минут содержимое чашки, а затем сливают через воронку в стеклянную пробирку емкостью около 30 см<sup>3</sup>.

Пробирку ставят в штатив и оставляют в покое до следующего дня. Если суспензия на следующий день коагулировала с образованием коагеля, что заметно по внешнему виду (осадок рыхлый, хлопьевидный), идущий на анализ грунт нуждается в отмыке от солей, вызывающих коагуляцию.

4. Для этого взятую для анализа навеску помещают на бумажный фильтр и промывают дистиллированной водой до удаления водорастворимых солей.

Окончание промывки определяют по отсутствию реакции фильтрата с  $\text{AgNO}_3$  и  $\text{BaCl}_2$ .

Промывные воды — фильтрат — собирают в один сосуд и, перемешав, берут две пробы по 100 см<sup>3</sup>. Пробы выпаривают, высушивают и взвешивают, после чего вычисляют среднее значение веса водорастворимых солей во всем объеме фильтрата, а затем определяют чистый вес пробы грунта, идущего в анализ. Для этого вычитают из веса воздушно-сухой пробы вес гигроскопической воды и вес водорастворимых солей. Чистый вес пробы служит для дальнейших расчетов.

5. Грунт смывают с фильтра дистиллированной водой в коническую колбу, на которой имеется отметка, показывающая объем 200 см<sup>3</sup>. Долив колбу водой до этой отметки, добавляют в нее 0,5 см<sup>3</sup> аммиака и ставят суспензию кипятиться в течение часа, предварительно закупорив колбу пробкой с обратным холодильником.

6. Если грунт не содержит водорастворимых солей, то отмыка водой не производится. В этом случае взятая навеска заливается в чашке 100 см<sup>3</sup> дистиллированной воды и остается на размачивание в течение суток. После размачивания разминают пальцем комочки грунта, а затем производят кипячение, как было сказано в п. 5.

7. После кипячения суспензию пропускают сквозь сито 0,25 мм. Глинистые комочки-агрегаты разрушают пальцем на стенке сита. Зерна песка, оставшиеся на сите, промывают, собирают, переносят в тигель, сушат и взвешивают.

8. Прошедшую сквозь сито 0,25 мм суспензию сливают в глубокую фарфоровую чашку, дают отстояться около минуты, после чего сливают неосевшую муть в литровый стеклянный цилиндр (диаметром около 6 см), а осадок растирают резиновым пестиком. Налив в чашку дистиллированной воды, взмучивают содержимое палочкой и, дав вновь отстояться, сливают муть в тот же цилиндр. Повторяют эту операцию до тех пор, пока в чашке останется лишь чистый песок, а литровый цилиндр окажется наполненным суспензией почти до полной своей емкости.

9. Дополнив цилиндр водой до общего объема 1 л, перебалтывают суспензию до полного уничтожения осадка на дне, и приступают к анализу.

Третья схема (агрегатный анализ). По этой схеме грунт не подвергается ни механическому распылению, ни химической

обработке. Подготовка к анализу в этом случае состоит только в размачивании естественных комков грунта в воде.

## Задание 1. Гранулометрический анализ на ситах

Гранулометрический анализ на ситах производится при помощи набора сит с штампованными отверстиями диаметром 10, 5, 2, 1 и 0,5 мм (см. фиг. 6). Имеются также сита и с другими размерами отверстий.

Разделение на ситах применимо только для крупнозернистых частей грунта; предельная величина зерен, которые можно отсеивать — 0,1 мм.

### Подготовка образца и производство анализа

1. Довести грунт до воздушно-сухого состояния. Для этого грунт рассыпать на листе бумаги, растереть все крупные комки и структурные агрегаты резиновым пестиком и оставить грунт на бумаге на 1—2 суток.

2. Взять среднюю навеску. Для этого высушенный на воздухе образец тщательно перемешать, затем шпателем или ложкой распределить по листу бумаги тонким слоем в несколько миллиметров и разделить на квадратики со сторонами 3,5—4,0 см. Из каждого квадратика взять ложкой небольшую часть грунта, в таком количестве, чтобы из всех квадратиков собрать навеску примерно в 200 см<sup>3</sup> (можно брать целые квадратики в шахматном порядке) для грунтов, не содержащих частиц крупнее 2 мм: не менее 600 см<sup>3</sup> для грунтов, содержащих частицы крупнее 2 мм в количестве до 10%; около 2000 см<sup>3</sup> — при содержании гравия от 10 до 30% и не менее 3000 см<sup>3</sup> при содержании гравия больше 30%.

3. Отобранный пробу взвесить с точностью до 0,01 г и пропустить через всю колонку сит, вложенных одно в другое до полного разделения грунта. Просеивание следует осуществлять с помощью горизонтального встряхивания, производимого легкими боковыми ударами ладони руки.

4. Содержимое каждого сита взвесить на технических весах и выразить в процентах к общей навеске.

5. Для контроля сложить веса отдельных фракций и сравнить полученное значение с первоначальным весом пущенного в анализ образца. Расхождение до 1% считается нормальным. Довольно большое расхождение показывает, что допущена какая-то ошибка или грубая потеря частиц образца, и анализ в этом случае должен быть повторен.

Допустимое расхождение в параллельных анализах  $\pm 1\%$  (абсолютный) для каждой фракции, если ее содержание менее 10%, и  $\pm 3\%$ , если ее содержание более 10%.

6. Данные анализа занести в таблицу по ниже помещаемой форме (табл. 1).

**Пример расчета.** Анализу подвергнута навеска грунта в 500 г. При отделении на ситах получено:

Фракции $> 10$ м.м.	5 г, что составляет	$\frac{5 \cdot 100}{500} = 1\%$
10—5 "	20 "	$\frac{20 \cdot 100}{500} = 4\%$
5—2 "	25 "	$\frac{25 \cdot 100}{500} = 5\%$
2—1 "	50 "	$\frac{50 \cdot 100}{500} = 10\%$
" 1—0,5 "	105 "	$\frac{105 \cdot 100}{500} = 21\%$
" 0,5 "	295 "	$\frac{295 \cdot 100}{500} = 59\%$
<hr/>		
Итого . . 100%		

Таблица 1

**Форма для записи данных ситового анализа**  
**Вес анализируемого образца 500 г**

Диаметр фракций, м.м.	$> 10$	10—5	5—2	2—1	1—0,5	$< 0,5$
Вес тары (стекло или фарфоровая чашечка), г . .	30,10	30,63	31,00	30,57	81,75	80,50
Вес тары с фракциями, г . .	35,10	50,63	56,00	80,57	186,75	375,50
Вес фракций, г . . . . .	5,00	20,00	25,00	50,00	105,00	295,00
Содержание фракций, % . . . . .	1,0	4,00	5,00	10,0	21,0	59,0

Необходимая аппаратура: набор стандартных сит, технические весы, разновес, фарфоровые чашечки или часовые стекла  $d = 8-10$  см.

**Задание 2. Гранулометрический анализ методом отмучивания**

**A. Метод двойного отмучивания по Сабанину**

Гранулометрический анализ методом двойного отмучивания по Сабанину основан на принципе разделения грунта на фракции по скорости падения частиц, взвешенных в спокойной жидкости.

По исследованиям Сабанина скорости падения частиц принятых им диаметров будут следующие (табл. 2).

По методу Сабанина обычно на практике производят анализ песчаных и супесчаных грунтов с небольшим содержанием частиц менее 0,01 мм, которое определяется суммарно.

Таблица 2

Диаметр, м.м	Скорость по Сабанину, см/сек	Скорость по Стоксу при $\gamma =$ $= 2,65$ и $t^{\circ} = 17^{\circ}$ С., см/сек
0,05	0,2 (1 см за 5 сек.)	0,2067
0,01	0,02 (1 см за 50 сек.)	0,0082
0,005	0,0046 (1 см за 36 мин.)	0,0021
0,001	0,00012 (1 см за 2 ч. 24 мин.)	0,00008

Гранулометрический анализ по этому методу производится на специальном приборе.

Прибор Сабанина (фиг. 1) состоит из двух градуированных стаканов — большого 1 с делениями по высоте от 12 см и ниже и малого с делениями от 6 см и ниже, сифона с зажимом 4, штатива с уравнительным столиком 2, банок для сливаания 9, уровня 3, сита 0,25 мм 5, песочных часов 8, фарфоровых чашек 7 и 6, стеклянной палочки с резиновым наконечником 10.

### а) Установка прибора

1. Поставить на площадку
2. На уравнительный столик и привести его в горизонтальное положение при помощи уровня и уравнительных винтов.
2. На уравнительный столик поставить маленький стаканчик, наполненный дистиллированной водой до деления 2.

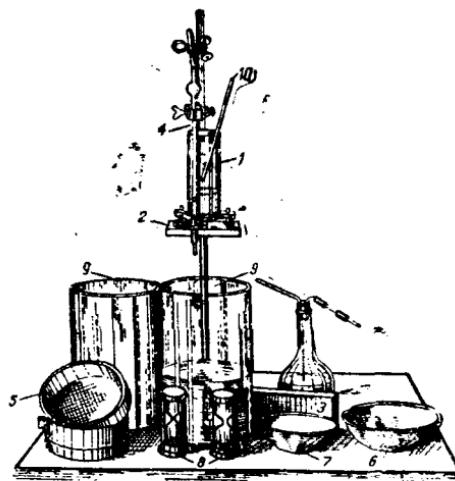
3. Заполнить сифон водой и установить нижний конец его в стакане на уровне 2 см от дна стакана.

4. Весь прибор должен быть установлен так, чтобы деление 2 малого стаканчика находилось на уровне глаз.

### б) Подготовка образца

1. Поместить анализируемый грунт в фарфоровую ступицу и растереть резиновым пестиком для разрушения структурных комочек.

2. Растертый грунт высушить до воздушно-сухого состояния и просеять через сито 0,5 мм.



Фиг. 1. Аппаратура для производства гранулометрического анализа по Сабанину

3. Из воздушного-сухого грунта, пропущенного через сито 0,5 мм, взять вышеописанным способом две средние навески по 5—6 г. Одна навеска помещается в бюкс для определения содержания гигроскопической влаги.

Все взвешивания вести на аналитических весах, применяя точность взвешивания до 0,0002 г.

4. Анализируемую навеску перенести в колбу Эрленмейера, облить десятикратным, по отношению к навеске, количеством дестиллированной воды и прибавить 1 см<sup>3</sup> крепкого аммиака<sup>1</sup>.

5. Колбочку закрыть пробкой, в которую вставлена стеклянная трубка длиной 20—15 см, обвернутая мокрой фильтровальной бумагой (можно также применить обратный холодильник)<sup>2</sup>.

6. Колбочку поставить на асBESTовую сетку и кипятить ровно один час<sup>3</sup>, считая с того момента, когда вода закипит.

7. После кипячения колбу остудить и перенести содержимое ее на сито 0,25 мм, предварительно смоченное и поставленное в большую фарфоровую чашку (емкостью около 0,5 л). Перенесенный на сито грунт облить таким количеством дестиллированной воды, чтобы уровень ее был выше дна сита. Грунт на сите под водой осторожно растереть пальцем, приподнимая из воды сито и вновь опуская его.

Эту операцию следует производить до тех пор, пока из сита не будет вытекать чистая вода.

Для контроля сито перенести в другую фарфоровую чашку, где грунт подвергнуть снова промыванию.

Собравшиеся во второй фарфоровой чашке отдельные частицы присоединить к массе, находящейся в первой фарфоровой чашке.

8. Собрать оставшиеся на сите фракции 0,50—0,25 мм в предварительно взвешенную фарфоровую чашечку, слить после отстаивания избыток воды и поставить сушить на водянную баню.

9. Высушить до абсолютно-сухого состояния и взвесить. Результат взвешивания выразить в процентах к общей навеске.

### в) Определение содержания фракций < 0,01 мм

10. Суспензию, прошедшую через сито 0,25 мм и собранную в большую фарфоровую чашку, взмутить резиновой лопаточкой и через 20 сек. слить верхний слой жидкости (без осадка) по стеклянной палочке в другую чашку объемом около 200 см.

<sup>1</sup> Глинистый грунт должен быть предварительно подвергнут размачиванию в течение суток.

<sup>2</sup> Нижний конец трубы должен находиться наравне с нижней поверхностью пробки. При этом положении трубы вода, конденсирующаяся из пара, будет стекать струйками по стенкам колбочки и смыывать приставшие частицы грунта. Конденсация необходима для сохранения соотношения между грунтом и водой.

<sup>3</sup> Жидкость в колбочке сначала должна кипеть умеренно, а когда она перестанет пениться, пламя дать сильнее; при этом, однако, нельзя допускать, чтобы жидкость разбрзгивалась по стенкам.

Жидкость в малой фарфоровой чашке взмутить и через 50 сек. долить ею (без осадка) маленький стаканчик до деления 4.

11. Сусpenзию, налитую в маленький стаканчик, взмутить резиновой лопаточкой и оставить в покое ровно на 100 сек.

Через 100 сек.<sup>1</sup> жидкость слить сифоном<sup>2</sup> до высоты 2 см в большую стеклянную банку.

12. Взмучивание жидкости в фарфоровых чашках необходимо производить всякий раз в малой за 50 сек. до слияния в стаканчик, а в большой за 20 сек. до переливания в малую.

При этом слияние следует производить по стеклянной палочке, чтобы избежать разливания жидкости и потери частиц.

13. Через каждые 6—8 сливаний следует находящиеся в чашках частицы растирать пальцем в течение 2—5 мин. в зависимости от содержания глины. То же самое рекомендуется проделывать с частицами в стаканчике, для чего их необходимо переводить в малую фарфоровую чашку, а затем продолжать отмучивание.

14. Отмучивание в чашках продолжается до тех пор, пока частицы не станут быстро садиться на дно и вода над осадком соответственно через 20 и 50 сек. после взмучивания не станет совершенно прозрачной, а в стаканчике до тех пор, пока через 100 сек. после взмучивания в верхнем столбе жидкости высотой в 2 см не будет содержаться взвешенных частиц.

15. Для проверки полноты отмучивания содержимое чашек и малого стаканчика перевести в большой стакан, долить его дистиллированной водой до деления 12, сифон установить против деления 6 и взмутить. Если по прошествии 300 сек. столб воды между делениями 12 и 6 будет прозрачным, отделение фракций меньше 0,01 мм можно считать законченным. В противном случае жидкость слить до деления 6, стаканчик вновь наполнить до деления 12 и повторять операцию слияния до полного осветления воды.

## 2) Определение содержания фракций 0,05—0,01 мм

16. Банку, содержащую фракции < 0,01 мм, составить<sup>3</sup> и вместо нее под сливной конец сифона подставить другую (3—5 л). Долить большой стакан дистиллированной водой, взмутить и по истечении 30 сек.<sup>4</sup> слить столб жидкости до отметки 6 см во вновь поставленную банку.

<sup>1</sup> К этому моменту, согласно табл. 2, во взвешенном состоянии в столбе воды между делениями 2—4 останутся только частицы < 0,01 мм, которые и будут слиты.

<sup>2</sup> В целях уменьшения всасывающей силы сифона необходимо, чтобы сливавшее колено сифона превышало всасывающее не более чем на 1—2 мм, а с каучуком не более чем на 3 см.

<sup>3</sup> Сусpenзию с фракциями < 0,01 мм сохранить для дальнейшего разделения по Робинзонсу.

<sup>4</sup> За этот срок, согласно табл. 2, все частицы > 0,05 мм успеют пройти верхний столб воды высотой 6 см, а в нем останутся только частицы < 0,05 мм, которые и перейдут при слиянии в банку.

17. Указанную операцию необходимо повторять до тех пор, пока верхний столб жидкости (в 6 см) через 30 сек. после взмучивания не станет прозрачным.

18. Частицы 0,05—0,01 мм, собранные в большой банке, после отстаивания и слива воды сифоном перенести в бюкс, отстоять в нем, а затем слить избыток воды, высушить осадок при 105°С до постоянного веса, взвесить и выразить в процентах к общей навеске.

19. По окончании отмучивания избыток воды из стаканчика слить, содержащуюся в нем фракцию 0,25—0,05 мм перенести сначала в фарфоровую чашечку, дать в ней отстояться, а затем, слив избыток воды, перенести во взвешенный предварительно бюкс, высушить до постоянного веса, взвесить и выразить результат в процентах к общей навеске.

20. Содержание частиц < 0,01 мм определить по разности и выразить также в процентах.

Предварительно во все расчеты ввести поправку на гигроскопическую воду.

21. Данные анализа занести в таблицу по ниже помещаемой форме (табл. 3).

Пример вычисления результатов гранулометрического анализа по Сабанину. Для анализа частиц по Сабанину взята навеска 5,1 г, содержащая 2% гигроскопической воды. В пересчете на абсолютно-сухой грунт навеска равна

$$5,1 - \frac{5,1 \cdot 2}{100} = 5,0 \text{ г.}$$

При анализе найдено:

фракций > 0,5 мм	0,2 г, что составляет	$\frac{0,2 \cdot 100}{5} = 4\%$
" 0,50—0,25 мм	1,3 " "	$\frac{1,3 \cdot 100}{5} = 26\%$
" 0,25—0,05 "	0,5 " "	$\frac{0,5 \cdot 100}{5} = 10\%$
" 0,05—0,01 "	1,0 " "	$\frac{1,0 \cdot 100}{5} = 20\%$

Содержание фракций < 0,01 мм получаем по разности:

$$5 - (0,2 + 1,3 + 0,5 + 1,0) = 2,0 \text{ г}$$
$$100 - (4 + 26 + 10 + 20) = 40\%.$$

Необходимая аппаратура: прибор Сабанина; сушильный шкаф, водяная или песочная баня, аналитические весы с разновесом, обратный холодильник, бюксы, фарфоровая ступка с пестиком.

#### Б. Метод отмучивания с расчетом скоростей по формуле Стокса

В последнее время в практике инженерно-геологических работ метод Сабанина подвергся некоторой переработке и упрощению.

**Форма для записи данных гранулометрического анализа  
по Сабанину**

Диаметр фракций, м.м.	> 0,5	0,5—0,25	0,25—0,05	0,05—0,01	Сумма фракций > 0,01	< 0,01
Вес тары, г . . . .	15,700	20,100	17,000	—	—	—
Вес тары с фрак- циями, г . . . .	15,900	20,700	18,300	—	—	—
Вес фракций, г . . .	0,200	0,600	1,300	1,00	3,000	2,000
Содержание фрак- ций, " . . . .	4	12	10	20	60	40

В соответствии с решением Совещания по исследованию грунтов 1940 г. в описываемом ниже варианте способа отмучивания подсчет времени произведен по формуле Стокса (приложение II, формула 1), принятой совещанием за основную для расчета скоростей осаждения частиц грунта (см. выше табл. 2).

Отмучивание производится в плоскодонном стакане диаметром 6,8 см и высотой 10 см. На стакан нанесены деления 2, 4, 6 и 8, показывающие высоту (в см) от дна. Стакан помещается на штативе прибора Сабанина. Сифон для слияния применяется равноколенный с внутренним диаметром не менее 8 мм; высота сифона 12 мм.

Подготовка грунта производится согласно пп. 1—9 приведенного выше описания метода Сабанина.

*a) Определение содержания фракций < 0,01 м.м.*

1. Сусpenзию, пропущенную через сито 0,25 мм, слить в стакан для отмучивания, наполнив его до деления 8.

2. Взмутить содержимое стакана, дать ему отстояться некоторое время и слить при помощи сифона мутную жидкость до деления 2.

Отстаивание и слияние вести, придерживаясь следующих условий (расчет времени произведен при  $\gamma = 2,65$  и  $t^o = 17^o$ ):

Высота сливае- мого слоя, см	Длительность отстаивания	Количество сливаний
6	12 м. 6 с.	4
4	8 " 4 "	4
2	4 " 2 "	До конца отмучивания

3. Сделав первое слияние, долить стакан оставшейся сусpenзией; в случае отсутствия таковой доливание стакана до деления 8 следует производить дистиллированной водой.

Необходимо периодически растирать осадок в стакане пальцем с надетым на него резиновым наконечником.

4. Отмучивание производить до тех пор, пока после отстаивания слой жидкости между делениями 8 и 2 не будет содержать взвешенных грунтовых частиц.

### б) Определение содержания фракций 0,05—0,01 мм

5. После этого банку с частицами  $<0,01$  мм убрать, под сливной конец сифона поставить новую банку и произвести по предыдущему отмучивание, применяя время отстаивания, подсчитанное для частиц 0,05 мм.

Высота сливающегося слоя, см	Длительность отстаивания	Количество сливаний
6	29 сек.	4
4	19 :	4
2	10 :	До конца отмучивания

6. По окончании отмучивания в стакане будут содержаться частицы 0,25—0,05 мм, а в слитой в банку жидкости — частицы 0,05—0,01 мм.

Разделенный осадок высушить, взвесить и произвести расчет содержания фракций в процентах аналогично расчету анализа по Сабанину (см. выше).

7. Приведенное выше время отстаивания рассчитано для частиц с удельным весом  $\gamma = 2,65$ , падающих в воде при температуре 17° С. При других температурах воды и удельном весе грунта длительность отстаивания следует пересчитывать по формуле Стокса.

Существенным недостатком описанного выше метода отмучивания является большая затрата времени на один анализ.

Производительность работы значительно увеличивается при применении прибора Орлова, позволяющего одновременно вести от 10 до 20 анализов [2].

## Задание 3. Гранулометрический анализ по Робинзону

Гранулометрический анализ по способу Робинзона основан на том же принципе различной скорости падения частиц в воде, который положен в основу описанного метода отмучивания.

От метода Сабанина способ Робинзона отличается тем, что вместо многократных взмучиваний и сливаний взмучивание производится всего один раз, а затем, по истечении определенного времени отстаивания, при помощи пипетки берется на известной глубине пробы.

Предполагается, что в первый момент после взмучивания в каждом кубическом сантиметре суспензии будет находиться одинаковое количество частиц различной величины.

Через некоторое время  $T$ , благодаря различной скорости падения частиц разного размера, частицы распределяются неравномерно, причем до некоторой глубины  $h$  будут отсутствовать все частицы со скоростью больше чем  $\frac{h}{T}$ , так как они будут взвешены ниже отметки  $h$ .

Следовательно, если через первые  $T$  минут с глубины  $h$  при помощи пипетки взять пробу жидкости, то последняя будет заключать частицы, скорость падения которых меньше чем  $\frac{h}{T}$ .

Беря целый ряд таких проб через разные промежутки времени и принимая определенное соотношение между скоростью и диаметром фракций по формуле Стокса, можно определить содержание в анализируемом грунте частиц разных диаметров. Метод липетирования применяется или в комбинации с методом Сабанина или в качестве самостоятельного метода гранулометрического анализа глинистых грунтов.

Обычно по Робинзону разделяют частицы  $<0,01\text{ mm}$  с выделением следующих фракций:

0,01 — 0,005 mm  
0,005 — 0,001 .  
< 0,001 .

При расчетах применяется следующая зависимость скорости падения частиц от их диаметра:

$0,005 \text{ м.м} = 0,0046 \text{ см/сек}$

или 1 см пути проходят:

частицы 0,005 мк в 36 мин.  
" 0,001 " . 2 ч. 24 м.

Пипетирование производится с помощью прибора Робинсона. Главную часть прибора (фиг. 2) составляет пипетка 1 емкостью 25 см<sup>3</sup>, укрепленная в зажиме штатива 2, на котором нанесены миллиметровые деления. Зажим свободно может быть закреплен на любом делении. На штативе насажена муфта 3, служащая упором для зажима при опускании пипетки на ту или иную глубину. Верхний конец пипетки соединен с аспиратором 4 каучуковой трубкой, снабженной зажимом Мора 5. В каучуковую трубку по пути от пипетки к аспиратору включен стеклянный тройник. Два конца тройника включены в трубку, ведущую к аспиратору, а на третий надеты каучуковая трубка и зажим Мора 6. Аспиратор соединен с бутылью при помощи каучуковой трубки с зажимом 7.

#### **А. Первый вариант (комбинированный метод Сабанина-Робинсона)**

1. Жидкость, содержащую частицы  $<0,01\text{ mm}$ , отделенные по методу Сабанина, перелить в бутыль, замерив одновременно объем жидкости. Сосуд, в котором содержалась ранее жидкость

кость, сполоснуть дестиллированной водой с таким расчетом, чтобы собрать все частицы, оставшиеся на дне и стенках сосуда, и довести объем суспензии до 2 или 3 л<sup>1</sup>.

2. Бутыль закрыть хорошо пригнанной пробкой и сильно взболтать в течение 5 минут.

3. После этого часть жидкости перелить в цилиндр ёмкостью 1 л<sup>2</sup>.

4. Цилиндр поставить на штатив прибора и взмутить суспензию длинной лопatkой. Взмучивание производить быстро повторяющимися, в течение минуты, опусканием мешалки до дна и подниманием ее до поверхности жидкости, с одновременным вращением, не допуская при этом образования пузырей воздуха.

5. Через 6 часов с глубины 10 см (или через 18 часов с глубины 30 см) от поверхности жидкости в цилиндре взять пипеткой 1-ю пробу, содержащую частицы  $< 0,005 \text{ mm}$ .

Техника взятия пробы сводится к следующему.

Зажим с пипеткой устанавливается таким образом, чтобы отверстия пипетки касались уровня жидкости. Отмечается деление шкалы против нижней части зажима 2. Муфта 3 закрепляется на расстоянии 10 см от отмеченного деления. После этого производится разрежение в аспираторе, для чего открывается зажим Мора 7. Зажим с пипеткой опускается до муфты 3, и тотчас же открывается зажим Мора 5. Жидкость начнет поступать в пипетку. Наполнение пипетки следует производить в течение 30 сек., что может быть достигнуто соответствующим регулированием зажима. После наполнения пипетки до черты закрыть зажим Мора. Пипетку вынуть и с наружной стороны осторожно вытереть полотенцем.

6. Пробу перевести из пипетки во взвешенный сушильный стаканчик, выпарить и взвесить сухой остаток (вес «б» г). Взвешивание производить на аналитических весах с точностью до 0,1 г.

<sup>1</sup> Если при отделении частиц  $< 0,01 \text{ mm}$  по Сабанину набралось жидкости больше 3 л, то отделение фракций  $< 0,01 \text{ mm}$  комбинированным методом в таком объеме не производится. В этом случае следует взять новую навеску для отделения частиц  $< 0,01 \text{ mm}$ , по Робинзону.

<sup>2</sup> Обычно для контроля анализ производят параллельно в двух цилиндрах.

7. По прошествии 24 часов после вторичного взмучивания жидкости в цилиндре, аналогично вышеизложенному, взять 2-ю пробу, содержащую частицы  $<0,001 \text{ мм}$ .

8. Пробу перевести во взвешенный сушильный стаканчик, выпарить и взвесить сухой остаток (вес «в» г).

9. После взвешивания обоих сухих остатков произвести расчет по следующей форме:

Вес частиц  $<0,01 \text{ мм} — a$  (определен по разности после анализа по Сабанину).

Содержание частиц  $<0,01 \text{ мм}$  (в % к весу навески, взятой для анализа по Сабанину) —  $x$ .

Объем суспензии, содержащей частицы  $<0,01 \text{ мм} — V_1$ ,

Объем пипетки для взятия пробы —  $V_2$ .

Вес частиц  $<0,005 \text{ мм} — b$ .

Вес частиц  $<0,001 \text{ мм} — v$ .

Вес частиц  $<0,005 \text{ мм}$  в пересчете на весь объем суспензии

$$A = \frac{\delta \cdot V_1}{V_2} z,$$

что составляет  $\frac{A \cdot x}{a} = y\%$ .

Вес частиц  $<0,001 \text{ мм}$  в пересчете на объем  $V_1$

$$B = \frac{\delta \cdot V_1}{V_2} z,$$

что составляет  $\frac{B \cdot x}{a} = z\%$ .

Содержание фракций  $0,005 — 0,001 \text{ мм}$  равно  $y — z = u\%$ .

Содержание фракций  $0,01 — 0,005 \text{ мм}$  равно  $x — y = p\%$ .

10. Данные анализа занести в таблицу по ниже помещаемой форме (табл. 4).

#### Б. Второй вариант (метод Робинсона)

1. Взять среднюю пробу воздушно-сухого грунта в количестве 10 г для глин и 15 г для суглиновков.

2. Пробу грунта подготовить к анализу по второй из вышеуказанных схем. Слить суспензию в цилиндр емкостью 1 л.

3. Взмутить суспензию в цилиндре и по прошествии 8 м. 20 с. взять пипеткой 1-ю пробу, содержащую частицы  $<0,01 \text{ мм}$ . Продолжительность набора суспензии 15 сек.

4. Определение фракций  $<0,005$  и  $<0,001 \text{ мм}$  произвести описанным выше способом (см. первый вариант анализа).

Пример расчета. Объем суспензии, содержащей частицы  $<0,01 \text{ мм}$ , равнялся 2 л. Вес частиц  $<0,01 \text{ мм}$  равен 2 г, что составляет 40% к навеске, взятой для анализа по Сабанину (5 г).

При взятии пипеткой суспензии в объеме 25 см<sup>3</sup> вес частиц  $<0,005 \text{ мм}$  получился равным 0,02 г и частиц  $<0,001 \text{ мм} — 0,004 \text{ г}$ .

1. Содержание фракций  $< 0,005 \text{ мм}$  в пересчете на весь объем суспензии равно

$$\frac{0,02 \cdot 2000}{25} = 1,6 \text{ г},$$

что составляет

$$\frac{1,6 \cdot 40}{2} = 32\%,$$

2. Вес фракций  $< 0,001 \text{ мм}$  в пересчете на полный объем суспензии

$$\frac{0,004 \cdot 2000}{25} = 0,16 \text{ г},$$

или

$$\frac{0,16 \cdot 40}{2} = 3,2\%.$$

3. Содержание фракций  $0,005 - 0,001 \text{ мм}$  равно  $32,0 - 3,20 = 28,80\%$ .

4. Содержание фракций  $0,01 - 0,005 \text{ мм}$  равно  $40,0 - 32,0 = 8\%$ .

Таблица 1

Форма для записи данных гранулометрического анализа по Робинзону

Объем анализируемой суспензии (после анализа по Сабанину)  $V_1 = 2000 \text{ см}^3$ .  
Объем пипетки  $V_2 = 25 \text{ см}^3$ .

Содержание частиц  $< 0,01 \text{ мм}$  (в % к навеске, взятой для анализа по Сабанину)  $x = 40\%$ .

Диаметр фракций, <i>мм</i>	Данные анализа		Данные расчета			
	$< 0,005$	$< 0,001$	$< 0,005$	$< 0,001$	$0,005 - 0,001$	$0,01 - 0,005$
Вес бюкса, г . . . . .	17,5430	20,1250	—	—	—	—
Вес бюкса с фрак- циями, г . . . . .	17,5450	20,1290	—	—	—	—
Вес фракций, г . . . .	0,0020	0,0040	1,600	0,1600	—	—
Содержание фрак- ций, % . . . . .	—	—	32,0	3,20	28,8	8,0

Необходимая аппаратура: штатив, пипетка 20—25  $\text{cm}^3$ , аналитические весы, сушильный шкаф, бюксы, аспиратор.

#### В. Метод пипетирования с расчетом скоростей по формуле Стокса

Приведенный выше способ Сабанина-Робинсона основан на шкале скоростей Сабанина. При переходе к шкале скоростей по формуле Стокса порядок анализа несколько меняется.

В этом случае берутся пробы на содержание частиц  $< 0,002 \text{ мм}$  и  $< 0,001 \text{ мм}$ . Частицы 0,002  $\text{мм}$  по формуле Стокса

эквивалентны частицам 0,005 мм по Сабанину и являются верхней границей глинистых частиц по классификации Охотина [20].

Время взятия проб от начала отстаивания определяется каждый раз отдельно в зависимости от удельного веса частиц и температуры воды. Удельный вес грунта определяется предварительно. Температура же воды измеряется в процессе анализа в специальном цилиндре, помещенном рядом с цилиндром, в котором производится анализ. Для контроля каждый раз после взятия пробы измеряется непосредственно температура суспензии.

При  $\gamma = 2,65$  и  $t^\circ = 17^\circ$  пробы берутся:

для частиц  $< 0,002$  через 1 ч. 19 м. 2 с. от начала отстаивания  
" "  $< 0,001$  " 34 " 43 " 2 " " "

Для других значений  $\gamma$  и  $t^\circ$  время отстаивания определяется по номограмме Казагранде (см. фиг. 4).

Ход анализа и расчета аналогичен описанному выше.

#### Задание 4. Гранулометрический анализ ареометрическим методом

Ареометрический метод основан на измерении удельного веса суспензии, изменяющегося по мере выпадения из нее более крупных частиц.

По закону Стокса, скорость осаждения частиц в жидкость может быть получена по формуле 1. Путем преобразования этого уравнения мы можем получить следующую формулу для величин диаметра частиц породы (в мм):

$$d = \sqrt{AV},$$

где

$$A = \frac{1800 \cdot \eta}{(\gamma - \gamma_1) 981}; \quad V = \frac{H}{T};$$

$H$  — путь частиц (в см);

$T$  — время падения частиц;

$\eta$  — вязкость воды.

Формула эта легла в основу построения номограммы расчета диаметра частиц при ареометрическом методе (см. фиг. 4).

Употребляющийся для ареометрического метода прибор — ареометр — устроен по принципу Архимеда: всякое погруженное в жидкость тело теряет в своем весе столько, сколько весит вытесненная им жидкость.

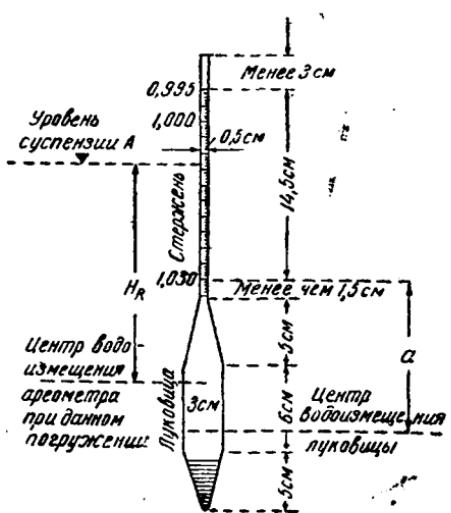
При постоянном объеме тела, погруженного в жидкость, тяжелой жидкости будет вытеснено меньшее количество, а более легкой жидкости — большее количество. Таким образом в легкую жидкость тело будет погружаться больше, в тяжелую — меньше. Следовательно, чем больше будет концентрация суспензии, тем больше будет ее удельный вес и, следовательно, ареометр будет погружаться в нее меньше и наоборот.

При отстаивании суспензии частицы грунта, подчиняясь силе тяжести, падают на дно сосуда и удельный вес суспензии постепенно уменьшается. Следовательно, ареометр будет погружаться в жидкость все глубже и глубже.

Ареометрический способ гранулометрического анализа принят Совещанием по исследованию грунтов 1940 г. в качестве основного метода гранулометрического анализа грунтов в строительных целях.

#### А. Описание ареометра

Ареометр (фиг. 3) представляет собой запаянную стеклянную трубку с расширенным нижним концом.



Фиг. 3. Схема ареометра.

Обычно ареометр имеет следующие размеры: длина стержня 14—16 см, диаметр 0,5 см; длина луковицы 15—17 см, диаметр 3 см. Такие ареометры рассчитаны для измерения удельного веса от 0,995 до 1,030.

#### Б. Тарировка ареометра

Так как сделать все ареометры совершенно идентичными невозможно, то одному и тому же отсчету по разным ареометрам будет соответствовать различное расстояние от поверхности жидкости до центра водоизмещения ареометра (см. фиг. 3).

Поэтому правая сторона шкалы № 4 номограммы для расчета результатов ареометрического анализа — шкала  $R$  (фиг. 4) — наносится в лаборатории для каждого ареометра отдельно.

Для нанесения шкалы  $R$  для каждого отсчета по ареометру (для каждого тысячного деления) подсчитывается соответствую-

В нижнем конце ареометра — луковице — находится груз (дробь, залитая сургучом или мастикой) для того, чтобы опущенный в жидкость ареометр не падал набок, а плавал в вертикальном положении. Верхняя, более узкая часть ареометра, называется стержнем. В него вставлена шкала с нанесенными на ней различными значениями удельного веса.

Отмечая по этой шкале глубину погружения ареометра, мы определяем тем самым удельный вес жидкости.

Деления на стержне ареометра нанесены с точностью до 0,001, а отсчеты берутся на глаз с точностью до 0,0002.

щее ему значение по формуле.

$$H_R = \frac{N-M}{N} l + (a-b),$$

где  $H_R$  — расстояние от данного деления шкалы ареометра до центра его водоизмещения (в см), или путь, проходимый частицами от поверхности суспензии до центра водоизмещения ареометра, при погружении его в суспензию, имеющую удельный вес, отвечающий данному делению шкалы (величина переменная, своя для каждого показания ареометра);

$N$  — число тысячных делений на шкале ареометра от нижнего деления, т. е. от 1,030, до деления 1,000 (величина постоянная для данного ареометра);

$M$  — число тысячных делений на шкале ареометра от деления 1,000 до поверхности суспензии (величина переменная, зависящая от погружения ареометра);  $M$  всегда равно  $R$ ;

$l$  — длина шкалы ареометра (в см) от нижнего деления шкалы ареометра, т. е. от 1,030, до деления 1,000 (величина постоянная для данного ареометра);

$a$  — расстояние (в см) от нижнего деления ареометра, т. е. от 1,030, до центра водоизмещения луковицы ареометра (величина постоянная для данного ареометра);

$b$  — высота поднятия воды в цилиндре (в см) при погружении ареометра до центра водоизмещения луковицы;

$$b = \frac{V_0}{2F},$$

где  $V_0$  — объем луковицы ареометра до нижнего деления на шкале ареометра, т. е. до 1,030;

$F$  — площадь сечения цилиндра, в котором производится анализ (диаметр должен быть 6 см с точностью до  $\pm 1$  мм).

В формуле для определения  $H_R$  выражение  $(a-b)$  является постоянным для данного ареометра, и при расчете изменяется лишь выражение  $\frac{N-M}{N} l$  благодаря тому, что мы даем различные значения для  $M$ . Последнее выражение необходимо рассчитывать с точностью до 0,001.

Определение величины  $H_R$  производится следующим образом.

Определение  $V_0$ . В мерный цилиндр емкостью 1000 см<sup>3</sup> и диаметром 6 см ( $\pm 1$  мм), градуированный с точностью до 10 см<sup>3</sup>, налить от 900 до 920 см<sup>3</sup> (отсчитывая по нижнему краю мениска цилиндра) дестиллированной воды, имеющей температуру 20° С. Погрузить ареометр до деления 1,030 (по верхнему

краю мениска) и записать увеличение объема, отвечающее подъему уровня воды в цилиндре (по нижнему краю мениска цилиндра), при ареометре, погруженном до деления 1,030. Это увеличение есть объем луковицы ареометра  $V_0$  (в см<sup>3</sup>).

Пример. Количество воды в цилиндре без ареометра равно 900 см<sup>3</sup>, количество воды в цилиндре с погруженным в нее ареометром равно 967 см<sup>3</sup>. Таким образом

$$V_0 = 967 - 900 = 67 \text{ см}^3.$$

Определение а. Получив объем луковицы, вычислить его половину и вновь опустить ареометр в цилиндр, но уже не до 1,030, а до подъема уровня воды в цилиндре, отвечающего увеличению объема воды на величину половины объема луковицы  $\frac{V_0}{2}$ , т. е. при погружении ее до центра водоизмещения.

Не вынимая ареометра и строго сохраняя его погружение до половины его объема, замерить измерительной линейкой расстояние от поверхности воды до нижнего деления на шкале ареометра, т. е. до 1,030.

Измеренное расстояние есть величина а (в см).

$$\text{Пример. } V_0 = 67 \text{ см}^3; \quad \frac{V_0}{2} = 33,5 \text{ см}^3;$$

$$900 + 33,5 = 933,5 \text{ см}^3;$$

Погружаем ареометр так, чтобы вода поднялась до 933,5 см<sup>3</sup>, и от этого уровня замеряем линейкой расстояние до 1,030 на шкале ареометра; пусть оно равно 10,5 см, т. е.  $a = 10,5$  см.

Определение I. Измерить миллиметровой линейкой на шкале ареометра расстояние между делениями 1,030 и 1,000. Это расстояние является искомой величиной I (в см).

Определение б. Измерить линейкой при погружении ареометра высоту поднятия воды в цилиндре или подсчитать по формуле

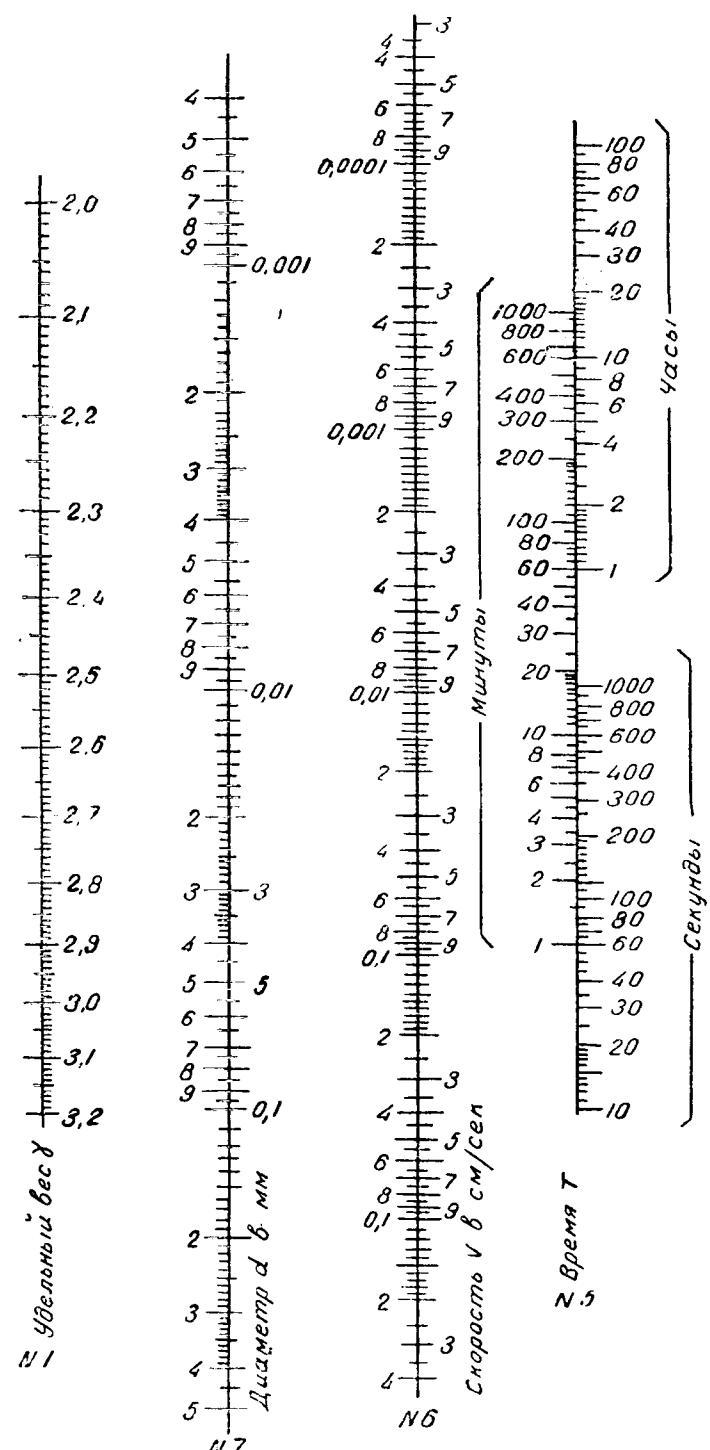
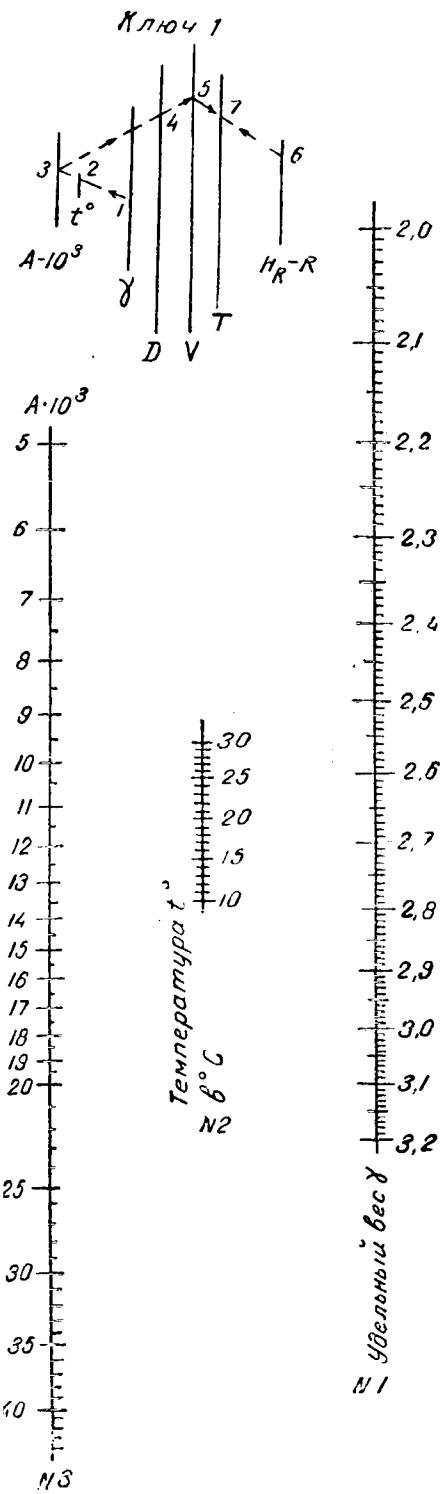
$$b = \frac{V_0}{2F},$$

где  $F$  получается подсчетом по формуле

$$F = \frac{\pi d^2}{4},$$

где  $d$  — внутренний диаметр цилиндра, в котором производится анализ и тарировка (в см).

Определение М.  $M$  — число переменное, соответствующее количеству тысячных делений на шкале ареометра, находящихся над уровнем супензии, до деления 1,000 в зависимости от погружения ареометра.  $M$  всегда равно  $R$ .

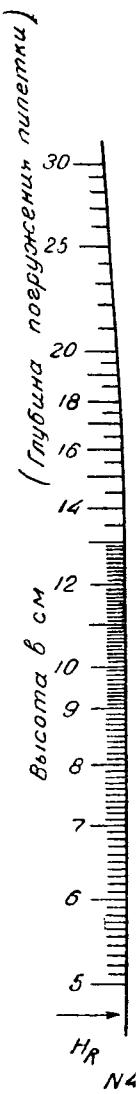


Закон Стокса

$$D = \sqrt{VA}$$

$$A = \frac{1800\pi}{\gamma - \gamma_1} 981$$

$$V = \frac{H}{T}$$



Фиг. 4. Номограмма Казагранде для вычисления диаметра частиц при гранулометрическом анализе грунта ареометрическим методом определения длительности отстаивания суспензии при пипеточном анализе.

Ключ 1—к пользованию номограммой для определения длительности отстаивания суспензии при производстве пипеточного анализа.  
Ключ 2—к пользованию номограммой для определения диаметра частиц при ареометрическом анализе.

Пример.	Если ареометр показывает	1,000, то	$M = 0 = R$
"	"	"	$1,001, " M = 1 = R$
"	"	"	$1,002, " M = 2 = R$
"	"	"	$1,005, " M = 5 = R$
"	"	"	$1,008, " M = 8 = R$
"	"	"	$1,021, " M = 21 = R$
"	"	"	$1,030, " M = 30 = R$

Для расчета необходимо взять значения  $M$  для каждого тысячного деления всей шкалы ареометра от 1,000 до 1,030, подставить их в формулу для расчета  $H_R$  и произвести вычисления для каждого возможного отсчета от 1,000 до 1,030, или величины путей, проходимых частицами при любом погружении ареометра.

Число  $N$  — постоянное и для ареометров с нижними делениями и 1,030 оно равно 30.

Все данные наблюдений и расчетов свести в следующую таблицу (табл. 5).

Таблица 5

Данные тарировки ареометра

$V_0$ , см <sup>3</sup>	$a$ , см	$t$ , см	$b$ , см	$F$ , см <sup>2</sup>	$2F$ , см <sup>2</sup>	$M$	$R$	$H_R$									
66	10,5	10,35	1,168	28,26	56,52	30	30	9,332	22	22	12,092	15	15	14,507	7	7	17,267
						29	29	9,677	21	21	12,437	14	14	14,852	6	6	17,612
$H_R = \frac{N - M}{N} \cdot t + (a - b)$						28	28	10,022	20	20	12,782	13	13	15,197	5	5	17,957
						27	27	10,367	19	19	13,127	12	12	15,542	4	4	18,302
Например:						26	26	10,712	18	18	13,472	11	11	15,887	3	3	18,647
$H_R = \frac{30 - 30}{30} \cdot 10,35 + (10,5 - 1,168) = 9,332$						25	25	11,057	17	17	13,817	10	10	16,232	2	2	18,992
						24	24	11,402	16	16	14,162	9	9	16,577	1	1	19,337
						23	23	11,747				8	8	16,922	0	0	19,682

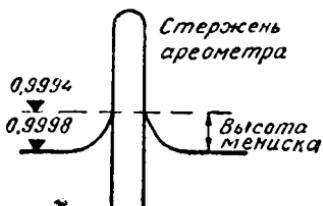
Таким образом получаются значения  $R$  и соответствующие им  $H_R$ . Для составления шкалы № 4 номограммы необходимо нанести на прямую с правой стороны значения  $R$  против соответствующих им значений  $H_R$ , нанесенных с левой стороны прямой. В результате получаем рабочую номограмму для данного ареометра (см. фиг. 4).

В. Производство отсчетов по ареометру и описание номограммы

Упрощенный отсчет. Для удобства работы с ареометром следует брать упрощенный отсчет, отбрасывая единицу и перенося запятую на три знака вправо. Тысячные деления будут представлять собой в этом случае целые числа, а десятичные, которые берутся на глаз, — десятые.

Например, вместо отсчета 1,0252 следует записать 25,2. Это условное выражение отсчета обозначается как  $R_0$  и называется упрощенным отсчетом.

Поправка на высоту мениска С. Ареометры градируются на заводе по нижнему краю мениска. Но так как сuspензия непрозрачна, то отсчеты во время анализа приходится брать по верхнему краю мениска, что уменьшает показание ареометра на высоту мениска.



Фиг. 5. Мениски в ареометре.

Разница между отсчетами по верхнему и нижнему краям мениска определяется один раз для каждого ареометра заранее погружением его в чистую дистиллированную воду при температуре градуировки ареометра, т. е. при 20° С. Полученная величина мениска является постоянной для данного ареометра; для удобства пересчетов она умножается на 1000 и прибавляется к каждому показанию ареометра.

Пример. Отсчет по нижнему краю мениска 0,9998, отсчет по верхнему краю 0,9994 (фиг. 5). Отсюда высота мениска, т. е. искомая поправка, будет равна:

$$0,9998 - 0,9994 = 0,0004; \quad 0,0004 \times 1000 = 0,4.$$

Следовательно, поправка на высоту мениска в данном случае будет равна  $C = 0,4$ .

Поправка на температуру  $t$ . Если температура супензии при анализе больше или меньше температуры градуировки ареометра, т. е. 20° С, то в показание ареометра вводится поправка на температуру, определяемая по следующей таблице (табл. 6).

Описание номограммы. Расчет диаметра частиц почвы производится по номограмме (см. фиг. 4).

При работе для каждого экземпляра ареометра должен быть свой отдельный экземпляр номограммы, так как общая номограмма для всех ареометров дополняется, как мы говорили, шкалой  $R$ , величины которой различны для каждого экземпляра ареометра.

На номограмме дается зависимость следующих величин, входящих в преобразованную формулу Стокса.

Шкала № 1 ( $\gamma$ ) — удельный вес грунта.

„ № 2 ( $t^\circ$ ) — температура супензии, при которой производится анализ (в °C).

„ № 3 ( $A \cdot 10^3$ ) — множитель  $A$  в подкоренном выражении в формуле  $d = \sqrt{AV}$ , умноженный на 10<sup>3</sup>;

„ № 7 ( $d$ ) — диаметр частиц грунта (в мм).

„ № 6 ( $V$ ) — скорость падения частиц в жидкости (в см/сек).

- „ № 5 (*T*) — время отсчета по ареометру в секундах, минутах и часах, прошедших от начала опыта, т. е. от момента постановки цилиндра на стол (после взбалтывания).
- „ № 4 (*R*) — окончательное выражение отсчета по ареометру при всех возможных погружениях его, иначе говоря, шкала данного ареометра от 1,000 до 1,030, нанесенная на правую сторону шкалы № 4.

Таблица 6

Температурные поправки к ареометру

Температура супспензии, °C	Поправка к отсчету по ареометру, <i>m</i>	Температура супспензии, °C	Поправка к отсчету по ареометру, <i>m</i>
10,0	-1,2	20,0	0,0
10,5	-1,2	20,5	+0,1
11,0	-1,2	21,0	+0,2
11,5	-1,1	21,5	+0,3
12,0	-1,1	22,0	+0,4
12,5	-1,0	22,5	+0,5
13,0	-1,0	23,0	+0,6
13,5	-0,9	23,5	+0,7
14,0	-0,9	24,0	+0,8
14,5	-0,8	24,5	+0,9
15,0	-0,8	25,0	+1,0
15,5	-0,7	25,5	+1,1
16,0	-0,6	26,0	+1,3
16,5	-0,6	26,5	+1,4
17,0	-0,5	27,0	+1,5
17,5	-0,4	27,5	+1,6
18,0	-0,3	28,0	+1,8
18,5	-0,3	28,5	+1,9
19,0	-0,2	29,0	+2,1
19,5	-0,1	29,5	+2,2
		30,0	+2,3

Нанесенные на шкале № 4 слева величины  $H_R$  нужны только для тарировки ареометра и при дальнейшей работе не учитываются.

Г. Ход анализа

*a) Подготовка образца и анализ на ситах*

- Растереть анализируемый грунт в фарфоровой ступке пестиком с резиновым наконечником, пропустить через сито 0,5 мм и определить удельный вес.
- Взвесить на технических весах 100—200 г воздушно-сухого

грунта. Навески пропустить через набор сит с отверстиями: 10; 5; 2; 1 и 0,5 мм<sup>1</sup>.

3. Оставшиеся на ситах и прошедшие через сито 0,5 мм частицы взвесить на технических весах и вычислить содержание фракций в процентах к весу всего образца.

4. Частицы, прошедшие через сито 0,5 мм, хорошо перемешать и взять среднюю пробу в количестве: 40 г для супесчаных грунтов, 30 г для суглинков и 20 г для глин. Взвешивание производить на технических весах.

5. Взятую навеску перенести в колбу Эрленмейера емкостью 750—1000 см<sup>3</sup> и долить десятикратным, по отношению к весу навески, количеством дистиллированной воды.

Залитый водой грунт выдержать в колбе до следующего дня (для глинистых грунтов).

6. На следующий день в колбу прибавить 1 см<sup>3</sup> 25%-ного аммиака. Колбу закрыть каучуковой пробкой с обратным холодильником и кипятить в течение часа.

7. После кипячения остывшее содержимое колбы пропустить через сито 0,25 мм и произвести растирание уцелевших агрегатов пальцем или мягким резиновым пестиком.

8. Фракции, задержавшиеся на сите, перенести с помощью промывки в заранее взвешенный бюкс, высушить на баке, взвесить на технических весах и результаты записать в журнал.

### б) Анализ ареометром

9. Содержимое колбы, прошедшее через сито 0,25 мм, перенести в литровый цилиндр с внутренним диаметром 6 см.

10. Цилиндр с перенесенной в него суспензией долить до 1000 см дистиллированной водой, закрыть ладонью руки (или пробкой), взболтать, опрокидывая цилиндр 20—30 раз и больше, если на дне остается невзмученный грунт, до полного, равномерного перемешивания его с водой.

11. После этого поставить цилиндр на стол, заметить время и через 20 сек. осторожно опустить в суспензию ареометр, дав ему возможность свободно плавать (не касаясь стенок цилиндра).

12. Через 30 сек. после начала опыта (момента постановки цилиндра на стол), т. е. через 10 сек. после опускания ареометра, взять первый отсчет по ареометру, считая по верхнему краю мениска, и записать его в графу 4 журнала.

13. Второй отсчет по ареометру взять через 1 мин., третий через 2 мин., четвертый через 3 мин. и пятый через 5 мин. (время во всех случаях считается с момента постановки цилиндра на стол).

<sup>1</sup> Если в образце нет крупных частиц, то просеивание через сито > 1 мм можно не производить.

14. После пятого отсчета ареометр осторожно вынуть, сполоснуть дистиллированной водой, насухо вытереть чистым полотенцем и поставить на штатив.

15. Последующие замеры производить: через 10, 15, 30, 60, 120, 150 мин.; 3, 6, 10, 24 часа и т. д. в зависимости от искомого диаметра частиц.

При этом каждый раз за 5 сек. до очередного замера ареометр осторожно опустить в цилиндр немного глубже предыдущего показания и дать ему свободно плавать.

16. После того как будет вынут ареометр, в цилиндр осторожно опустить термометр для определения температуры суспензии.

Замеры температуры необходимо производить один раз в течение первых 15 мин. и далее после каждого замера ареометром.

17. Показания ареометра и термометра занести в журнал (см. табл. 7).

## Д. Вычисление диаметра частиц $d$ и процентного содержания фракций

### a) Вычисление диаметра $d$

1. Определить максимальный размер  $d$  зерен суспензии, не опустившихся через 30 мин. на глубину, соответствующую показанию ареометра. Для этого наложить линейку на шкалу № 1 ( $\gamma$ ) в точке, соответствующей удельному весу породы, и на шкалу № 2 ( $t^\circ$ ) в точке, показывающей температуру опыта. Точку пересечения со шкалой № 3 ( $A \cdot 10^3$ ) заметить.

2. Из соответствующей графы журнала наблюдений взять окончательное значение  $R$  и найти эту точку на шкале  $R$  номограммы (правая сторона шкалы № 4). Наложить на нее линейку так, чтобы линейка проходила через точку, соответствующую времени отсчета на шкале № 5 ( $T$ ), и пересекала шкалу № 6 ( $V$ ).

Точка пересечения шкалы  $V$  дает нам величину скорости падения частиц (в см/сек).

3. Прикладывая линейку к найденной точке шкалы  $V$  так, чтобы она проходила и через ранее найденную нами точку на шкале № 3 ( $A \cdot 10^3$ ), прочитать на шкале № 7 искомый диаметр частиц для данного замера ареометром.

Подобным же образом получить  $d$  частиц для всех других замеров.

### б) Вычисление процентного содержания фракций

1. Произвести вычисление процентного содержания суммы частиц грунта с диаметром, отвечающим данному замеру, вместе с более мелкими частицами (графа 9 журнала) по следующим формулам:

$$x\% = n \cdot R,$$

где  $R$  — показание ареометра со всеми поправками;

$$n = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{100}{G},$$

где  $\gamma$  — удельный вес грунта,

$G$  — навеска (в г), взятая для анализа фракций  $< 0,5$  мм.

2. Принимая за 100 вес всей навески, взятой для анализа фракций  $< 0,5$  мм, определить содержание фракций  $< 0,25$  мм путем вычитания содержания фракций, задержавшихся на сите 0,25 мм.

Содержание фракций от 0,25 мм до диаметра, полученного первым отсчетом по ареометру, вычислить по разности.

3. Если в породе содержатся фракции крупнее 0,5 мм, то расчет процентов ведут по отношению к весу всей навески, взятой на весь ситовой и ареометрический анализ. Тогда при расчете количества фракций данного диаметра и меньше, полученного ареометрическим анализом, в выражении

$$n = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{100}{G}$$

вместо 100 следует подставить количество частиц породы, прошедших через сите 0,5 мм (в %).

Результаты всех вычислений занести в журнал (табл. 7).

По полученным данным построить кривую гранулометрического состава в полулогарифмическом масштабе и вычислить процентное содержание фракций в пределах следующих диаметров (в мм):

$> 2$	0,25 — 0,05
2—1	0,05 — 0,01
1—0,5	0,01 — 0,005
0,50—0,25	0,005—0,001
$< 0,001$	

Пример вычисления диаметра  $d$ .

Имеем:  $\gamma = 2,63$ ;  $t^o = 17^o$  С; время, прошедшее от начала анализа  $T = 2$  часа; показание ареометра со всеми поправками  $R = 2,1$ .

Сначала определяем максимальный размер  $d$  зерен суспензии, не опустившихся еще за время  $T = 2$  часа на глубину, соответствующую показанию ареометра  $R = 2,1$ . Для этого на номограмме накладываем линейку на точку 2,63 шкалы № 1 ( $\gamma$ ) так, чтобы линейка проходила через точку 17 на шкале № 2 ( $t^o$ ) до пересечения со шкалой № 3 ( $A \cdot 10^3$ ), которую она пересечет в точке 12,3. Таким образом получим значение  $A \cdot 10^3 = 12,3$ .

Из графы 7 журнала берем окончательное значение  $R = 2,1$  и находим эту точку на шкале  $R$  номограммы (правая сторона шкалы № 4). Накладываем линейку на точку 2,1 так, чтобы линейка проходила через точку, соответствующую 2 час. на шкале № 5 ( $T$ ), и пересекала шкалу № 6 ( $V$ ). Точка пересечения шкалы  $V$  дает нам величину скорости падения частиц

Таблица 7

## Журнал ареометрического анализа

Ареометр № 10304. Поправка на мениск  $C = 0,4$ . Способ подготовки: кипячение 1 час со стабилизатором. Стабилизатор  $\text{NH}_4\text{OH}$ . Концентрация 25%. Количество стабилизатора 1  $\text{cm}^3$ . Объем цилиндра 1000  $\text{cm}^3$ . Удельный вес породы  $\gamma = 2,63$ . Навеска 40 г.

Диаметр фракций, мм	10	10—5	5—2	2—1	1—0,5	0,5—0,25	0,25	Примечание
Общий вес, г . . . . .	—	—	—	—	—	31,00	76,42	
Вес тары . . . . .	—	—	—	—	—	30,44	36,98	
Вес фракций, % . . . . .	—	—	—	—	—	0,56	39,44	
					—	1,40	98,60	

дата	Ареометрический анализ								Результаты	
	время	продолжительность от начала осаждения	упрощенный показатель ареометра	температура суспензии	$C$	$R_1 + m$	диаметр частиц, мм	содержание частиц $\leq d$ , %	фракции	содержание, %
		$T_1$	$R_0$	$t$	$R_1$	$R$	$d$	$x$	диаметр фракций, мм	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
24/III—35 г.	11 ч. 40 м.								> 10	—
	11 . 40 . 30 сек.	30 сек.	24,5	16	24,9	24,3	0,070	97,8	10—5	—
	11 . 41 .	1 мин.	23,7	16	24,1	23,5	0,051	94,6	5—2	—
	11 . 42 "	2 .	22,5	16	22,9	22,3	0,37	89,8	2—1	—
	11 . 45 "	5 .	19,6	16	20,0	19,4	0,024	78,1	1—0,5	—
	11 . 56 "	15 .	11,6	16	12,0	11,4	0,015	45,9	0,5—0,25	1,40
	12 . 10 "	30 .	6,8	17	7,2	6,7	0,011	27,0	0,25—0,05	4,10
	12 . 40 .	1 час	3,6	17	4,0	3,5	0,0081	14,1	0,05—0,01	73,50
	13 . 40 .	2 .	2,2	17	2,6	2,1	0,0056	8,5	0,01—0,005	13,50
	16 . 40 .	5 .	1,2	18	1,6	1,3	0,0035	5,2	0,005—0,001	5,00
25 27/II—35 г.	9 . 50 .	22 .	0,8	15	1,2	0,4	0,0017	1,6	< 0,001	2,5

(в см/сек). В нашем примере она будет равна 0,0026 см/сек. Таким способом мы получим  $V$  для формулы

$$d = \sqrt{A} \cdot V.$$

Прикладывая линейку к этой точке  $V$  так, чтобы она проходила и через ранее найденную нами точку 12,3 на шкале № 3 ( $A \cdot 10^3$ ), мы на пересечении со шкалой № 7 ( $d$ ) получаем искомый диаметр частиц для данного замера ареометра и заносим его в графу 8 журнала. В нашем примере  $d = 0,0056$  мм. Подобным же образом находим  $d$  частиц и для других замеров.

Пример вычисления процентного содержания фракций.

1. Имеем:  $\gamma = 2,63$ ; величина навески  $G = 40$  г;  $R = 2,1$ .

$$x = \frac{2,63}{2,63 - 1} \cdot \frac{100}{40} R = 4,025 R = 4,025 \cdot 2,1 = 8,5\%.$$

Подобным же образом производятся вычисления процентного содержания фракций других диаметров.

2. Имеем:  $\gamma = 2,63$ ; общая навеска для всего ситового анализа 50 г. Содержание частиц:

$$\begin{aligned} > 0,5 \text{ мм} &= 10 \text{ г} - 20\%; \\ > 0,5 \text{ } " &= 40 \text{ } " - 80\%. \end{aligned}$$

Из них для анализа взято 40 г. Тогда для  $R = 2,1$  получим

$$x = \frac{2,63}{2,63 - 1} \cdot \frac{80}{40} \cdot 2,1 = 6,76\%.$$

### Необходимое оборудование

1. Ареометр.
2. Цилиндр мерный на 100 см<sup>3</sup>, высотой 45 см, диаметром 6 см, с делениями до 10 см<sup>3</sup> (желательно без носика).
3. Технические весы с разновесами.
4. Бюксы.
5. Песочная баня.
6. Фарфоровые чашки.
7. Набор сит с отверстиями: 10; 5; 2; 1; 0,5 мм и сито 0,25 мм.
8. Фарфоровая ступка и пестик с резиновым наконечником.
9. Линейка на 20 см с миллиметровыми делениями.
10. Термометр с точностью 0,5° С.
11. Пикнометр для определения удельного веса.
12. Обратный холодильник.
13. Промывалка.
14. Эрленмайеровская колба.
15. Пробки каучуковые.
16. Мерный цилиндр или мензурка на 5 см.
17. Номограмма для определения диаметра частиц.
18. Таблица температурных поправок.
19. 25%-ный аммиак.

## Задание 5. Полевой метод гранулометрического анализа по Рутковскому

Метод Рутковского благодаря своей простоте и общедоступности пользования получил широкое распространение в грунтоведческой практике для производства массовых полевых определений гранулометрического состава грунтов.

В основу метода положены: 1) способность глинистых фракций набухать в воде и 2) различная скорость падения частиц в воде в зависимости от их размера.

Зависимость между объемом анализируемого грунта и величиной набухания выражается следующей эмпирической формулой:

$$x = 22,7 \cdot V_0,$$

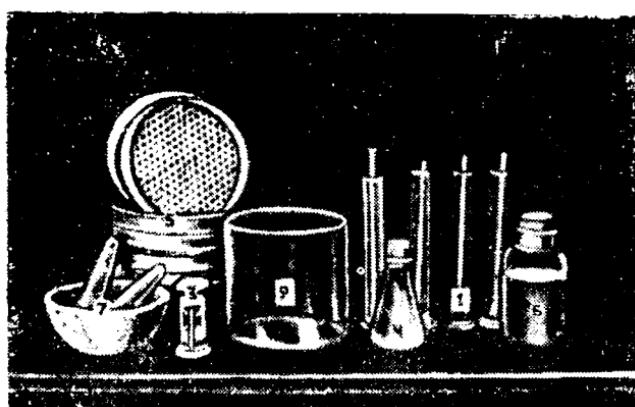
где  $x$  — содержание глины (в %);

$V_0$  — прирост объема на 1 см<sup>3</sup> первоначально взятого объема грунта.

С помощью метода Рутковского можно выделить три основные группы фракций: глинистую, песчаную и пылеватую.

Методу Рутковского свойственны следующие недостатки:

1. Допущение наличия прямой пропорциональной зависимости между величиной набухания и содержанием глинистых ча-



Фиг. 6. Аппаратура для определения гранулометрического состава грунтополевым способом.

1—мензурки на 100 см<sup>3</sup>; 2—батарейный стакан; 3—песочные часы; 4—раствор CaCl<sub>2</sub>; 5—набор сит; 6—грунт; 7—стука.

стиц в грунте. Эта зависимость в действительности значительно сложнее в связи с тем, что объем набухшего в воде грунта определяется не только количеством глинистых частиц, но также их составом и химическим составом воды.

2. Неточность отсчетов вследствие применения мензурки с грубой градуировкой.

**A. Определение содержания глинистых частиц (< 0,005 мм)**

1. Взять анализируемый грунт в воздушно-сухом состоянии, осторожно растереть резиновым пестиком в порошок и просеять через сито с диаметром отверстий 1 мм.

2. Подготовленный грунт всыпать в мензурку (емкостью 100 см<sup>3</sup> и высотой 20—25 см) в таком количестве, чтобы после уплотнения о каучуковую подушку в мензурке получился постоянный обмен грунта  $V_0 = 5$  см<sup>3</sup>.

Таблица 8

Таблица зависимости набухания грунта от количества глинистых частиц

Прирост на 1 см	Содержание глины, %	Прирост на 1 см	Содержание глины, %	Прирост на 1 см	Содержание глины, %
4,00	90,70	2,70	61,21	1,40	31,74
3,95	89,55	2,65	60,07	1,35	30,61
3,90	88,42	2,60	58,94	1,30	29,48
3,85	87,29	2,55	57,81	1,25	28,34
3,80	86,16	2,50	56,68	1,20	27,70
3,75	85,03	2,45	55,54	1,15	26,07
3,70	83,88	2,40	54,41	1,10	24,93
3,65	82,75	2,35	53,28	1,05	23,80
3,60	81,62	2,30	52,14	1,0	22,67
3,55	80,49	2,25	51,07	0,95	21,52
3,50	79,36	2,20	49,88	0,90	20,41
3,45	78,23	2,15	48,74	0,85	19,26
3,40	77,09	2,10	47,61	0,80	18,13
3,35	75,95	2,05	46,48	0,75	17,00
3,30	74,81	2,00	45,34	0,70	15,86
3,25	73,67	1,95	44,20	0,65	14,73
3,20	72,54	1,90	43,07	0,60	13,60
3,15	71,40	1,85	41,94	0,55	12,46
3,10	70,27	1,80	40,80	0,50	11,32
3,05	69,14	1,75	39,68	0,45	10,19
3,00	68,01	1,70	38,53	0,40	9,06
2,95	66,88	1,65	37,39	0,35	7,93
2,90	65,75	1,60	36,26	0,30	6,79
2,85	64,62	1,55	35,13	0,25	5,66
2,80	63,49	1,50	34,00	0,20	4,53
2,75	62,35	1,45	32,87	0,15	3,40
				0,12	2,72

3. Разрыхлить грунт в мензурке, после чего долить 50—60 см<sup>3</sup> воды и размешать стеклянной палочкой с резиновым наконечником. Размешивание производить до тех пор, пока на стенках мензурки при растирании грунта не исчезнут мазки глины.

4. Прибавить к полученной суспензии 2,5—3 см<sup>3</sup> раствора хлористого кальция (концентрации 5,5 г CaCl<sub>2</sub> на 100 см<sup>3</sup> воды) в ка-

честве коагулятора. Размешать суспензию, добавить воды до 100 см<sup>3</sup> и оставить отстаиваться на 24—48 часов (и больше, если суспензия в указанные сроки не отстоится).

5. Через указанный промежуток времени определить объем набухшего грунта  $V$  и вычислить полученный прирост объема на  $1 \text{ см}^3$  первоначального объема по формуле

$$K_v = \frac{V - V_0}{V_0}.$$

Обычно следует вести два параллельных анализа одного и того же грунта и при расчете брать среднее из двух определений; если расхождение более 5%, анализ повторяется.

Пользуясь специальной таблицей (табл. 8), показывающей эмпирически установленную зависимость набухания грунта от количества содержащихся в нем глинистых частиц, определить содержание в грунте глинистых частиц в % к весу взятой навески).

### **Б. Определение содержания песчаных частиц (1—0,05 м.м.)**

1. Подобно тому как это делалось при определении глинистых фракций, всыпать в мензурку 10 см<sup>3</sup> подготовленного грунта (объем указан для уплотненного состояния грунта).

2. К разрыхленному в мензурке грунту долить воды до деления 100 см<sup>3</sup>, грунт тщательно размешать стеклянной палочкой и оставить отставаться на 90 сек. (из расчета, что частицы песка > 0,05 мм

Таблица 9

Форма для записи результатов анализа на синах с продлением его по методу Рутковского

Анализ на ситах	Анализ в мензурке по Рутковскому						Механический состав грунта (после пересечения), %						Примечание
	1 $\text{мкм}$	$2-1 \text{ мкм}$	$> 2 \text{ мкм}$	гравий и песок	песок	глина	пыль	гравий	песок	пыль	глина	$< 0,005 \text{ мкм}$	
10   50   40   4,3 $\text{см}^3$   43,00   10 $\text{м}^3$   1 $\text{см}^3$   22,67   34,33   10,00   50,00   17,20   13,73   9,07													

проходят 1 см пути в 5 сек.). По истечении указанного времени, наблюдаемого с помощью песчаных часов, слить суспензию в объеме 70—75 см<sup>3</sup> в стеклянную банку, при этом необходимо следить за тем, чтобы уже осевшие на дне частицы не поднимались и не оказались слитыми.

3. Оставшуюся суспензию снова долить водой до 100 см<sup>3</sup>, взмутить и слить через 90 сек. то же количество в ту же банку.

Отмучивание производить до тех пор, пока жидкость не станет почти прозрачной. После этого долить в мензурку воды до деления 30 см<sup>3</sup>, взмутить и вновь слить (но уже через 30 сек.) всю жидкость над осадком грунта. Это сливание продолжать до полного осветления жидкости.

4. После окончания отмучивания долить мензурку водой до 100 см<sup>3</sup>, дать отстояться песку и определить объем осевшего на даю мензурки песка.

5. Принимая, что каждый кубический сантиметр осевших частиц отвечает десяти весовым процентам грунта, вычислить количество песка помножением числа кубических сантиметров осадка на 10.

6. Результаты анализа занести в таблицу по ниже помещаемой форме (табл. 9).

#### В. Определение содержания пылеватых частиц (0,05—0,005 мм)

Зная процент содержания в грунте глинистых и песчаных частиц, легко определить содержание в грунте пылеватых частиц вычитанием из 100 суммы процентов глинистых и песчаных частиц.

Пример расчета. Для определения содержания глины было взято грунта 5 см<sup>3</sup>. После отстаивания объем набухшего грунта составил 10 см<sup>3</sup>. Следовательно, общий прирост составил 5 см<sup>3</sup>. На 1 см<sup>3</sup> приходится 1 см<sup>3</sup> прироста.

Из табл. 10 видно, что приросту в 1 см<sup>3</sup> соответствует содержание глины 22,67%.

Для определения содержания песка было взято грунта 10 см<sup>3</sup>. После отмучивания осталось 4,3 см<sup>3</sup>. Следовательно, песка в анализируемом грунте будет  $4,3 \times 10 = 43,00\%$ .

Содержание пыли будет равно:

$$100 - (22,67 + 43,00) = 34,33\%.$$

В тех случаях, когда грунт содержит частицы крупнее 1 мм, необходимо предварительно растертым грунтом взвесить, пропустить через сито 2 и 1 мм и определить содержание фракций более 2 мм и от 2 до 1 мм. После этого произвести по вышеизложенному анализ в мензурке, а полученные результаты пересчитать на всю навеску.

Допустим, что частиц  $> 2$  мм содержится 10%, частиц от 2 до 1 мм — 50%, следовательно, частиц  $< 1$  мм в грунте содержится 40%.

Для пересчета составляем следующие пропорции:

$$\text{для глины } 100 : 22,67 = 40 : x; \quad x = \frac{40 \cdot 22,67}{100} = 9,07\%;$$

$$\text{для пыли } 100 : 34,33 = 40 : x; \quad x = \frac{40 \cdot 34,33}{100} = 13,73\%;$$

$$\text{для песка } 100 : 43 = 40 : x; \quad x = \frac{40 \cdot 43}{100} = 17,20\%.$$

Окончательные результаты анализа будут:

Содержание гравия ( $> 2 \text{ мм}$ ) . . . . .	10,00%
крупного песка (2–1 $\text{мм}$ ) . . . . .	50,00 "
среднего и мелкого песка (1–0,05 $\text{мм}$ ) . . . . .	17,20 "
пыли (0,05–0,005) . . . . .	13,73 "
глины ( $< 0,005$ ) . . . . .	9,07 "
	100%

Необходимое оборудование: 2 цилиндрические мензурки с носиком для сливания емкостью 100  $\text{cm}^3$ , градуированные, с ценой деления 1  $\text{cm}^3$ ; стеклянная палочка с резиновым наконечником; раствор хлористого кальция крепостью 5,5 г на 100  $\text{cm}^3$  воды; набор металлических сит с минимальным диаметром отверстий 1  $\text{мм}$ ; технические весы с разновесом; квадратный кусок войлока, картона или резины.

### Задание 6. Способы изображения гранулометрического состава

Для графического изображения гранулометрического состава существует ряд способов, из которых наиболее употребительны: циклограммы, кривые гранулометрического состава и треугольники.

#### A. Способ циклограммы

Площадь круга, очерченного произвольным диаметром, разбивается на секторы с длинами дуг, пропорциональными процентному содержанию каждой фракции. Площади соответствующих секторов закрашиваются или штрихуются согласно условным знакам фракций.

По наружному обводу циклограммы пишутся цифры, соответствующие числу процентного содержания данной фракции (фиг. 7).

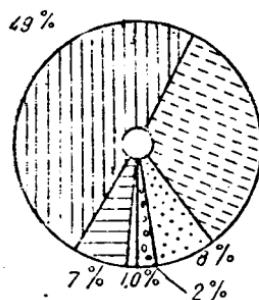
#### Б. Способ суммарной кривой гранулометрического состава

Способ суммарной кривой гранулометрического состава<sup>1</sup> имеет наибольшее и повсеместное распространение.

<sup>1</sup> Суммарной эта кривая называется потому, что каждая ее точка изображает сумму фракций меньше определенного диаметра.

Кривая гранулометрического состава может быть построена в обыкновенном и в полулогарифмическом масштабе.

Построение кривой гранулометрического состава в обыкновенном масштабе неудобно тем, что для изображения малых фракций приходится брать достаточно крупный масштаб, вследствие чего такие графики получаются растянутыми по оси абсцисс. Указанный недостаток исключается при построении кривой в полулогарифмическом масштабе.



Фиг.7. Циклограмма.

Пример расчета кривой, изображенной на фиг. 8, дан в табл. 10.

Построение кривых механического состава в полулогарифмическом масштабе, как было указано, удобно тем, что позволяет,

Таблица 10

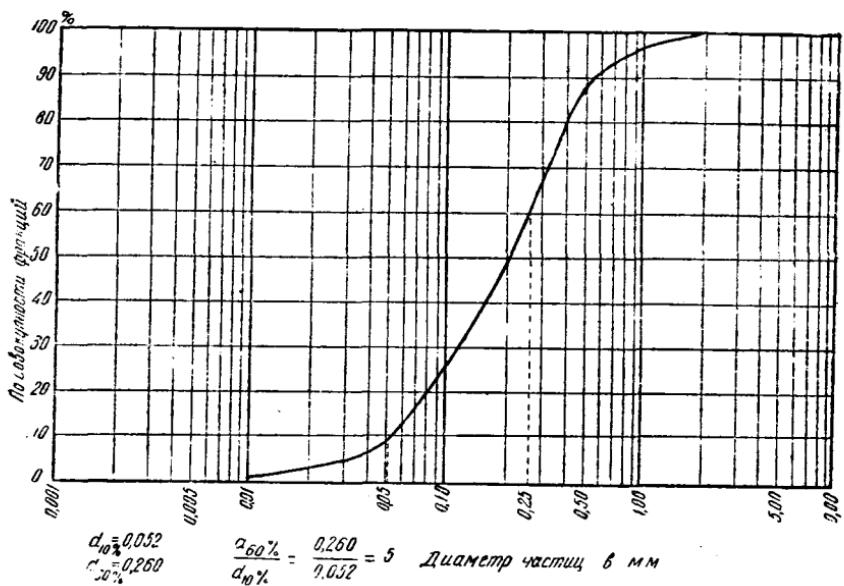
Диаметр частиц мм	Содержание отдельных фракций, %	Диаметр частиц по совокупности, мм	Суммарное содержание фракций, %
$< 0,01$	1,2	$< 0,01$	1,2
0,01—0,05	7,3	$\sqrt{0,05}$	8,5
0,05—0,25	48,5	$\sqrt[3]{0,25}$	57,0
0,25—0,5	32,4	$\sqrt[4]{0,5}$	89,4
0,5—1,0	8,2	$\sqrt[5]{1,0}$	97,6
1,0—2,0	2,4	$\sqrt[6]{2,0}$	100,0

<sup>1</sup> 1 микрон = 0,001 миллиметра.

не удлиняя кривую по оси абсцисс, наносить с достаточной степенью точности содержание мелких фракций.

Суммарные кривые механического состава дают возможность легко, графическим путем, находить действующий или эффективный диаметр ( $d_{ef}$ , или  $d_{10}$ ) и диаметр, меньше которого в грунте содержится 60% частиц ( $d_{60}$ ).

Действующим или эффективным диаметром называют тот размер частиц, меньше которого в породе содержится 10% частиц. Эта величина употребляется при подсчетах коэффициента фильтрации по данным гранулометрического состава (см. тему VI).



Фиг. 8. Кривая гранулометрического состава в полулогарифмическом масштабе.

Действующая величина зерен находится следующим образом: из точки на оси ординат, соответствующей 10%, проводят линию параллельно оси абсцисс до пересечения с кривой.

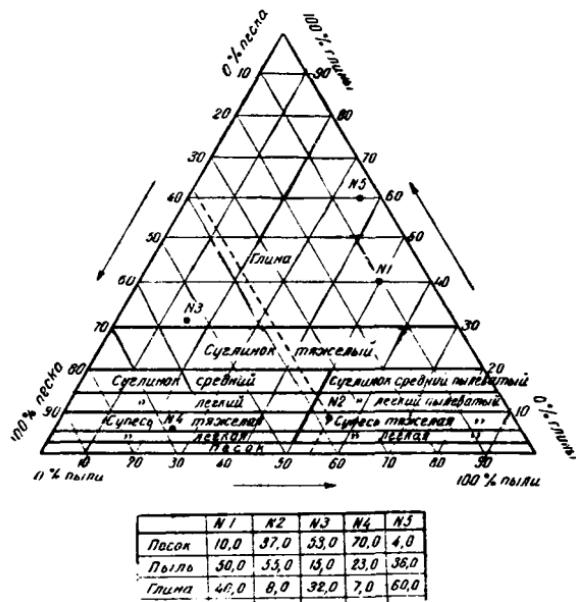
Из полученной на кривой точки опускают перпендикуляр на ось абсцисс. Размер частиц, отвечающий точке пересечения перпендикуляра с осью абсцисс, и будет действующим или эффективным диаметром зерен грунта, обозначаемым через  $d_{ef}$ , или  $d_{10}$ .

Производя аналогичное построение для точки на оси ординат, соответствующей 60%, мы получим размер частиц, меньше которого в породе содержится 60% частиц. Этую величину обозначают через  $d_{60}$ .

Отношение  $\frac{d_{60}}{d_{10}}$  называется коэффициентом неоднородности. Чем больше коэффициент неоднородности, тем

более разнородным по гранулометрическому составу является грунт.

На степень неоднородности грунта указывает и характер кривой механического состава. Крутая кривая указывает на однородность грунта, пологая кривая — на неоднородность грунта по механическому составу.



Фиг. 9. Треугольник Фере. В треугольнике изображена классификация Охотина (см. приложение III).

ное свойство равностороннего треугольника, известно, в том, что сумма перпендикуляров из какой-либо точки внутри треугольника на три стороны равна высоте треугольника. Это дает возможность изобразить состав грунта точкой, если разделить высоту треугольника (или, что то же самое, его стороны) на 100 частей и откладывать содержание в грунте глины, пыли и песка, выраженное в процентах от разных сторон треугольника. На фиг. 9 у сторон, соответствующих 0% и 100% глины, пыли и песка, сделаны соответствующие надписи.

Этот способ довольно груб, но зато дает возможность на один чертеж наносить очень большое число результатов гранулометрического анализа. Гранулометрический состав каждого грунта изображается при этом в виде точки. Кроме того, разбивая треугольник на части в соответствии с той или иной трехчленной классификацией, можно сразу, по положению точки внутри треугольника, определить наименование грунта по принятой классификации.

## В. Способ треугольника

При большом числе механических анализов для графического их изображения удобно пользоваться треугольником Фере (фиг. 9).

Этот способ позволяет изображать содержание не отдельных фракций, а лишь трех основных групп фракций — песчаной, пылеватой и глинистой.

В треугольнике Фере использовано основное свойство равностороннего треугольника, состоящее, как известно, в том, что сумма перпендикуляров из какой-либо точки внутри треугольника на три стороны равна высоте треугольника. Это дает возможность изобразить состав грунта точкой, если разделить высоту треугольника (или, что то же самое, его стороны) на 100 частей и откладывать содержание в грунте глины, пыли и песка, выраженное в процентах от разных сторон треугольника. На фиг. 9 у сторон, соответствующих 0% и 100% глины, пыли и песка, сделаны соответствующие надписи.

Этот способ довольно груб, но зато дает возможность на один чертеж наносить очень большое число результатов гранулометрического анализа. Гранулометрический состав каждого грунта изображается при этом в виде точки. Кроме того, разбивая треугольник на части в соответствии с той или иной трехчленной классификацией, можно сразу, по положению точки внутри треугольника, определить наименование грунта по принятой классификации.

## ТЕМА ВТОРАЯ

### УДЕЛЬНЫЙ И ОБЪЕМНЫЙ ВЕС И ПОРИСТОСТЬ

**Задание 7.** Удельный вес —  $\gamma = \frac{G_s}{V_s}$

Удельным весом грунта называется вес 1 см<sup>3</sup> скелета грунта, без пор, выраженный в граммах (или отношение веса абсолютно-сухого грунта к весу вытесненной частицами грунта воды).

#### A. Определение удельного веса песков и супесей

1. Взвесить хорошо высушенный пикнометр (вес  $q_1$ ).
2. Всыпать в пикнометр 10—20 г средней пробы грунта, измельченного в порошок и высушенного до постоянного веса.  
Для грунтов, содержащих частицы крупнее 2 мм, среднюю пробу следует брать следующим образом: произвести рассев грунта на сите 2 мм, обе части взвесить, крупные частицы механически раздробить, после чего из обеих частей взять средние пробы и смешать их в надлежащем весовом соотношении.
3. Всыпать сухой грунт в пикнометр и определить его вес вместе с грунтом ( $q_2$ ).
4. Влить в пикнометр на половину его объема дестиллированной воды и кипятить грунт с водой на водяной бане в течение 30 мин. (до прекращения выделения пузырьков воздуха).
5. Пикнометр остудить до постоянной температуры (комнатной), долить дестиллированной водой до мерной черты и взвесить (вес  $q_3$ ).
6. Содержимое пикнометра вылить, пикнометр тщательно промыть, налить до черты дестиллированной воды комнатной температуры и взвесить (вес  $q_4$ ).
7. На основании полученных данных произвести расчет удельного веса по формуле.

$$\gamma = \frac{\text{вес скелета грунта}}{\text{вес воды в объеме грунта}} = \frac{q_2 - q_1}{q_2 - q_1 + q_4 - q_3} \text{ г/см}^3.$$

8. Данные занести в таблицу по ниже помещаемой форме (табл. 11).

Таблица 11

## Форма для записи данных определения удельного веса

Вес пикнометра, г $q_1$	Вес пикнометра с грунтом, г $q_2$	Вес пикнометра с водой и грунтом, г $q_3$	Вес пикнометра с водой, г $q_4$	Удельный вес
31,103	41,105	136,650	130,700	$\gamma = \frac{q_2 - q_1}{q_2 - q_1 + q_4 - q_3}$ 2,49

Пример. Вес пикнометра  $q_1 = 31,103$ ; вес пикнометра с грунтом  $q_2 = 41,105$ ; вес пикнометра с водой и грунтом  $q_3 = 136,650$ ; вес пикнометра с водой  $q_4 = 130,700$ .

$$\gamma = \frac{41,105 - 31,103}{41,105 - 31,103 + 130,700 - 136,650} = 2,49.$$

## Необходимое оборудование

Необходимое оборудование: пикнометр, сушильный шкаф с термометром на  $200^{\circ}\text{C}$ , ступка с фарфоровым пестиком, сито 1 мм, водяная баня, аналитические весы с разновесом.

## Б. Определение удельного веса глин и суглиников

1. Из средней пробы размельченного грунта в воздушно-сухом состоянии взять навеску 10—20 г для определения удельного веса и около 5 г для определения гигроскопической влаги.

2. Взятую навеску перенести с помощью сухой воронки в пустой предварительно взвешенный пикнометр. Пикнометр с грунтом взвесить, налить в него  $\frac{1}{3}$  дистиллированной воды и кипятить на песчаной бане в течение часа.

3. Дальнейшие операции провести, как изложено выше для песков и супесей.

4. При расчете необходимо произвести пересчет на абсолютно-сухую навеску, используя для этого определение гигроскопической влаги в малой навеске.

При мечания: а) Все взвешивания ведутся на аналитических весах с точностью до 0,001 г.

б) Расхождения между параллельными определениями не должны быть более 0,02 г.

Удельный вес засоленных грунтов определять в воде не рекомендуется, так как при кипячении в воде происходит растворение соли и минерализация воды, т. е. уменьшение объема твердой фазы и увеличение удельного веса жидкой фазы; расчет величины удельного веса в этом случае приводит к значительно преувеличенным результатам.

Предупредить эту ошибку можно путем определения удельного веса в инертных жидкостях, не растворяющих соли (бен-

зол, толуол и т. д.); воздух можно удалять с помощью создания вакуума над поверхностью жидкости с грунтом.

Применение инертных жидкостей уменьшает также ошибку, происходящую за счет уплотненного слоя воды вокруг частиц грунта.

Описание способа определения удельного веса в заполярных жидкостях дано в учебнике Приклонского и Коломенского [9] и в работе Гуменского [4].

### Задание 8. Влажность грунтов $w$

Под влажностью грунта понимают содержание в нем того или иного количества воды.

Влажность грунта выражают в процентах или долях единицы по отношению к весу абсолютно-сухого грунта. Другие способы выражения влажности даны в приложении I.

Естественной влажностью грунта называют количество содержащейся в порах грунта воды в естественных условиях его залегания.

#### A. Определение влажности грунтов весовым способом

1. Взвесить бюкс с крышечкой (вес  $q_1$ ).
2. Взять пробу исследуемого грунта примерно в 10 г, поместить в бюкс и закрыть крышкой.
3. Бюкс с пробой взвесить на аналитических весах с точностью до 0,001 г ( $q_2$ ).
4. Бюкс с пробой поставить в сушильный шкаф и постепенно в течение 1—2 часов поднять температуру до 100—105° С. Выдержать образец в шкафу в течение 5—6 часов.
5. Поместить бюкс в эксикатор и дать остывать в течение часа.
6. Произвести взвешивание, а затем поместить бюкс с грунтом опять в нагретый до 100—105° С сушильный шкаф на 3 часа, после чего остудить в эксикаторе и взвесить.
7. Такую сушку пробы грунта производить последовательно, несколько раз, до приобретения ею постоянного веса ( $q_3$ ).

Таблица 12

#### Форма для записи данных определения влажности весовым способом

№ бюкса	Вес бюкса, г $q_1$	Вес бюкса с влажным грунтом, г $q_2$	Вес бюкса с грунтом после высыпывания, г $q_3$			Влажность грунта, % $w = \frac{q_2 - q_3}{q_3 - q_1} \cdot 100$
			I	II	III	
3	85,106	96,214	94,760	94,695	94,695	15,9

8. Вычислить весовую влажность по формуле

$$w = \frac{q_2 - q_3}{q_3 - q_1} \cdot 100\%.$$

9. Данные занести в таблицу по форме, приведенной в табл. 12.

Необходимое оборудование: бюксы с хорошо притертыми пробками, аналитические весы с разновесом, сушильный шкаф.

**Б. Определение влажности грунта пикнометрическим способом**

1. Поместить анализируемый грунт (10—15 г) в предварительно хорошо высушенный и взвешенный пикнометр (вес  $q_1$ ). (Взвешивание производить на технических весах).

2. Взвесить пикнометр с грунтом (вес  $q_2$ ).

3. В пикнометр с грунтом налить воды примерно на половину его объема и кипятить на водяной бане в течение 30 мин. для удаления из грунта воздуха (время считать с момента начала кипения воды).

4. Пикнометр с содержимым остудить, довести уровень жидкости до выградуированной черты и определить вес пикнометра с водой и грунтом (вес  $C$ ).

5. Содержимое пикнометра вылить, пикнометр тщательно промыть, налить чистой водой до черты и взвесить (вес  $A$ ).

6. Влажность образца вычислить по следующим данным:

Вес влажного грунта —  $B = q_2 - q_1$ .

„ пикнометра с чистой водой —  $A$ .

„ пикнометра с водой и грунтом —  $C$ .

„ воды в грунте —  $X$ .

„ сухого грунта —  $B - X$ .

Объем грунта, равный объему вытесненной воды, —  $Y$ .

Удельный вес грунта —  $\gamma$ .

Составляем два уравнения:

$$(A + B - X) - C = Y;$$

$$\frac{B - X}{\gamma} = Y.$$

Решая эти уравнения, найдем, что

$$X = \frac{\gamma \cdot A + B(\gamma - 1) - C\gamma}{\gamma - 1},$$

откуда  $w = \frac{X}{B - X} \cdot 100$  или

$$w = \frac{[\gamma \cdot A + B(\gamma - 1) - C\gamma]}{B[\gamma - 1] - [\gamma \cdot A + B(\gamma - 1) - C\gamma]} \cdot 100.$$

Пример.  $A = 150$  г;  $B = 30$  г;  $C = 160$  г;  $\gamma = 2,65$ .

$$w = \frac{[2,5 \cdot 150 + 30(2,5 - 1) - 160 \cdot 2,5]}{30[2,5 - 1] - [2,5 \cdot 150 + 30(2,5 - 1) - 160 \cdot 2,5]} \cdot 100 =$$

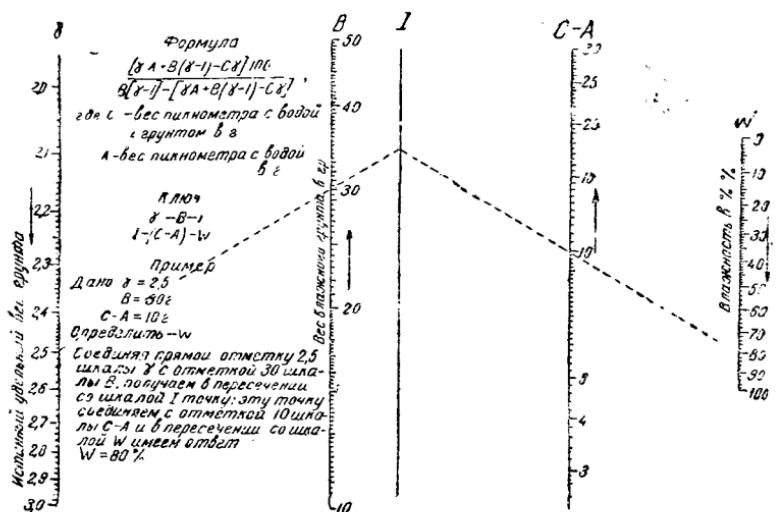
$$= \frac{375 + 45 - 400}{45 - (420 - 400)} \cdot 100 = 80\%.$$

**Форма для записи данных определения влажности пикнометрическим способом**

Вес пикнометра, г $q_1$	Вес пикнометра с грунтом, г $q_2$	Вес пикнометра с водой и грунтом, г $C$	Вес пикнометра с чистой водой, г $A$	Вес влажного грунта, г $B = q_2 - q_1$	Удельный вес грунта, г $\gamma$	Вес воды в грунте, г $x$	Влажность грунта, % $w$
31,120	61,120	160,0	150,0	30,0	2,65	13,33	80

Арифметические подсчеты могут быть исключены при использовании номограммой (фиг. 10).

Данные занести в таблицу по следующей форме (табл. 13).



Фиг. 10. Номограмма для вычисления влажности.

Необходимая аппаратура: пикнометр, аналитические весы и технические весы с разновесом, водяная баня, холодильник.

### Задание 9. Объемный вес

Под объемным весом грунта понимают вес единицы объема грунта вместе с порами, заполненными водой или воздухом.

Следует различать объемный вес влажного грунта  $\Delta$  и объемный вес твердой фазы грунта  $\delta$ .

Выражается объемный вес обычно в  $\text{г}/\text{см}^3$  или  $\text{т}/\text{м}^3$ .

## A. Объемный вес влажного грунта $\Delta = \frac{G}{V}$

Объемным весом влажного грунта называется вес единицы объема данного грунта при данной влажности и пористости.

Как видно из этого определения, величина объемного веса влажного грунта будет изменяться в зависимости от пористости и влажности грунта.

При отсутствии воды в порах объемный вес будет минимальным.

В случае полного насыщения образца водой объемный вес грунта при неизменной пористости будет максимальным.

Определение объемного веса влажного грунта производится несколькими способами.

### a) Определение объемного веса влажного грунта методом режущих колец

Метод режущих колец принят Совещанием по исследованию грунтов 1940 г. в качестве стандартного.

По этому методу применяют металлические кольца (обычно стальные), имеющие с внешней стороны скос в виде резца.

Объем кольца от 50 до 100 см<sup>3</sup> при высоте 3—4 см и толщине стенок не более 2 мм.

Ход определения следующий:

1. На выровненную площадку монолита грунта положить острым краем вниз кольцо, вес которого известен. Придерживая кольцо левой рукой, вырезать острым ножом столбик грунта, диаметром равный внешнему диаметру кольца.

Одновременно с этим понемногу следует нажимать на кольцо, заставляя грунт заходить в полость кольца. После заполнения грунтом всей полости столбик грунта подрезать снизу и отделить кольцо с грунтом от монолита. Избыток грунта, выступающий из кольца, срезать в уровень с краями кольца.

2. Наружную поверхность кольца тщательно очистить от приставшего грунта; кольцо вместе с грунтом взвесить.

3. Из кольца взять часть грунта и определить его влажность.

4. Объемный вес определить по формуле

$$\Delta = \frac{G_2 - G_1}{V},$$

где  $G_1$  — вес кольца (в г),

$G_2$  — вес кольца с грунтом (в г),

$V$  — объем образца (в см<sup>3</sup>),

причем

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \cdot h,$$

где  $h$  — высота кольца,

$d$  — диаметр кольца.

5. Данные занести в таблицу по следующей форме (табл. 14).

Таблица 14

**Форма для записи данных определения объемного веса влажного грунта методом режущих колец**

Высота кольца, см	Диаметр кольца, см	Вес кольца, г	Вес кольца с грунтом, г	Объем образца (объем полости кольца), см <sup>3</sup>	Объемный вес грунта, г/см <sup>3</sup>	Влажность грунта, %	Примечание
<i>h</i>	<i>d</i>	<i>G<sub>1</sub></i>	<i>G<sub>2</sub></i>	<i>V</i>	$\Delta = \frac{G_2 - G_1}{V}$	<i>w</i>	
4	6	127,30	355,48	113,04	2,00	36,9	

**б) Определение объемного веса влажного грунта методом парафинирования**

Метод парафинирования следует применять к грунтам, не поддающимся взятию в кольцо.

1. Образец грунта, взятый с ненарушенной структурой и сохранивший естественную влажность, обрезать ножом так, чтобы его поверхность приобрела по возможности округлые формы, а затем взвесить на технических весах (вес *B<sub>1</sub>*). Объем образца должен быть не менее 50 см<sup>3</sup>.

2. После взвешивания образец опустить на одну секунду в расплавленный (но не кипящий) парафин, а затем повторными погружениями нарастить на поверхности образца парафиновый слой толщиной 0,5—1 мм. При этом нужно все время следить, чтобы в парафине, а также между ним и грунтом не оставалось пузырьков воздуха. В случае появления пузырьков прокалывать их иглой.

3. Запарафинированный образец взвесить на технических весах (вес *B<sub>2</sub>*).

4. После взвешивания образец опустить в сосуд с постоянной чертой, показывающей его емкость в кубических сантиметрах (объем *V<sub>1</sub>*).

5. Налить из бюретки в этот сосуд воды до черты (объем *V<sub>2</sub>*). После этого вынуть образец, осушить его поверхность фильтровальной бумагой и произвести контрольное взвешивание.

6. Расчет объемного веса произвести по формуле

$$\Delta = \frac{0,9 B_1}{0,9 V_2 - (B_2 - B_1)} \text{ г/см}^3,$$

где  $V$  — объем запарафинированного образца,  
причем

$$V = V_1 - V_2;$$

0,9 — удельный вес парафина.

7. Определение объемного веса для каждого образца произвести 3 раза; при этом расхождение между параллельными результатами не должно быть более 0,02—0,03.

8. Параллельно с определением объемного веса необходимо определить влажность изучаемого монолитного образца.

9. Данные занести в таблицу по следующей форме (табл. 15).

Таблица 15

**Форма для записи данных определения объемного веса влажного грунта методом парафинирования**

Вес влажного образца до парафинирования, г	Вес образца с парафиновой оболочкой, г	Объем мерного стакана, см <sup>3</sup>	Объем воды, налитой в стакан с образцом, см <sup>3</sup>	Объем запарафинированного образца, см <sup>3</sup>	Объемный вес влажного образца, г/см <sup>3</sup>	Влажность образца, %	Примечание
$B_1$	$B_2$	$V_1$	$V_2$	$V = V_1 - V_2$	$\frac{0,9 B_1}{0,9 V - (B_2 - B_1)}$	$w$	
200	215	350	230	120	1,63	16,7	

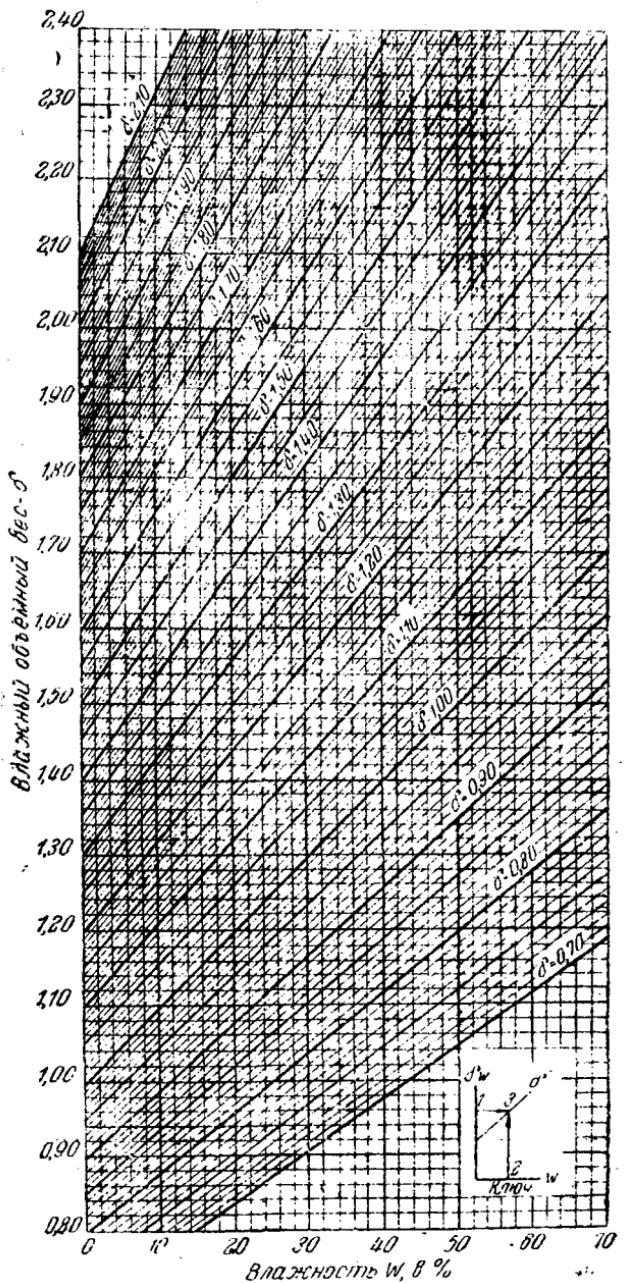
Необходимое оборудование и принадлежности: стальной нож, фарфоровая чашка на 0,5 л, мерный стакан на 100 см<sup>3</sup>, бюретка, технические весы с разновесом, сушильный шкаф с термометром, бюксы, чистый парафин.

Кроме методов парафинирования и режущих колец, объемный вес влажного грунта может быть определен методом лакировки, ртутным методом и волюменометрическим методом.

**Метод лакировки.** Взамен парафина образец покрывается слоем белого спиртового лака, а затем производятся операции, указанные выше для метода парафинирования. Если удастся покрыть образец очень тонким слоем лака, то объем его не учитывается.

**Ртутный метод.** Взвешенный кусок естественно влажного грунта любой формы опускается в ванну, наполненную ртутью. Вытесненная ртуть взвешивается, и производится расчет объемного веса по формуле

$$\Delta = \frac{G_1 \cdot \gamma_1}{G_2},$$



Фиг. 11, а — б. Помограммы Приклонского для определения объемного веса твердой фазы грунта  $\delta$  по влажному объемному весу  $\Delta$  и влажности  $w$ .

где  $G_1$  — вес влажного грунта (в г);

$G_2$  — вес вытесненной ртути (в г);

$\gamma_1$  — удельный вес ртути ( $\gamma_1 = 13,6$ ).

Подробное описание метода дано в работе Гуменского [4].

Вolumетрический метод. Основан на измерении объема грунта специальными объемометрами Тетмайера, Гиршвальда и др. Описание метода дано в работах Васильева [2], Ивановой [16] и др.

### Б. Объемный вес твердой фазы грунта $\delta = \frac{G_s}{V}$

Объемным весом твердой фазы грунта называется вес единицы объема грунта за вычетом веса воды в порах, но с сохранением естественной пористости грунта. Чем больше величина объемного веса твердой фазы данного грунта, тем меньше его пористость и большее плотность. Для грунтов, не изменяющих объема при высушивании, объемный вес твердой фазы может быть определен непосредственным взвешиванием абсолютно-сухого образца.

Для грунтов, сжимающихся при высушивании (связных грунтов) объемный вес твердой фазы вычисляется по формуле 2 (приложение II).

Вместо вычислений по указанной формуле для определения объемного веса твердой фазы грунта можно пользоваться номограммами Приклонского (фиг. 11).

На номограммах по оси абсцисс отложена естественная влажность  $w$  (в %), по оси ординат — объемный вес грунта с естественной влажностью  $\Delta$ . На пересечении абсциссы и ординат, соответствующих полученным в лаборатории значениям  $w$  и  $\Delta$ , находят искомый объемный вес твердой фазы грунта  $\delta$ .

Для большей точности и удобства пользования составлены две номограммы: одна — для объемного веса в пределах от 0,80 до 1,60, другая — для объемного веса от 1,60 до 2,40.

Пример. Дано: объемный вес грунта при влажности  $w=36\%$  равен  $\Delta = 2$ . На оси абсцисс номограммы находим точку, соответствующую значению влажности 36%, а на оси ординат — соответствующую значению объемного веса 2. Из найденных точек восстанавливаем перпендикуляры и на оси пересечений по наклонной линии читаем ответ:  $\delta = 1,475$ .

### В. Определение объемного веса песков с нарушенной структурой

Объемный вес песков с нарушенной структурой определяется в двух состояниях: рыхлом и плотном. Соответственно объемный вес будет иметь минимальное и максимальное значения.

#### a) Рыхлое сложение ( $\delta_{min}$ )

1. Взвесить сухой стеклянный цилиндрический сосуд объемом 50 см<sup>3</sup>, диаметром 2—3 см.

2. Заполнить цилиндр предварительно пропущенным песком. Для этого взять воронку с длинным носиком (или нарастить носик куском резиновой трубы), вставить носик в сосуд, наполнить воронку песком<sup>1</sup>. Затем, придерживая левой рукой мерный сосуд, правой рукой медленно поднимать воронку, заставляя песок пересыпаться из нее в сосуд. Поднимать носик воронки выше 1—2 см от поверхности песка в сосуде не допускается. Избыток песка удалить линейкой в уровень с краями сосуда.

3. Сосуд с грунтом взвесить.

4. Объемный вес грунта, находящегося в рыхлом состоянии, определить по формуле

$$\delta_{\min} = \frac{G_2 - G_1}{V_0},$$

где  $G_1$  — вес пустого сосуда;

$G_2$  — вес сосуда с грунтом;

$V_0$  — объем сосуда.

Определение провести не менее 3 раз и за среднее значение объемного веса песка в рыхлом состоянии принять среднее значение из двух меньших данных.

5. Данные опытов занести в журнал по выше помещенной форме (табл. 15).

При мечание. Создание рыхлого сложения песка с помощью засыпки его через воронку не всегда дает сравнимые результаты. В некоторых лабораториях для этой цели применяются другие способы.

Способ наклонной плоскости. Заполнение стаканчика производится по жолобу, наклоненному к горизонту под углом 45°.

Нижний конец жолоба устанавливается над цилиндром на высоте 5 см.

Способ спирали. В цилиндр закладывается проволочная спираль, засыпаемая грунтом. Продергивая спираль через песок, создают рыхлое сложение песка.

Гидродинамическое давление. Рыхлое сложение создается за счет перемещения частиц песка под влиянием динамического давления воды, подаваемой снизу с градиентом, несколько большим 1.

В практике лабораторных работ наибольшее применение находит способ засыпки через воронку, принятый в качестве стандартного Совещанием по исследованию грунтов 1940 г.

#### б) Плотное сложение ( $\delta_{\max}$ )

1. Взвесить сухой металлический стакан диаметром не менее 5 см и емкостью не менее 250 см<sup>3</sup>. (При содержании в песке частиц крупнее 2 мм емкость сосуда должна быть не менее 500 см<sup>3</sup> при  $d = 10$  см.)

<sup>1</sup> Для песков, содержащих частицы крупнее 2 мм, этот способ не применим.

2. Предварительно просушенный песок загрузить небольшими порциями в стакан при постоянном уплотнении путем постукивания боковых стенок стакана и трамбования с помощью деревянной трамбовки.

3. После заполнения стакан с грунтом взвесить.

4. Объемный вес песка, приведенного в состояние уплотнения, определить по формуле

$$\delta_{\max} = \frac{q_2 - q_1}{V_0},$$

где  $V_0$  — объем стакана,

$q_1$  — вес стакана,

$q_2$  — вес стакана с водой.

5. Данные занести в таблицу по помещаемой ниже форме (табл. 16).

П р и м е ч а н и е. В некоторых лабораториях принято производить уплотнение песков другими способами: вибрационной установкой, постукиванием о цилиндр молотком, ударами на специальном копре, уплотнением при помощи фильтрующейся сверху вниз воды.

Таблица 16

Форма для записи определения объемного веса песков

№ опыта	Плотное сложение				Рыхлое сложение					
	вес пустого стакана, г	вес стакана с грунтом, г	объем стакана, см <sup>3</sup>	объемный вес, г/см <sup>3</sup>	№ опыта	вес пустого стакана, г	вес стакана с грунтом, г	объем стакана, см <sup>3</sup>	объемный вес г/см <sup>3</sup>	
	$q_1$	$q_2$	$V_0$	$\delta_{\max} = \frac{q_2 - q_1}{V_0}$		$G_1$	$G_2$	$V_0$	$\delta_{\min} = \frac{G_2 - G_1}{V_0}$	
1	137,2	519,2	200	1,91	1	32,3	107,8	50	1,51	
2	137,2	509,1	200	1,86	2	32,3	103,3	50	1,42	
3	137,2	494,9	200	1,79	3	32,3	105,3	50	1,46	

Необходимое оборудование: металлический стакан емкостью 250 см<sup>3</sup> и диаметром 5 см, стеклянный или металлический стакан емкостью 50 см<sup>3</sup>, технические весы, воронка, резиновая трубка, трамбовка деревянная.

### Задание 10. Пористость

Под пористостью грунтов понимают наличие в них мелких пустот. Количество пористость выражают обычно отношением объема пустот к общему объему грунта (в %). Эту величину

обозначают через  $n$ . Очевидно, что  $n = \frac{V_n}{V}$ . Кроме этого, пористость грунта может характеризоваться так называемой приведенной пористостью  $\epsilon$ . Приведенной пористостью или коэффициентом пористости называется отношение объема пустот к объему твердой фазы. Приведенная пористость чаще всего выражается в долях единицы. Очевидно, что,  $\epsilon = \frac{V_n}{V_s}$ . Кроме того, величина пористости может быть выражена по весу, в виде отношения веса полностью заполняющей поры грунта воды к весу абсолютно сухого грунта (весовая пористость) —  $W = \frac{gw}{g}$ .

Способов непосредственного лабораторного определения пористости глинистых грунтов не существует. Пористость связных грунтов вычисляется по удельному и объемному весу. Пористость остальных пород может определяться непосредственно, но чаще вычисляется по тем же формулам, которые применяются для определения пористости связных грунтов.

Пористость и приведенная пористость являются очень важными показателями, характеризующими структуру грунта. Весовая пористость характеризует влажность грунта при полном его насыщении в естественном состоянии.

Пористость, не являясь сама расчетной величиной, используется как очень важная вспомогательная характеристика при некоторых расчетах, например, приведенная пористость при построении компрессионной кривой.

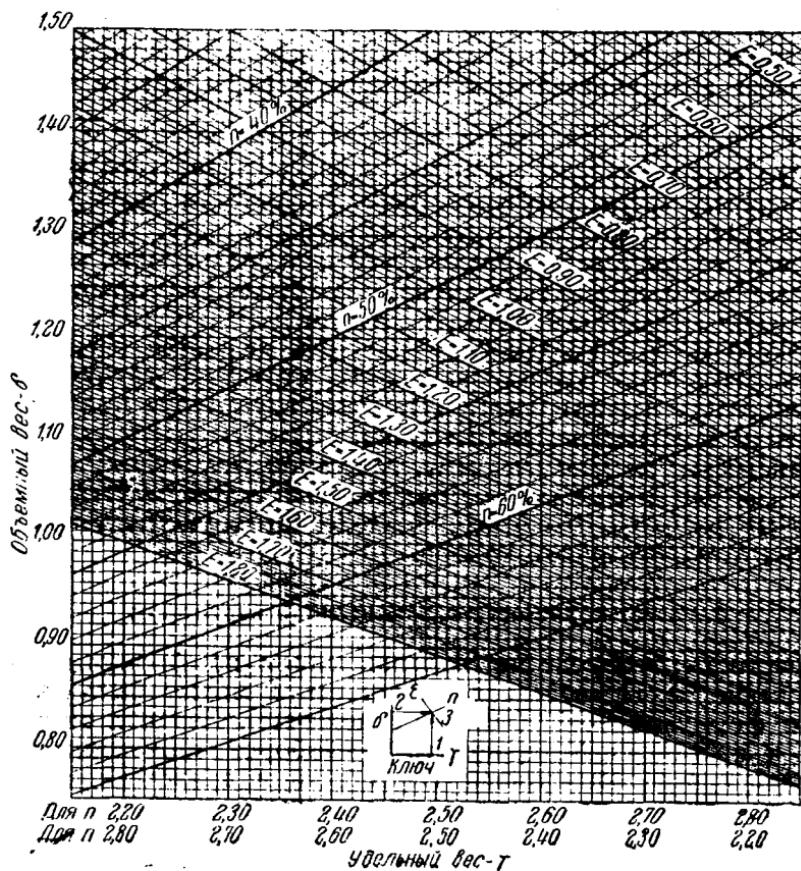
#### A. Расчет пористости и приведенной пористости

Пористость  $n$  определяется вычислением по формулам 5—7 (приложение II). Приведенная пористость  $\epsilon$  может быть вычислена по формулам 8—11 (то же приложение). Переход от пористости к приведенной пористости и наоборот производится по формулам 7 и 11. Вычисление пористости и приведенной пористости ускоряется при пользовании номограммами Приклонского (фиг. 12). Номограммы составлены для определения пористости и приведенной пористости по формулам 5 и 8 (приложение II). В целях большой точности и удобства пользования составлены две номограммы: одна — для объемного веса  $\delta$  в пределах от 0,75 до 1,50, другая — для объемного веса  $\delta$  от 1,50 до 2,25.

Номограммы построены по следующему принципу. По оси абсцисс нанесен удельный вес породы  $\gamma$  в пределах от 2,15 до 2,85, причем для вычисления пористости  $n$  значения удельного веса возрастают слева направо, а для приведенной пористости  $\epsilon$  эти значения возрастают справа налево. По оси ординат нанесен объемный вес твердой фазы грунта  $\delta$ . На пересечении осей абсциссы и ординат, соответствующих определенным в лаборатории значениям  $\gamma$  и  $\delta$ , находят пористость  $n$  по одной системе линий и приведенную пористость  $\epsilon$  по другой системе линий.

Пример. Определено в лаборатории:  $\gamma = 2,40$ ;  $\delta = 1,00$ .

Пользуясь номограммой, находим точку пересечения линий, параллельной оси абсцисс, проведенной из точки на оси ординат, соответствующей значению  $\delta = 1,00$ , с линией, параллельной оси ординат, проведенной из точки на оси абсцисс, соответствующей значению  $\gamma = 2,40$ , взятому по масштабу слева направо. Получен-



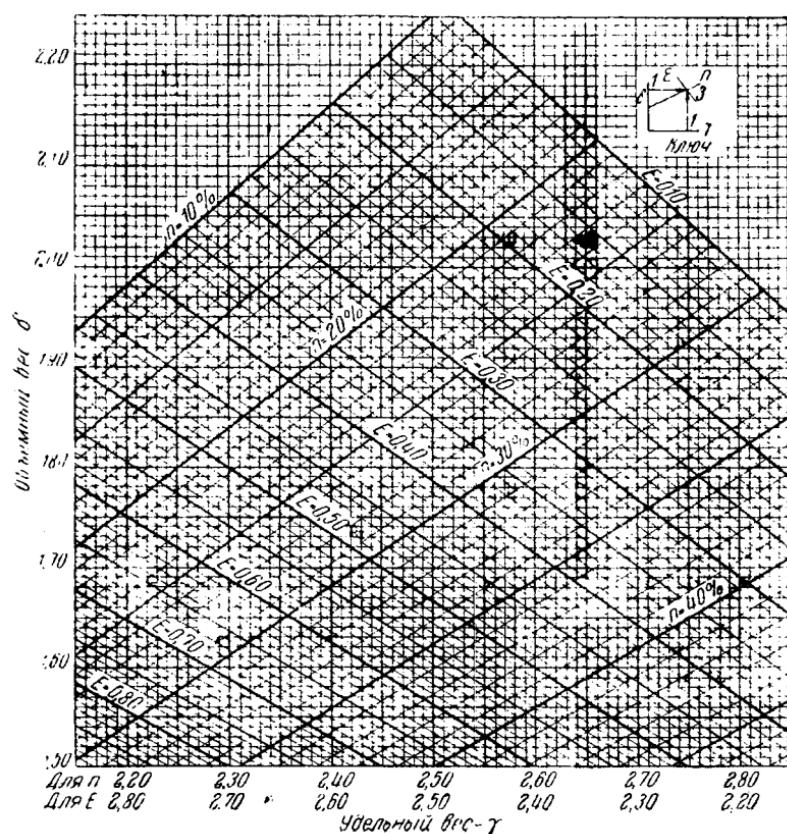
Фиг. 12а. Номограмма Приколоинского для определения пористости  $n$  и приведенной пористости  $\epsilon$  по удельному ( $\gamma$ ) и объемному ( $\delta$ ) весу.

ная при пересечении этих линий точка лежит между линиями системы  $n$ , отвечающими значениям пористости 58 и 59%. Интерполируя, находим для нашей точки значение  $n = 58,3\%$ .

Для нахождения приведенной пористости  $\epsilon$  поступаем аналогично сказанному, взяв значение  $\gamma$  по масштабу справа налево. Полученная на пересечении этих линий точка лежит на линии системы  $\epsilon$ , соответствующей значению  $\epsilon = 1,40$ .

Таким образом искомые значения  $n$  и  $\epsilon$  будут:  $n = 58,3\%$ ;  $\epsilon = 1,40$ .

Данные заносятся в таблицу по следующей форме (табл. 17).



Фиг. 12б. Номограмма Приклонского для определения пористости  $n$  и приведенной пористости  $\epsilon$  по удельному ( $\gamma$ ) и объемному ( $\delta$ ) весу.

Таблица 17

Форма для записи данных расчета пористости

Удельный вес грунта $\gamma$	Объемный вес твердой фазы грунта $\delta$ $\text{г}/\text{см}^3$	Пористость грунта, % $n = \frac{\gamma - \delta}{\gamma} \cdot 100$	Коэффициент пористости $\epsilon = \frac{\gamma - \delta}{\delta} = \frac{n}{1 - n}$	Примечание
2,40	1,00	58,3%	1,40	

## Б. Непосредственное определение пористости песков методом насыщения

1. Сухой чистый стаканчик (объемом около 50 см<sup>3</sup> для рыхлого сложения и 250 см<sup>3</sup> для плотного сложения) наполнить исследуемым песком. Наполнение производить небольшими порциями с утрамбовкой или через воронку (в зависимости от того, в каком состоянии требуется определить пористость песка — при плотном или рыхлом сложении).

После наполнения выровнять песок линеекой бровень с краями стаканчика.

2. При помощи бюретки насытить песок в стаканчике водой до появления тонкого слоя воды на поверхности песка. Количество воды, пошедшее на насыщение песка, будет соответствовать, очевидно, объему его пор  $V_n$ .

3. Удалить песок из стаканчика и при помощи той же самой бюретки измерить объем пустого стаканчика, что и будет соответствовать объему породы  $V$ .

4. Пористость (в %) рассчитать по формуле

$$n = \frac{V_n}{V} \cdot 100.$$

Данные занести в таблицу по следующей форме (табл. 18).

Таблица 18

### Форма записи данных определения пористости песков

№ опыта	Объем воды, израсходованной на насыщение породы, см <sup>3</sup>	Объем стаканчика, см <sup>3</sup>	Пористость, %	Примечание
	$V_n$	$V$	$n = \frac{V_n}{V} \cdot 100$	
1	15,50	50	31	
2	15,00	50	31,2	

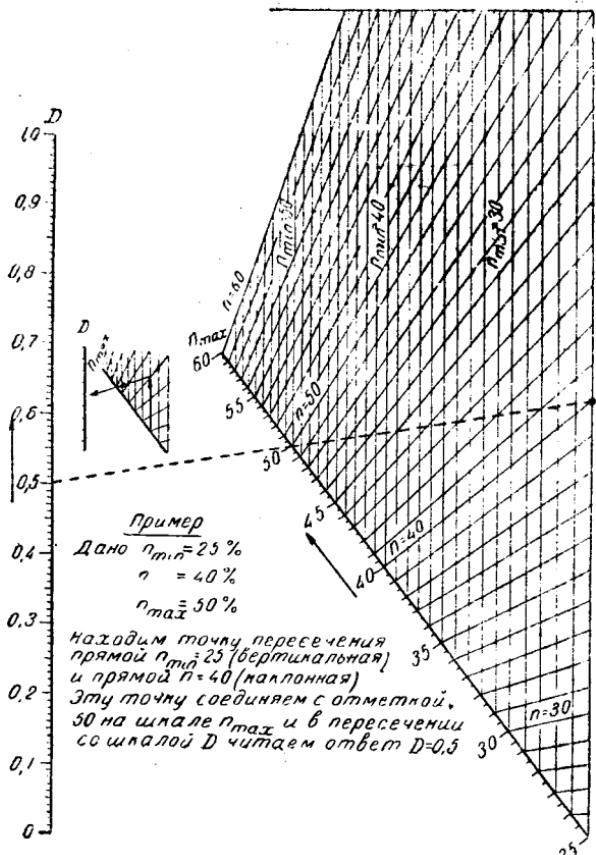
Необходимое оборудование: стеклянные стаканчики с ровными краями объемом 50—250 см<sup>3</sup>; бюретка.

## Задание 11. Степень плотности и степень влажности

### A. Степень плотности $D$

Строительные свойства песчаных грунтов зависят от характера их сложения (рыхлое, плотное и т. д.).

Для оценки песчаных грунтов с указанной точки зрения Терцаги предложил понятие относительной плотности или степени плотности  $D$ . Степень плотности — величина отвлеченная и выражается в долях единицы. Определение степени плотности производится по формулам 12 и 13 (приложение II).



Фиг. 13. Номограмма для определения степени плотности по Терзаги.

Для определения степени плотности по формулам 12 и 13 необходимо определить максимальную, минимальную и естественную пористость грунта.

Минимальная  $n_{\min}$  и максимальная  $n_{\max}$  пористость определяется на образцах с нарушенной структурой в двух состояниях: уплотненном и разрыхленном.

Вместо вычисления по формулам 12 и 13 определение величины  $D$  может быть произведено графическим путем с помощью номограммы (фиг. 13). Форма записи данных определения степени плотности приводится в табл. 19.

#### Б. Степень влажности $K_w$

Для суждения о степени заполнения пор в грунте водой Терзаги предложил так называемый коэффициент или степень влажности.

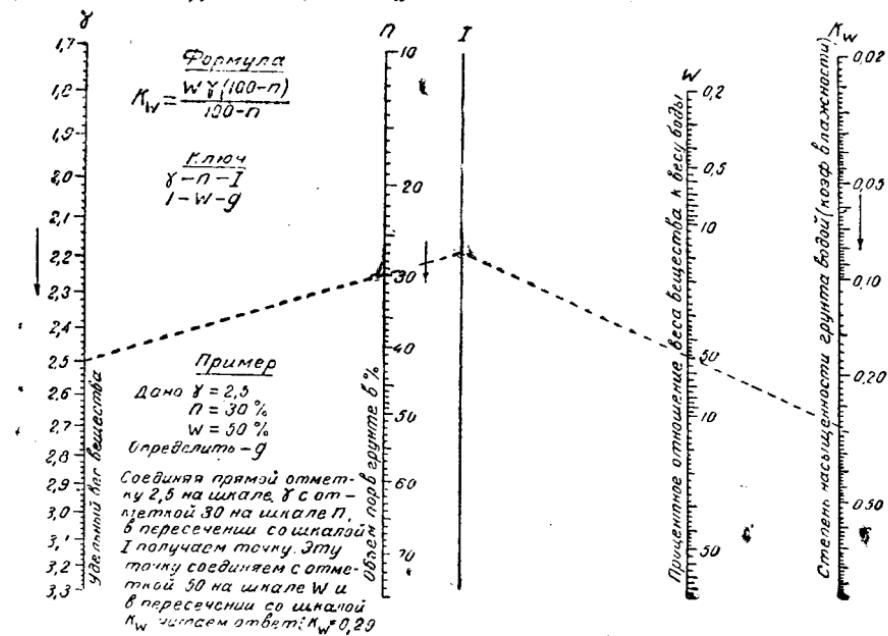
Степень влажности — величина отвлеченная, выражается обычно в долях единицы и определяется по формулам 24—28 (приложение II).

Таблица 19

Форма записи данных определения степени плотности

№ опыта	Объемный вес рыхлого песка, г/см <sup>3</sup>		Объемный вес плотного песка, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес песка с нарушен- ной структурой, г/см <sup>3</sup>	Удельный вес песка	$n_{\max}$	$n_{\min}$	Пористость рых- лого песка, %	Пористость плот- ного песка, %	Естественная по- ристость песка, %	Степень плот- ности	$D$
	$\delta_{\min}$	$\delta_{\max}$										
1	1,44	1,91	1,60	2,65		46,0	28,0	37,0				0,57

По величине  $K_w$  грунты делятся на три группы: сухие при условии, если  $0 < K_w < \frac{1}{3}$ ; влажные, если  $\frac{1}{3} < K_w < \frac{2}{3}$ ; мокрые (насыщенные), если  $\frac{2}{3} < K_w = 1$ .



Фиг. 14. Номограмма для определения степени влажности по Терцаги.

Производство вычислений по формуле 24 (приложение II) может быть заменено применением номограммы (фиг. 14).

## ТЕМА ТРЕТЬЯ

# КОНСИСТЕНЦИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

### Задание 12. Определение пластичности и консистенции грунтов

Пластичностью грунтов называется способность их изменять свою форму — деформироваться без разрыва — под влиянием внешнего воздействия и сохранять эту форму после того, когда действие внешнего давления прекращено.

Пластичные свойства грунтов тесным образом связаны с влажностью и изменяются в зависимости от количества находящейся в грунте воды.

Учитывая различные состояния глинистых (связных) грунтов, в зависимости от содержания воды, Аттерберг предложил различать следующие пять форм консистенции (табл. 20).

Разность между количествами воды, отвечающими верхнему пределу пластичности и нижнему пределу пластичности, называется числом пластичности.

Способы определения пластичности грунтов делятся на косвенные и прямые. Способ Аттерберга относится к косвенным способам.

#### *1. Методы определения пределов Аттерберга*

Для определения пределов Аттерберга предложено много методов, из которых ниже разберем несколько наиболее распространенных.

#### *A. Метод Аттерберга*

Метод Аттерберга состоит в определении:

- а) верхнего предела пластичности;
- б) нижнего предела пластичности, и
- в) числа пластичности.

#### *a) Определение верхнего предела пластичности $W_p$*

1. Воздушно-сухой образец грунта растереть резиновым пестиком и для контроля пропустить через сито 0,5 мм.

Таблица 20

## Формы консистенции и способы их выражения по Аттербергу

Название формы конси- стенции	Характерные признаки формы консистенции	Переходная влажность между фор- мами кон- систенции, или пре- деля Аттерберга	Способы выражения				
			весовые единицы		объемные единицы		
			вес воды		объем воды	объем воды	
			вес абсолютно- сухого грунта		объем всего грунта		объем скелета
			наименование		наименование	обозна- чение	наименование
Жидко- текучая	Смесь грунта с водой расте- кается тонким слоем	Предел теку- чести	Предел текучести	$W_t$	Объемный предел текучести	$n_t$	Приведенный предел текучести
Вязко- текучая	Смесь грунта с водой расте- кается толстым слоем	Верхний предел пла- стичности	Верхний предел пла- стичности	$W_f$	Объемный верх- ний предел пла- стичности	$n_f$	Приведенный объемный верх- ний предел пла- стичности
Липко- пластич- ная	Смесь грунта с водой обла- дает свойствами пластичной массы и прилипает к посто- ронним предметам	Предел липкости	Предел липкости	$W_g$	Объемный предел липкости	$n_g$	Приведенный предел липкости
Вязко- пластич- ная	Смесь грунта с водой обла- дает свойствами пластичной массы, но уже не прилипает к посторонним предметам	Нижний предел пла- стичности	Нижний предел пла- стичности	$W_p$	Объемный нижний предел пластич- ности	$n_p$	Приведенный объемный нижний предел пластич- ности
Полу- твёрдая	Смесь теряет свойства пла- стичной массы и приобретает свойства полутвердого тела	Предел усадки	Предел усадки	$W_c$	Объемный предел усадки	$n_0$	Приведенный объемный предел усадки
Твердая	Смесь имеет свойства твер- дого тела						

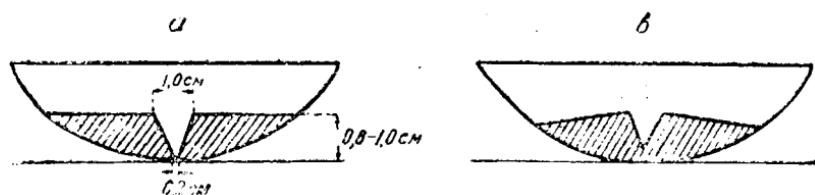
2. Размельченный грунт в количестве около 25 г замесить с водой до консистенции сравнительно густой массы в фарфоровой чашечке с круглым дном диаметром 10—12 см.

3. Полученную грунтовую массу поместить в эксикатор, на дно которого налита вода, и оставить массу в покое на сутки.

4. Массу в чашечке тщательно перемешать и выравнить ее поверхность с помощью шпателя так, чтобы высота слоя испытуемого грунта была равна 0,8—1 см (посередине). Затем разрезать шпателем тесто на две части так, чтобы получилась между ними щель (фиг. 15) шириной 1 см вверху и 0,2 см внизу.

5. После указанных приготовлений чашечку поднять на высоту 6 см (от дна) над столом и уронить с указанной высоты на стол, прикрытый резиновой прокладкой (подушечкой) толщиной 0,3 см.

Если при третьем ударе обе половинки массы грунта соединяются на высоту 0,1 см (от дна) и на протяжении 1,5—2 см по



Фиг. 15. Определение верхнего предела plasticности по Аттербергу.  
a—положение образца до ударов; b—положение того же образца после ударов.

длине разреза, верхний предел пластичности считается достигнутым.

6. Если слияние частей грунтовой массы происходит при первом или втором ударе, то это означает, что влажность в грунте превышает верхний предел пластичности; поэтому в чашку с перевуалженным грунтом необходимо добавить некоторое количество сухого грунта и массу тщательно перемешать, после чего повторить все операции вновь.

7. Если после третьего удара слияния обеих половинок не произошло (что означает, что влажность грунта меньше верхнего предела пластичности), тогда к грунтовой кашице прибавить воды, размешав и повторить опыт вновь.

8. Когда верхний предел уловлен и, следовательно, получена надлежащая консистенция, из чашки взять пробу в количестве 6—10 г в том месте, где произошло слияние, и определить высушиванием (при 100—150° С) ее влажность.

Эта влажность будет являться верхним пределом пластичности по Аттербергу.

9. Данные определения занести в таблицу по ниже помещаемой форме (табл. 21).

## Пример расчета

Вес бюкса  $a = 16,747$ .  
" " с влажным грунтом  $b = 27,134$ .  
" " с сухим грунтом  $d = 23,920$ .  
" воды в грунте  $- 27,134 - 23,920 = 3,214$ .  
" абсолютно-сухого грунта  $- 23,920 - 16,747 = 7,143$ .

$$W_f = \frac{3,214}{7,143} \cdot 100 = 45\%$$

### б) Определение нижнего предела пластичности $W_p$

1. Часть грунта, оставшуюся после определения верхнего предела пластичности, смешать с некоторым количеством сухого порошка и тщательно перемешать до получения теста, не прилипающего к рукам, а затем придать ему форму жгута.

2. Приготовленный таким образом грунт раскатать ладонью на стекле до образования жгутика диаметром 3 мм. Раскатывание нужно производить, слегка нажимая, так чтобы глиняный шнур все время вытягивался в длину. Эту операцию необходимо продолжать до тех пор, пока шнур не начнет распадаться, достигнув толщины 3 мм. При раскатывании необходимо следить за тем, чтобы жгут не высовывался из-под ладони, так как в этом случае он будет раскрошиваться, не достигнув влажности нижнего предела пластичности.

3. Раскатать другие кусочки глинистого теста, пока наберется не менее 3 г крошек грунта, которые все время следует складывать в сушильный стаканчик, плотно прикрывающийся крышкой.

4. Стаканчик с грунтом взвесить, просушить до постоянного веса при  $t^\circ = 100 - 105^\circ \text{ С}$  и определить влажность. Эта влажность является нижним пределом пластичности.

5. Опыт повторить 2—3 раза. Данные занести в таблицу по ниже помещаемой форме (табл. 21).

### в) Определение числа пластичности $M_p$

Число пластичности определяется по разности между влажностями, соответствующими верхнему и нижнему пределам пластичности.

Пример:  $W_f = 45\%$ ;  $W_p = 32\%$ ;  $M_p = 45 - 32 = 13\%$ .

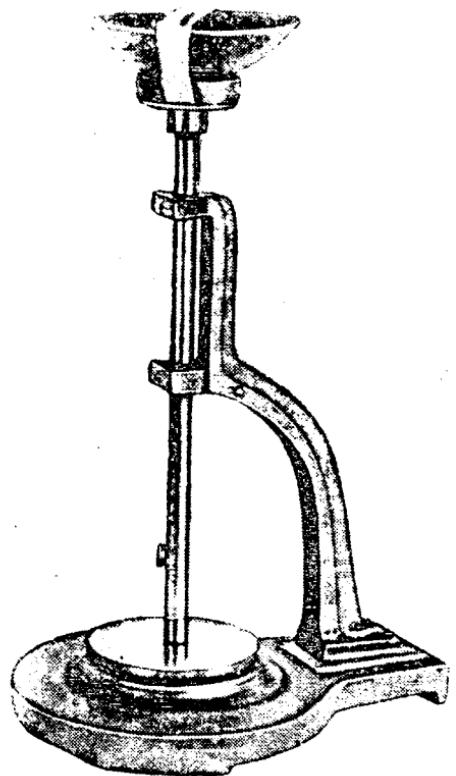
### Б. Определение верхнего предела пластичности на приборе Вика<sup>1</sup>

Чтобы избежать субъективности, не устранимой при описанном ручном методе, для определения верхнего предела пластичности рекомендуется применение прибора Вика (фиг. 16), приспособленного А. М. Васильевым для этой цели.

<sup>1</sup> Описываемый метод одобрен и рекомендован в качестве стандартного Совещанием по исследованию грунтов 1940 г.

С прибора Вика удалены игла, шкала и направляющая стрелка. В верхней части стержня прибора шурупом укреплен небольшой деревянный диск, в котором сделано сферическое углубление для установки чашки. С нижней стороны к диску прибиты концы резиновой трубки или полоски, служащей для укрепления чашки на деревянном диске.

На поверхность столика прибора наклеен диск из листовой вулканизированной резины, покрытый сверху стальным диском



Фиг. 16. Прибор Вика, приспособленный для определения верхнего предела пластичности.

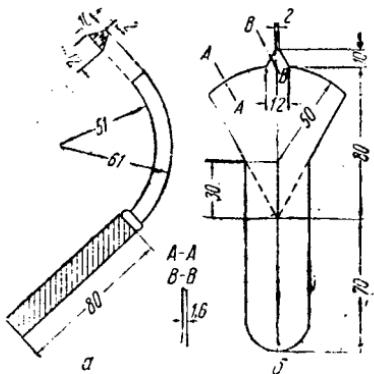
в стержне просверлено отверстие и поставлен ограничитель, который служит стопором при поднимании стержня над столиком.

Для разрезания грунтовой массы применяются специальные ниппели (фиг. 17).

Ход определения следующий:

1. Подготовить грунт, как было указано выше при определении верхнего предела пластичности по Аттербергу.

2. Подготовленный грунт тщательно перемешать и выровнить его поверхность, наблюдая за тем, чтобы толщина массы в центре чашки была равна 1 см.



Фиг. 17. Шпатель для проведения борозды в грунтовой массе при определении верхнего предела пластичности.

*a*—для супесей и легких суглиников;  
*b*—для глин и тяжелых суглиников.

Высота подъема (падения) стержня для данного определения должна быть всегда равной 75 мм. Для этого

3. При помощи шпателя разделить грунтовую массу в чашечке на две половины так, чтобы обе половины отделялись друг от друга до дна чашки продольным V-образным разрезом (см. фиг. 15, а).

4. Установить чашечку с грунтом на приборе, для чего необходимо растянуть резиновую петлю. Прибор поместить на жесткое основание (каменный подоконник, металлическую плиту и т. д.), поднять стержень до стопора и отпустить для свободного падения. Испытание считать законченным, если после третьего удара стержня обе половины грунтовой массы в чашке сольются на высоту 1 мм и на протяжении 15—20 мм по длине разреза.

Если этого не будет достигнуто, опыт необходимо повторить.

После опыта определить влажность испытуемого образца, которая и будет характеризовать верхний предел пластичности.

Таблица 21

Форма для записи данных определения пластичности

Характеристика по Аттербергу	Вес блюка, г	Вес блюка с влажным грунтом, г	Вес блюка с грунтом после высушивания, г			Достигнутый постоянный вес, г	Влажность, %
	a	b	I	II	III		
Верхний предел пластичности . .	16,747	27,134	24,138	23,920	23,920	23,920	45
Нижний предел пластичности . .	13,811	17,873	16,915	16,733	16,733	16,733	32
Число пластичности . . . . .	—	—	—	—	—	—	13

Необходимое оборудование для определения пределов Аттерберга: ступка с резиновым пестиком, сито 0,5 мм, фарфоровая чашка диаметром 10—12 см, шпатель, прибор Вика, латунная чашка, блюсы, сушильный шкаф с термометром, весы, разновес, стекло (20 × 20 см).

В. Определение верхнего предела пластичности по Казагранде

Казагранде для определения верхнего предела пластичности предложен специальный прибор (фиг. 18). Прибор, состоит из латунной чашки весом 200 г, к которой прикреплена ручка 1, позволяющая поворачивать чашку около некоторой оси, а также кулачкового упора 2.

При помощи кулачка, врачающегося кривошипом, чашка может подниматься и падать на поверхность каучуковой плиты, вделан-

ной в деревянный брускок 4. Высота подъема чашки регулируется устройством 3, удерживаемым на месте двумя винтами.

Перед опытом высота подъема чашки устанавливается равной точно 10 мм (погрешность регулировки должна быть не больше 0,2 мм).

Верхний предел пластичности или нижняя граница текучести по Казагранде определяется по кривой текучести, которая дает количество ударов, потребовавшихся для заплывания борозды на 13 мм в грунте с различной влажностью. Верхний предел пластичности отвечает той влажности, которой соответствует абсцисса в 25 ударов (фиг. 19).

Кривая текучести строится по данным нескольких опытов.

Ход определения следующий:

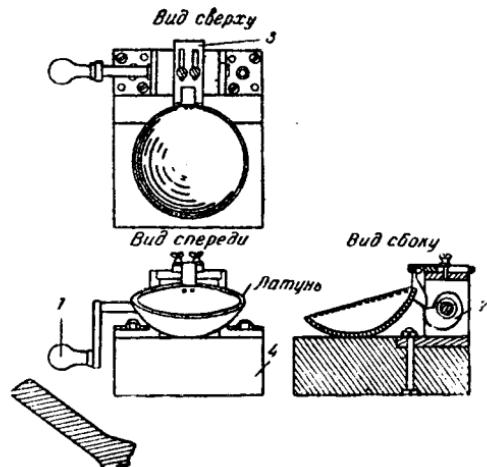
1. Воздушно-сухой образец грунта растереть резиновым пестиком и пропустить через сито 0,5 мм.

2. Из пропущенного сквозь сито грунта взять среднюю пробу в количестве 150—200 г и замесить в произвольном количестве дистиллированной воды так, чтобы влажность теста была несколько меньше верхнего предела пластичности.

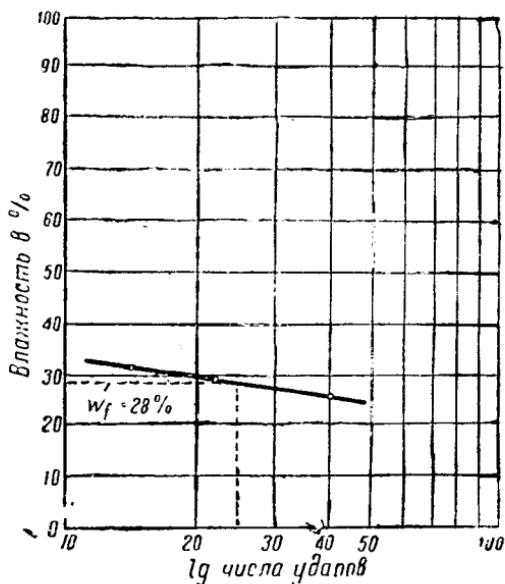
3. После этого часть массы грунта следует перенести в чашку прибора (ближе к краю) и выровнить ее поверхность.

4. С помощью шпателя сделать борозду перпендикулярно к оси вращения чашки. При этом шпатель следует держать строго вертикально.

5. Подвесить чашку к прибору, а самий прибор поместить на мягкой подкладке (бумага, резина).



Фиг. 18. Прибор Казагранде для определения верхнего предела пластичности.

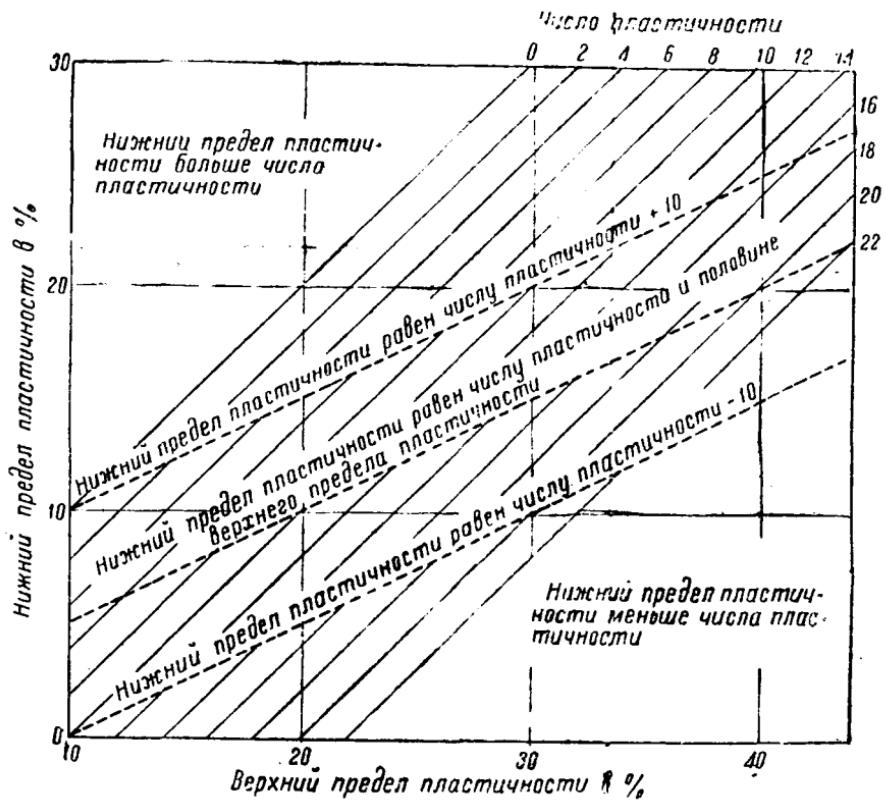


Фиг. 19. Кривая текучести по Казагранде.

6. После этого, поворачивая ручку со скоростью двух оборотов в секунду, отметить то количество ударов, которое необходимо для того, чтобы обе половины пробы соединились на протяжении 13 мм.

Из места слияния взять пробу для определения влажности.

7. Опыт повторить с грунтовой лепешкой другой влажности; для этого к грунту подлить воды и тщательно размешать, а затем повторить то, что указано в пп. 4, 5 и 6.



Фиг. 20. График пределов Аттерберга по Приклонскому.

8. Опыт повторить еще несколько раз при других влажностях грунтового теста. При этом влажность грунтовых лепешок следует подбирать так, чтобы заплыивание борозды происходило в интервале между 15 и 30 ударами.

9. Данные занести в таблицу по ниже помещаемой форме (табл. 22).

10. По данным опыта построить график (см. фиг. 19), где по оси абсцисс отложить логарифмы числа ударов, а по оси ординат — соответствующие влажности. Влажность, соответствующая 25 ударам, отвечает верхнему пределу пластичности.

Таблица 22

Форма для записи данных определения верхнего предела пластичности по Казагранде

№ бокса			Вес бокса с грунтом после высушивания, г			Достигну- щий посто- янный вес	Влажность	Количество ударов	Верхний предел пластично- сти, %	$W_f$
	Вес бок- са, г	Вес бокса с влажным грунтом, г	I	II	III					
a	b				d	w				
1	38,0558	46,5652	44,5682	44,5672	44,5672	44,5672	30,66%	14	—	28
2	42,4150	55,5771	52,6936	52,6760	52,6758	52,6758	28,20%	22	—	—
3	40,9272	50,1398	48,2166	48,2024	48,2016	48,2016	26,64%	40	—	—

Необходимое оборудование: прибор Казагранде, шпатель, ступка с резиновым пестиком, сито 0,5 мм, боксы, сушильный шкаф с термометром, аналитические весы с разновесом.

При большом количестве определений пределов Аттерберга результаты их удобно изображать на графике (фиг. 20), по оси абсцисс которого отложены величины верхнего предела пластичности, а по оси ординат — нижнего предела (Приклонский). Диагональные линии, проведенные под углом 45°, отвечают различным значениям числа пластичности. Найденные в процессе опытов значения пределов Аттерберга изображаются на графике точками с номерами образцов. Построение таких графиков позволяет быстро типизировать грунты по свойствам пластичности.

Кроме описанных выше приборов Вика и Казагранде, для определения пределов Аттерберга применяют приборы Охотина, Фарского и др.

Однако все эти способы также основаны на определении пределов Аттерберга для грунтов с нарушенной структурой и не учитывают, подобно описанным, особенностей структуры грунта.

## 2. Способы определения консистенции

Для оценки состояния грунта с ненарушенной структурой или так называемой естественной консистенции грунта применяются различные способы, из которых можно указать на следующие:

1. Способ раздавливания — Д. Бурмейстера [9, 12, 21, 24].
2. Способы вдавливания в грунт иглы (пенетрация) и штампов, описанные в учебнике Приклонского и Коломенского [9].
3. Способ погружения в грунт конуса (способ шведского конуса).

Определение консистенции грунтов способом шведского конуса производится следующим образом. Металлический конус определенного веса, заостренный под определенным углом, уста-

навливается над горизонтально выровненной поверхностью образца таким образом, чтобы острие соприкасалось с ней (фиг. 21). Конус освобождается от удерживающих приспособлений, падает и вдавливается на некоторую глубину в грунт.

Для опытов применяются стандартные конусы:

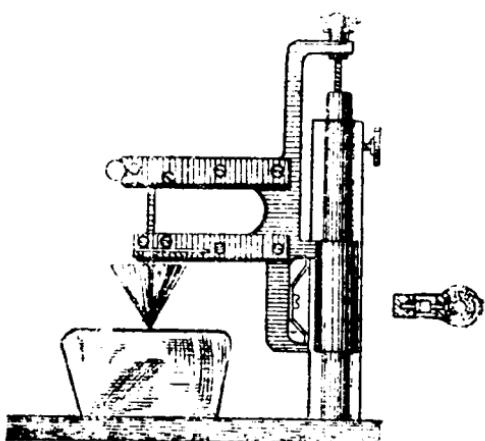
с углом заострения 60° весом 60 г		
:	30°	100
:	60°	10

Консистенция грунта измеряется так называемым коэффициентом сопротивляемости, определяемым по глубине вдавливания конуса в грунт. За 10 принят коэффициент сопротивляемости

грунта, в котором от конуса 60° весом 60 г получается впадина глубиной 10 мм.

Подробные таблицы для вычисления коэффициентов сопротивляемости для различных конусов приведены в «Трудах шведской геотехнической комиссии» (ОНТИ, 1935), и в механике грунтов проф. Попова [24].

Способ Бурмейстера описан в инструкции Приклонского [23] в книге Паталеева и Боженкова (20) и в учебнике Приклонского и Коломенского [9].



Фиг. 21. Шведский конус.

### Задание 13. Набухание

*Набуханием грунта называется увеличение его объема при насыщении водой.*

Для определения набухания предложено несколько способов, основанных на учете происходящих при этом явлений.

Способы определения набухания грунтов могут быть объединены в следующие шесть групп: а) по теплоте набухания; б) по сжатию; в) по давлению набухания; г) по объему осадка, седиментированного в жидкости; д) по количеству (объему или весу) воды набухания и е) по приросту объема при набухании.

Из перечисленных способов некоторые практически не применимы.

К числу последних способов следует отнести, например, характеристику набухания по теплоте, так как значительный тепловой эффект проявляется только при впитывании грунтом первых количеств воды. Дальнейшее связывание воды сопровождается столь незначительным тепловым эффектом, что его трудно измерить.

Между тем именно это дальнейшее связывание воды и обуславливает в основном набухание грунта.

Сжатие, точно так же как и теплота набухания, максимально велико для первых количеств воды и совсем незначительно для последующих количеств, а поэтому и это свойство практически не может служить критерием для характеристики набухания.

Метод давления набухания основан на учете работы, которую может производить грунт при набухании. Однако этот способ практически еще не разработан.

Из всех указанных выше способов наибольшее распространение в практике инженерно-геологических работ получил способ изучения набухания по приросту объема грунта в процессе насыщения его водой в том виде, как он разработан Лаптевым-Кирьяновой.

#### Определение набухания по методу Лаптева

1. Воздушно-сухой грунт размельчить в ступке резиновым пестиком и просеять сквозь сито 0,5 мм.

2. Из просеянного грунта приготовить тесто рабочей консистенции, завернуть его в кусок влажной материи и оставить в прохладном и сыром месте на сутки для равномерного распределения влаги между частицами грунта.

3. Из приготовленного теста вырезать при помощи формочки два цилиндра высотой 3 см и диаметром 2 см. Если определение набухания необходимо провести на образце с естественным сложением, то из изучаемого монолита вырезается цилиндрический образец высотой 3 см и диаметром 2 см.

В этом случае пп. 1, 2, 3 и 4 опускаются, за исключением взвешивания.

4. Цилиндрики высушить на воздухе до постоянного веса и взвесить.

5. На цилиндрики надеть резиновые напалечники, очищенные от талька. При надевании напалечника нужно следить, чтобы резина плотно прилегала к поверхности всего образца и чтобы на нижней части образца под пленкой не оставалось воздуха.

После небольшого натяжения пленку туго перевязать ниткой, оставив петлю для подвешивания образца.

6. Затянутый в резиновую пленку образец взвесить сперва на воздухе, а затем в воде при температуре 15—20° С.

7. Проколоть равномерно резиновую пленку иголкой, но так, чтобы образец грунта не был затронут. Для этого перед проколом следует оттягивать пальцем резиновую пленку.

После накола образец погрузить в банку с дистиллированной водой (или с водой с определенным содержанием растворимых солей, соответствующим природным условиям).

8. Через пять дней произвести первое взвешивание для определения набухания. Для этого следует поднять образец крючком за петлю нитки, удалить фильтровальной бумагой избыток влаги с поверхности образца и произвести быстрое взвешивание на

## Форма для записи данных определения набухания по методу Лаптева

Вес образца без пленки  $a = 36,816$ . Вес образца с пленкой в воздухе до набухания  $b = 37,191$ .  
Вес образца с пленкой в воде до набухания  $c = 18,685$ .

воздухе, после чего образец опустить в воду для дальнейшего набухания.

9. Описанное выше взвешивание повторять несколько раз (через каждые 4—5 дней), наблюдая за увеличением веса образца.

10. Когда увеличение веса образца прекратится, следует произвести определение объема набухшего образца путем взвешивания в воде и воздухе.

11. Снять с образца пленку и взвесить, а затем высушить ее на воздухе и опять взвесить.

12. Вычислить набухание по формуле

$$\Delta V = \frac{[(c + e + q_2) - (b + d + q_1)]}{a - c} \cdot 101,3 + 1,3,$$

где  $\Delta V$  — набухание, выраженное в процентах от начального объема образца;

$a$  — вес образца в воздухе без пленки;

$b$  — вес образца в воздухе с пленкой;

$c$  — вес образца с пленкой в воде до набухания;

$d$  — вес образца с пленкой в воде после набухания;

$e$  — вес набухшего образца с пленкой в воздухе;

$q_1$  — вес сырой пленки (вместе с сушильным стаканчиком);

$q_2$  — вес сухой пленки (вместе с сушильным стаканчиком);

1,3 — постоянная поправка на остающийся воздух при данном методе упаковки образца в пленку.

13. Данные занести в таблицу по следующей форме (табл. 23).

### Задание 14. Размокание

Под размоканием понимается способность глинистых грунтов при впитывании воды терять связность и превращаться в рыхлую массу с полной потерей несущей способности.

Определение скорости размокания грунтов представляет собой испытание на устойчивость грунта под водой. Показателями размокания являются: 1) время, в течение которого образец грунта, помещенный в воду, теряет связность и распадается и 2) характер распада — крупные или мелкие комочки, пыль и т. п. Определение размокания производится на образцах с нарушенной и ненарушенной структурой.

Кроме описываемого ниже метода, определение размокания может производиться по способу Лаптева-Шарова [9].

По этому способу определение размокания производится на образцах с нарушенной структурой при различных влажностях образца.

Следует отметить также способ определения скорости размокания в приборе Синельщикова [4], позволяющий непрерывно регистрировать процесс размокания во времени.

### Ход определения

1. Из монолита грунта вырезать цилиндр высотой 3 см и диаметром 2 см.

В случае если определение производится для грунтового материала, следует размельчить воздушно-сухой грунт резиновым пестиком, просеять для контроля сквозь сите 0,5 *мм* и приготовить с водой тесто рабочей консистенции (т. е. имеющее такую влажность, при которой тесто не пристает при раскатывании к рукам).

Из приготовленного теста вырезать латунной трубкой цилиндрики высотой 3 *см* и диаметром 2 *см*.

2. Приготовленные образцы поставить на сетку (с ячейми в 1 *см*), подвешенную в воде, записать время и дату начала испытания, а равно и начальную влажность изготовленных цилиндриков.

Опыт проводится в дистиллированной воде или в растворе того или иного солевого состава.

3. В процессе опыта необходимо наблюдать: 1) время, 2) характер распада образца и 3) выделение пузырьков воздуха.

4. Опыт считать законченным, когда образец размокнет настолько, что провалится через ячей сетки. Результаты испытаний выразить в виде времени, потребного для полного размокания образца, и характеристики распада образца.

## ТЕМА ЧЕТВЕРТАЯ

# ВЛАГОЕМКОСТЬ И ВОДООТДАЧА

*Под влагоемкостью понимают способность грунтов вмещать в себя то или иное количество воды.*

Численно величина влагоемкости выражается, так же как и влажность грунтов, в долях единицы или в процентах к весу абсолютно-сухой навески.

По отношению к видам воды различают следующие виды влагоемкости:

1. Гигроскопическую влагоемкость  $w_n$ .
2. Максимальную молекулярную влагоемкость  $w_m$ .
3. Капиллярную влагоемкость  $w_k$ .
4. Полную влагоемкость  $W_t$ .

*Гигроскопической влагоемкостью или гигроскопичностью грунта называется способность частиц грунта притягивать из воздуха парообразную влагу. Характерным признаком гигроскопической воды является выделение тепла при ее поглощении.*

Различают два вида гигроскопичности: неполную и максимальную.

*Под неполной гигроскопичностью подразумевают то количество водяных паров, которое поглощается грунтом из воздуха при данной относительной влажности воздуха.*

Определение неполной гигроскопичности ничем не отличается от обычного определения влажности.

*Максимальной гигроскопичностью или максимальной гигроскопической влагоемкостью называется максимальное количество водяного пара, которое может поглотить данный грунт из воздуха при полном насыщении последнего водяными парами.*

Максимальная гигроскопичность для данного вида грунта величина постоянная. Количество гигроскопической воды, которое может адсорбировать тот или иной грунт, зависит от суммарной поверхности частиц.

Чем больше суммарная поверхность частиц, тем больше гигроскопичность грунта.

Описание способа определения максимальной гигроскопичности дано в работе Васильева [2].

*Максимальной молекулярной влагоемкостью  $W_m$  называется ма-*

*ксимальное количество гигроскопической и пленочной воды, удерживаемое частицами грунта.*

Максимальная молекулярная влагоемкость, так же как и гигроскопичность грунта, зависит от состава грунта и его удельной поверхности.

Для определения максимальной молекулярной влагоемкости грунтов существует ряд методов [2, 9].

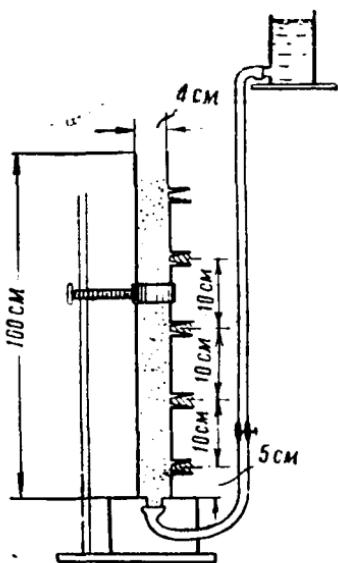
### Задание 15. Определение влагоемкости и водоотдачи

#### А. Определение максимальной молекулярной влагоемкости методом высоких колонн

Определение  $w_m$  для песков производится с помощью особого прибора (фиг. 22), состоящего из металлической или стеклянной трубы диаметром 3—4 см и длиной до 100 см. В дно трубы впаяна небольшая трубочка с сеткой.

Трубка сбоку имеет отверстия диаметром 1,5—2 см, расположенные друг от друга на расстоянии 10 см.

Нижнее боковое отверстие находится на расстоянии 5 см от дна<sup>1</sup>.



Фиг. 22. Прибор для определения максимальной молекулярной влагоемкости песков.

шпателем до 30—50 г грунта из каждого бокового отверстия (или в случае составной колонки из каждого колена) в предварительно взвешенные фарфоровые чашечки и взвесить.

#### Ход определения

1. Наполнить трубку с легкой утрамбовкой испытуемым песком.

2. Закрыть резиновыми пробками боковые отверстия и промочить водой испытуемый песок при помощи трубы, дно которой соединено резиновой трубкой с напорным баком. Промачивание производить до тех пор, пока на поверхности песка не образуется небольшой слой воды.

3. Отнять резиновую трубку от дна прибора и дать гравитационной воде свободно стечь из прибора.

4. По прекращении стока взять шпателем до 30—50 г грунта из каждого бокового отверстия (или в случае составной колонки из каждого колена) в предварительно взвешенные фарфоровые чашечки и взвесить.

<sup>1</sup> Сплошной высокий цилиндр может быть заменен составной колонной и отдельных трубок высотой около 10 см, соединяемых при помощи муфт. Составная колонка уменьшает сортировку материала, которая неизбежно происходит при заполнении прибора песком. Насыщение песка водой производится в этом случае замачиванием сверху.

5. Высушить взятые пробы до постоянного веса в сушильном шкафу и взвесить.

6. Для каждой пробы вычислить влажность.

7. По полученным данным выделить в верхней части прибора зону постоянной влажности; полученная для этой зоны влажность представляет собой величину максимальной молекулярной влагоемкости  $w_m$ .

8. Данные занести в таблицу по следующей форме (табл. 24).

Таблица 24

Форма для записи данных определения максимальной молекулярной и капиллярной влагоемкостей песков методом высоких колонн

№ трубки, из которой взята пробы	Влажность, %	Влагоемкость, %	Примечание
1	1,6		
2	1,7		
3	1,6		
4	1,8		
5	1,7		
6	1,9		
7	6,2		Переходная зона
8	14,9		
9	15,1		
10	15,6		
			Зона максимальной влажности
			$w_m = 1,7$
			Капиллярная
			$w_k = 15,1$

Необходимое оборудование: металлическая или стеклянная трубка  $d = 3-4 \text{ см}$ , длиной 90—100 см с боковыми отверстиями или набор стеклянных трубок (10—12 шт.)  $d = 3-4 \text{ см}$ , длиной по 10 см; резиновая трубка  $d = 2-3 \text{ см}$ , длиной 0,5 м; резиновая трубка  $d = 1 \text{ см}$ , длиной 1 м; напорный бачок; штатив; зажимы; бюксы; сушильный шкаф; аналитические весы с разновесом.

#### Б. Определение максимальной молекулярной влагоемкости способом прессования

Описанный способ высоких колонн прост, но практически применим лишь для песчаных грунтов. Для глинистых грунтов он не пригоден, так как для них потребовались бы слишком высокие колонны, вследствие высокой капиллярности этих грунтов, и слишком большая продолжительность опыта, вследствие слабой их водопроницаемости.

Более удобным для глинистых грунтов является способ прессования или влагоемких сред, разработанный Лебедевым. Способ этот применяется и для песчаных грунтов, не содержащих в своем составе частиц крупнее 0,5 мм,

## Ход определения

1. Для контроля песчаный грунт в воздушно-сухом состоянии пропустить сквозь сито 0,5 мм.

2. Среднюю пробу весом 70—75 г замесить с водой в фарфоровой чашке до состояния верхнего предела пластичности.

3. На лист фильтровальной бумаги размером 6 × 6 см положить металлическое кольцо (шаблон) стандартного размера (толщиной 0,2 см, диаметром 5 см) и заполнить полость внутри него заготовленным грунтом. Избыток грунта, выступающий из отверстия шаблона, удалить с помощью ножа.

4. Кольцо осторожно убрать; на оставшийся на фильтровальной бумаге кружок грунта положить сверху один лист фильтровальной бумаги, а затем поместить грунт между 20 листами фильтровальной бумаги с каждой стороны.

5. Приготовленные таким образом несколько образцов различных грунтов поместить под пресс. При этом образцы грунта с прилегающими к каждому из них слоями фильтровальной бумаги отделяются друг от друга деревянной или металлической пластиинкой.

6. Давление при прессовании довести до 65,5 кг/см<sup>2</sup> и выдержать его в течение 10 минут, следя за сохранением указанного давления в течение всего времени опыта.

7. По окончании прессования быстро освободить грунт от фильтровальной бумаги, поместить его в два предварительно взвешенных бюкса и произвести определение процента влажности. Эта влажность и является искомым значением максимальной молекулярной влагоемкости.

8. При параллельных определениях допускаемое расхождение может быть в пределах 1—2%. Сжатие второй лепешки в прессе при повторном определении необходимо проводить не одновременно с прессованием первой, а самостоятельно.

9. Данные занести в таблицу по следующей форме (табл. 25).

Таблица 25

**Форма для записи данных определения максимальной молекулярной влагоемкости способом прессования**

№ опыта	№ бюкса	Вес бюкса, г	Вес бюкса с влажным грунтом, г	Вес бюкса с сухим грунтом, г			Максимальная молекулярная влагоемкость, %
				I	II	III	
		$q_1$	$q_2$	$q_3'$	$q_3''$	$q_3'''$	$w_m = \frac{q_2 - q_3}{q_2 - q_1} \cdot 100$
1	15	37,7464	48,3300	46,3546	46,3488	46,3484	23,23
2	15	27,6864	37,2658	35,5116	35,4939	35,4934	22,71 } 22,97

**Необходимое оборудование:** ручной или гидравлический пресс, аналитические весы с разновесом, бюксы, металлическое кольцо толщиной 2—1 мм, диаметром 50 мм, фильтровальная бумага, фарфоровая чашка, шпатель, сушильный шкаф.

### **В. Капиллярная влагоемкость песков $W_k$**

**Капиллярной влагоемкостью называется максимальное количество воды, удерживаемое в капиллярных порах.**

Для глинистых грунтов и мелкозернистых песков капиллярная влагоемкость мало чем отличается от полной влагоемкости.

Определение капиллярной влагоемкости производится в высокой колонне следующим образом:

1. По прекращении стока воды из прибора, описанного в опыте определения максимальной молекулярной влагоемкости методом высоких колонн, взять из нижнего бокового отверстия (из капиллярной зоны) пробу в количестве 80—100 г в предварительно взвешенную фарфоровую чашку и взвесить.

2. Высушить взятую пробу до постоянного веса в сушильном шкафу и вновь взвесить.

3. Капиллярную влагоемкость вычислить по формуле,

$$w_k = \frac{q_2 - q_3}{q_3 - q_1} \cdot 100\%,$$

где  $q_1$  — вес фарфоровой чашки;

$q_2$  — вес влажного грунта с фарфоровой чашкой;

$q_3$  — вес сухого грунта с фарфоровой чашкой.

4. Данные опыта занести в таблицу (см. выше табл. 24).

### **Г. Полная влагоемкость $WT$**

**Полной влагоемкостью называется максимальное количество воды, удерживаемое породой при полном насыщении ее водой.**

При этом водой заполнены не только капиллярные промежутки, но и все поры.

Для грунтов, не набухающих в воде, полная влагоемкость равна максимальной влажности при данной пористости  $W$ .

Для грунтов, увеличивающих объем в воде, полная влагоемкость больше максимальной влажности при данной пористости  $W$ . равна влажности набухания.

Определение полной влагоемкости песчаных грунтов производится следующим способом:

1. В предварительно взвешенный стеклянный (или металлический) стакан объемом около 200 см<sup>3</sup> насыпать с легкой утрамбовкой испытуемый грунт.

2. Насыпать грунт в стакане водой до появления тонкой пленки воды на поверхности грунта и взвесить.

3. Высушить стакан с грунтом в сушильном шкафу до постоянного веса, взвесить и вычислить влажность, которая и будет равна искомому значению полной влагоемкости.

Полную влагоемкость не набухающих грунтов можно определить по формулам 18—23 (приложение II). Полную влагоемкость набухающих грунтов вычисляют по данным определения набухания.

#### Д. Определение водоотдачи

Водоотдача песчаных грунтов равна разности между полной влагоемкостью и максимальной молекулярной влагоемкостью по Лебедеву.

Пример. Полная влагоемкость  $W_t = 30,5\%$ . Максимальная молекулярная влагоемкость  $w_m = 10\%$ . Водоотдача равна  $30,5 - 10 = 20,5\%$ .

## ТЕМА ПЯТАЯ

### КАПИЛЛЯРНЫЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ

Из физики известно, что если опустить в воду очень тонкую (капиллярную) стеклянную трубку, то между стенками трубы и водой обнаруживается взаимное притяжение, выражющееся в том, что вода поднимается по трубке вверх на некоторую высоту, причем поверхность воды в трубке приобретает вид шаровой поверхности, обращенной выпуклостью к воде, называемой мениском.

Обозначим поверхностное натяжение этой искривленной поверхности (фиг. 23) в точках  $a$  и  $a_1$  векторами  $ab$  и  $a_1b_1$ , направленными по касательным к шаровой поверхности в этих точках. Раскладываем их на составляющие по двум направлениям: нормально к стенкам трубы и вдоль стенок  $ad$ ;  $a_1d_1$  и  $ac$ ;  $a_1c_1$ . Составляющие  $ac$  и  $a_1c_1$ , направленные в одну сторону вдоль трубы вверх, суммируются в одну общую силу  $Q$ . Под влиянием последней вода в трубке поднимается до некоторой высоты. Высота капиллярного поднятия зависит от величины диаметра капилляра и свойств жидкости. Зависимость эта для цилиндрических круглых капилляров выражается формулой Лапласа

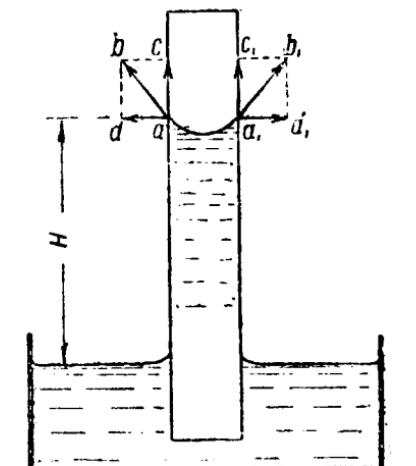
$$H = 2 \frac{a}{r},$$

где  $r$  — радиус капилляра для трубы;

$a$  — поверхностное натяжение воды.

Под капиллярными свойствами грунтов следует понимать высоту и скорость капиллярного поднятия в них воды.

Высота и скорость капиллярного поднятия в грунтах воды зависят от диаметра пор грунта. Чем мелковернистее грунт, тем



Фиг. 23. Мениск.

меньше его поры и тем больше будет высота капиллярного поднятия в нем воды; скорость же капиллярного поднятия воды будет больше в крупнозернистых грунтах и меньше в мелкозернистых. Для примера укажем средние значения максимальной высоты капиллярного поднятия воды в разных грунтах.

Крупный песок . . . . .	3,5—12 см
Средний : . . . . .	12 — 35 "
Мелкий : . . . . .	35 — 120 "
Супесь : . . . . .	120 — 350 "

Что касается высоты капиллярного поднятия воды в структурных грунтах естественного сложения, то предельных величин до настоящего времени для них не установлено. Есть лишь указания, что, кроме гранулометрического состава, на водоподъемную способность влияют степень уплотнения грунта, влажность, температура и присутствие солей.

Во влажном грунте поднятие воды совершается быстрее и достигает более значительной высоты, чем в сухом. Повышение температуры увеличивает скорость поднятия воды в грунтах, но понижает предельную высоту поднятия.

Определение капиллярных свойств имеет большое практическое значение при инженерно-гидрологических изысканиях на дорожных пучинах, в засушливых областях и при изысканиях для строительства, когда фундаменты проектируемых зданий располагаются в зоне капиллярного поднятия.

## Задание 16. Определение капиллярных свойств грунтов

### А. Определение высоты капиллярного поднятия в трубке

1. Привести испытуемые грунты в воздушно-сухое состояние:

2. Обвязать стеклянную трубку<sup>1</sup> диаметром 2—3 см и высотой от 50 см до 1 м с одного конца марлей и наполнить через воронку грунтом, слегка утрамбовывая последний легким постукиванием по самой трубке резиновым пестиком и концом трубы об упругую подушку.

3. Грунт необходимо загружать в трубку так, чтобы не происходило сортировки зерен, падающих в воздухе внутри трубы. С этой целью к концу воронки рекомендуется присоединять резиновую трубку, которая опускается на дно трубы, а затем по мере загрузки приподнимается вверх.

4. Наполненную песком трубку укрепить на штативе, опустив нижний конец ее в воду на 0,5—1 см.

Указанный уровень необходимо поддерживать во все время опыта.

5. Заметив время погружения трубы в воду, следить за скоростью поднятия воды по изменению окраски песка вследствие увлажнения его поднимающейся водой. При неравномерном поднятии воды отсчеты брать по средней величине поднятия. Счи-

<sup>1</sup> Трубка должна быть предварительно градуирована.

**Форма для записи данных определения высоты капиллярного поднятия в песках**

Время от начала опыта	5 мин.	10 мин.	20 мин.	30 мин.	1 час	2 часа	3 часа	24 часа	48 часов	72 часа	96 часов	120 часов
Высота поднятия, мм	84	171	207	221	240	276	295	337	342	348	350	350

тать следует не от погруженного конца трубки, а от поверхности воды.

6. Поднятие уровня отмечать сначала через пять, десять, двадцать, тридцать минут, а затем через часовые и суточные промежутки.

7. Данные занести в таблицу по следующей форме (табл. 26).

Необходимое оборудование: стеклянная трубка диаметром 2—3 см и длиной 0,5—1,0 м, фарфоровая чашка или стеклянная банка, штатив с лапкой, часы, воронка, резиновая трубка.

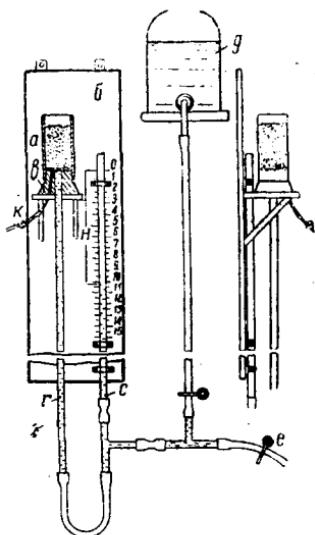
#### Б. Определение высоты капиллярного поднятия методом капилляриметра

Метод непосредственного наблюдения за капиллярным поднятием при исследовании мелкозернистых грунтов неудобен, а иногда и практически невозможен, вследствие большой продолжительности опыта и громоздкости оборудования, так как для таких грунтов требуются очень длинные трубы и большое количество грунта.

Поэтому в практике лабораторных работ для определения капиллярности глинистых грунтов применяют метод так называемых капилляриметров системы Каменского или Гуннара-Бескова [6]. Из них первый благодаря своей простоте получил наибольшее распространение.

Капилляриметр Каменского (фиг. 24) состоит из стеклянного цилиндра *a* высотой 10 см, в нижней части которого укреплена металлическая сетка. Цилиндр укреплен на рейке *b*, имеющей шкалу с миллиметровыми делениями *h*.

Посредством резиновой пробки в с двумя отверстиями цилиндр



Фиг. 24. Прибор для определения капиллярности способом отрыва (по Каменскому).

соединяется снизу с длинной стеклянной трубкой  $\Gamma$ , которая в свою очередь соединяется при помощи изогнутой резиновой трубки и тройника с другой, рядом расположенной стеклянной трубкой  $c$ . Третий отвод от тройника соединяется с резервуаром с водой  $g$  и с выпускным зажимом  $e$ .

Под сетку в цилиндр проведена трубка  $k$  с зажимом для выпуска воздуха.

### Ход определения

1. Загрузить испытуемый грунт в трубку.

2. Подвести снизу через длинную трубку воду из резервуара, открыв зажим трубы для выпуска воздуха. Когда вода вытеснит весь воздух и начнет проходить через трубку, последнюю закрыть зажимом, и вода начнет поступать в песок.

3. Прекратить приток воды в трубку из резервуара; вода будет продолжать некоторое время всасываться в песок, что будет заметно по постепенному падению уровня в другой, соседней трубке.

4. Когда весь грунт будет смочен водой, начать выпускать понемногу воду из трубки; вместе с понижением уровня воды в трубке начнет уходить из грунта и капиллярная вода.

По достижении некоторого уровня ниже сетки, удерживающей грунт, воздух проникнет через грунт в трубку; вода оторвается от сетки и будет понижаться дальше.

В момент отрыва необходимо взять отсчет разности уровней воды в трубках. Эта разность представляет собой высоту капиллярного поднятия.

5. Опыт с одним образцом повторить несколько раз и записать результаты в таблицу по ниже помещаемой форме (табл. 27).

6. При повторении опыта с одним и тем же грунтом, уже смоченным водой в первый раз, необходимо при подъеме уровня

воды открывать зажим трубы  $k$  для выпуска воздуха и держать ее открытой до тех пор, пока в вытекающей через трубку воде не исчезнут пузырьки воздуха.

Необходимое оборудование. Смонтированный капилляриметр имеет следующие детали: стек-

Таблица 27

Форма для записи результатов опытов с капилляриметром

№ опыта	Высота капиллярного поднятия, мм	Примечание
1	360	
2	251	
3	365	

лянная трубка  $d = 2-3$  см, длиной 20—25 см; резиновая пробка  $d = 2-3$  см; 2 стеклянные трубы  $d = 0,8$  см, длиной по 1 м; резиновая трубка  $d = 0,8$  см, длиной 4 м; 3 зажима Горфана; деревянная рейка длиной 1,5—2 м; бутыль с боковым отверстием.

## ТЕМА ШЕСТАЯ

# ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ ГРУНТОВ

Водопроницаемостью грунтов называют способность их пропускать сквозь себя воду.

Численно водопроницаемость характеризуется так называемым коэффициентом фильтрации  $K$ .

Коэффициент фильтрации представляет собой скорость фильтрации при напорном градиенте, равном единице:

$$v = K \cdot I.$$

Выражают коэффициент фильтрации обычно в см/сек или, лучше, в м/сутки.

Для определения коэффициента фильтрации существует целый ряд методов. Эти методы могут быть подразделены на следующие три основные группы:

1. Полевое опытное определение с помощью откачки или нагнетания.

2. Непосредственное лабораторное определение в приборах.

3. Косвенное определение путем вычисления по данным механических анализов и определения пористости грунта.

Наиболее точную характеристику водопроницаемости дают полевые опытные работы.

Лабораторные определения коэффициента фильтрации характеризуют водопроницаемость отдельных «точек» водоносного слоя; при этом более точными являются определения на образцах с ненарушенной структурой и менее точными — на образцах с нарушенной структурой.

Для связных структурных грунтов определения на образцах с нарушенной структурой совершенно не отражают водопроницаемости в естественных условиях.

Наименее точным методом определения коэффициента фильтрации является метод косвенного определения — расчетом по данным механического состава и пористости грунтов, применяемый только для песков.

Этот способ может быть рекомендован только лишь для предварительных ориентировочных расчетов.

## Определение коэффициента фильтрации в приборах

Способы лабораторного определения коэффициента фильтрации в приборах могут быть, в зависимости от характера приборов и методики испытаний, разбиты на две подгруппы. Первую из них составляют те, которые при определении  $K$  не учитывают внешнего давления на грунт.

Сюда относятся способы определения коэффициента фильтрации несвязных грунтов в приборе Тима, трубке Каменского, трубке СПЕЦГЕО и др., а также способ определения коэффициента фильтрации в приборе Тима-Каменского [6] для связных, слабо набухающих грунтов.

Вторую группу составляют те способы, которые при определении коэффициента фильтрации дают возможность учитывать влияние внешнего давления, а также проводить опыты при постоянной пористости для набухающих грунтов. К этой группе относятся способы определения  $K$  в приборах Терцаги, Гуменского [4], Коломенского [9 и 17] и др.

### Задание 17. Определение коэффициента фильтрации в приборе Тима

#### A. Описание прибора

Наиболее распространенным способом определения коэффициента фильтрации песка в лаборатории является испытание в приборе Тима, изображенном на фиг. 25.

Прибор состоит из металлического цилиндра с глухим закрытым дном. В цилиндр вкладывается плотная сетка, укрепленная в железном кольце  $a$  на 5 см выше дна цилиндра. Цилиндр имеет три боковые трубы  $b$ , к которым присоединяются стеклянные трубы  $e$ , служащие для измерения пьезометрического уровня воды в соответствующих сечениях цилиндра. Выше их, у верхнего края цилиндра, с другой стороны имеется еще одна боковая трубка  $c$ , служащая для стока воды. Такая же трубка  $d$  имеется в нижней части цилиндра под сеткой. К ней присоединяется резиновая трубка с приспособлениями, служащими сначала для насыщения песка водой, а затем во время опытов для регулирования напора и для стока фильтрующей воды.

#### B. Загрузка прибора

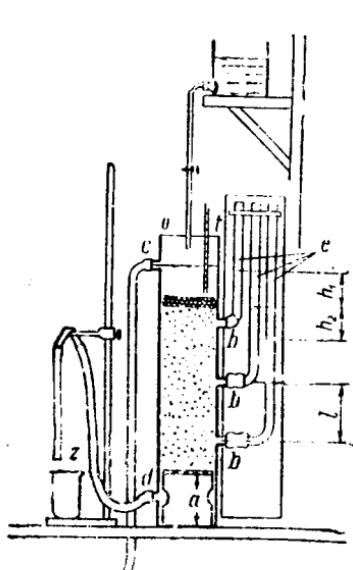
При загрузке прибора для возможного приближения к естественному состоянию песка в водоносном пласте следует соблюдать два основных условия: равномерное уплотнение всей колонны песка и наиболее совершенное насыщение его водой. Для достижения указанных условий рекомендуется следующий порядок операций:

1. К нижней боковой трубке (фиг. 26) присоединить резиновую трубку с тройником  $t$  на конце (длина этой трубы должна быть достаточной при подъеме тройника до верха прибора).

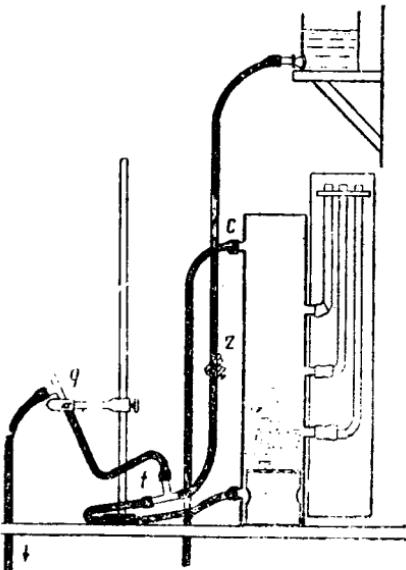
2. К одному концу тройника присоединить резиновую трубку, идущую от резервуара с водой, а к другому концу — резиновую трубку с другим тройником  $q$  (или обрезную трубку с отверстием в изгибе). 2-й тройник (или обрезную трубку) закрепить на штативе, так чтобы его можно было передвигать снизу вверх (от уровня основания загружаемой песчаной колонны до ее верха) для регулирования напора.

Для регулирования поступления воды следует на трубку, идущую от резервуара, надеть зажим Гофмана  $z$ .

3. Перед заполнением прибора песком необходимо положить на дно прибора кольцо с сеткой, покрытое марлей, а нижнюю



Фиг. 25. Прибор Тима для определения коэффициента фильтрации.



Фиг. 26. Установка прибора Тима при загрузке.

часть прибора заполнить водой, для чего регулирующую обрезную трубку (или тройник) закрепить на штативе на уровне сетки или буферного слоя в приборе<sup>1</sup>.

4. Испытуемый грунт тщательно перемешать и насыпать небольшими порциями на сетку или буфер, следя за тем, чтобы песок распределялся равномерно по площади цилиндра. Засыпку производить с небольшой высоты, высыпая грунт почти над поверхностью предшествующей загрузки. Насыпав в цилиндр 2—3 см грунта, следует произвести его уплотнение при помощи де-

<sup>1</sup> В случае если пески глинистые, следует на сетку предварительно загрузить буферный слой из нескольких слоев песка возрастающей вниз крупности.

ревянной трамбовки. Трамбование совершать лишь весом самой трамбовки, приподнимаемой на 3—5 см над песком.

Насыщение песка водой необходимо производить по возможности путем капиллярного поднятия; появления воды сверху над песком во время загрузки допускать нельзя.

6. Во время насыщения необходимо наблюдать за наполнением водой пьезометрических трубок и следить за тем, чтобы в их нижних коленах не задерживался воздух. Для этого следует после появления воды в трубках удалять пузырьки воздуха, сжимая соединительную резиновую трубку. Пузырьки воздуха можно удалить также наклоняя весь прибор в сторону, обратную от пьезометрических трубок.

7. Загрузку песка производить до тех пор, пока не будет закрыто последнее верхнее отверстие для пьезометра.

8. Сверху песка насыпать слой гравия в 2—3 см толщиной для предохранения песка от размыва водой.

9. По окончании загрузки повысить несколько напор, чтобы вода появилась над поверхностью песка. С этой целью V-образную трубку необходимо поднять несколько выше уровня верхней боковой трубы и закрепить в таком положении стопорным винтом на штативе.

Трубку с другим тройником удалить совсем и прекратить подачу воды снизу. Трубку, идущую от резервуара с водой, временно зажать зажимом, перенести на верх прибора, снабдить на конце короткой коленчатой трубкой и пустить воду.

При описанной выше перестановке трубок очень важно следить за тем, чтобы через нижнюю трубку не вытекала вода из прибора и в прибор не попадал воздух.

10. После наполнения прибора до верхней боковой трубы с, из которой будет стекать избыток воды, установить с помощью зажима очень слабый ток воды, необходимый лишь для поддержания уровня на одной высоте. При этом через сточную трубку с вода может стекать каплями или слабой струйкой.

## В. Производство опытов

11. Прежде чем приступить к опытам, необходимо проверить, правильно ли работают пьезометры. При описанном выше положении регулирующей трубы с тройником  $t$ , когда вода находится в покое, уровни воды в пьезометрических трубках должны установиться на одной высоте.

В случае более или менее хорошо проницаемого песка это произойдет довольно быстро — через несколько минут; в случае же слабо проницаемого грунта уровни устанавливаются очень медленно — иногда приходится ждать несколько часов.

Лучше всего после загрузки прибора к опытам приступать не сразу, а через несколько часов или на следующий день.

12. После установления одинаковых показаний по всем пьезометрическим трубкам можно приступить к опытам. Для этого

необходимо опустить регулирующую трубку на несколько сантиметров ниже уровня воды в приборе, или (что то же самое), верхней боковой трубы для стока, в результате чего создается некоторый напорный градиент, под влиянием которого будет происходить фильтрация воды с соответствующей скоростью.

13. Для измерения напорного градиента производить наблюдения за показанием пьезометрических трубок до тех пор, пока в них не установится постоянный уровень.

Наблюдения необходимо фиксировать в журнале по ниже помещаемой форме (табл. 28).

Таблица 28

Журнал наблюдений за пьезометрическими трубками  
в приборе Тима

№ опыта	Время	Показания трубок			Разница уровней, см	Среднее, см	$t^{\circ}$ С			Примечание
		1	2	3			1—2	2—3	h	
1	9 ч. 10 м.	46,2	44,2	42,2	2,0	2,0	17,0	15,0	16,0	
	9 " 15 "	46,2	44,2	42,2	2,0	2,0	17,0	15,0	16,0	
	9 " 23 " 40 с.	46,2	44,2	42,2	2,0	2,0	17,0	15,0	16,0	
2	10 : 05 "	45,1	40,5	36,3	4,6	4,2	4,4	16,0	16,0	16,0
	10 " 10 "	45,1	40,5	36,3	4,6	4,2	4,4	16,0	16,0	16,0
	10 " 13 " 20 с.	45,0	40,0	36,3	4,6	4,1	4,35	16,0	16,0	16,0

Первую запись произвести тогда, когда на глаз вода в трубках займет стационарное положение.

Вторую запись произвести через пять минут после первой. Если при этом уровень окажется тот же, что и при первой записи, то можно приступить к измерению расхода фильтрующейся воды. Если же уровень воды изменится, то надо продолжать наблюдения, повторяя записи через каждые пять минут, и делать это до тех пор, пока уровень воды в трубках не займет стационарного положения.

14. По достижении стационарного состояния произвести измерение расхода воды при помощи какого-нибудь мерного сосуда, например мензурки и секундомера.

15. После измерения расхода воды снова записать показания трубок. Если результаты записи до и после измерения расхода воды окажутся одинаковыми, это явится показателем стационарного состояния уровня воды во время опыта. Если же трубы покажут изменение уровня, то в случае большой величины изменения необходимо опыт повторить, в случае же малой величины изменения (не более 2—3 мм) можно при вычислении взять среднее из двух показаний.

## Расчет коэффициента фильтрации по данным опытов в приборе Тимса

Внутренний диаметр прибора  $d = 8,8 \text{ см}$ . Площадь сечения фильтрующей колонны  $F = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 61 \text{ см}^2$ . Расстояние между пьезометрическими трубками по оси прибора  $l = 10 \text{ см}$ .

№	Количество воды $\omega$ , $\text{см}^3$	Время $T$ , $\text{сек.}$	Расход $Q = \frac{\omega}{T}$ , $\text{см}^3/\text{сек.}$	Скорость фильтрации $v = \frac{Q}{F}$ , $\text{см}/\text{сек}$	Разность уровней воды $h$	Напорный градиент $J = \frac{h}{l}$	Коэффициент фильтрации $K = \frac{v}{J}$ , $\text{см}/\text{сек}$		Коэффициент температурного коэффициента $\zeta$	Коэффициент фильтрации при $10^\circ\text{C}$ $K_{10} = \frac{K}{\zeta}$ , $\text{см}/\text{сек}$	Примечание
							Коэффициент фильтрации	Температурный коэффициент			
1	111,0	520	0,210	0,0034	2,0	0,20	0,0170	16,0	1,18	0,0144	
2	93,0	200	0,460	0,0077	4,4	0,44	0,0175	16,0	1,18	0,0148	

16. После замера расхода воды и взятия контрольных отсчетов по пьезометрическим трубкам опыт повторить при других напорах, величина которых регулируется положением трубы.

Целесообразно держаться следующего порядка изменения напора:

а) начать определения с минимальных величин падения напора (1—2 см);

б) дойти до максимально возможных в данном приборе градиентов и снова повторить опыты с убывающими напорами, заканчивая их минимальными.

17. Во время опыта необходимо производить замеры температуры воды. При этом если последняя значительно отличается от температуры воздуха, то необходимо измерять температуру воды в двух местах: при входе воды в грунт (вверху) и при выходе воды, профильтировавшейся через грунт (внизу). В последнем случае для вычисления коэффициента берется среднее арифметическое из двух замеренных температур.

18. По величине температуры вычислить для каждого опыта температурную поправку:

$$\zeta = 0,7 + 0,03t,$$

где  $t$  — температура воды при опыте.

19. По данным каждого опыта произвести расчет коэффициента фильтрации (табл. 29).

20. Подсчитанные коэффициенты фильтрации привести к температуре  $10^\circ\text{C}$ , пользуясь температурной поправкой.

**Необходимое оборудование:** прибор Тима с пьезометрическими трубками, 2 термометра, мерный стакан, секундомер, резервуар с водой (стеклянная бутыль или металлический бачок), деревянная трамбовка.

### Задание 18. Определение коэффициента фильтрации в трубке Каменского

Если в трубку, к которой снизу прикреплена сетка, загрузить песок (с одновременным насыщением его водой), а затем наполнить трубку водой доверху и дать возможность свободного истечения просачивающейся сверху вниз воде, то уровень воды в трубке будет падать, а вместе с ним будут уменьшаться действующий напор и скорость фильтрации.

При одинаковой площади сечения трубы по всей ее длине скорость фильтрации  $v$  в каждый момент времени  $t$  будет равна скорости падения уровня воды в трубке

$$v = \frac{ds}{dt},$$

где  $ds$  — падение уровня за промежуток времени  $dt$ .

По формуле Дарси для этого случая можно написать уравнение:

$$v = KJ = K \frac{h_0 - s}{l},$$

где  $K$  — коэффициент фильтрации;

$h_0$  — первоначальная высота напора;

$l$  — путь фильтрации (высота столба песка в трубке).

Приравнивая правые части этих уравнений, получим

$$\frac{ds}{dt} = K \frac{h_0 - s}{l},$$

откуда

$$\frac{ds}{h_0 - s} = \frac{K}{l} \cdot dt.$$

Интегрируем это уравнение в пределах от 0 до  $s$  и от 0 до  $t$

$$\int_0^s \frac{ds}{h_0 - s} = \frac{K}{l} \int_0^t dt;$$

$$-\ln\left(\frac{h_0 - s}{h_0}\right) = K \frac{t}{l}.$$

Отсюда

$$K = -\frac{l}{t} \ln\left(1 - \frac{s}{h_0}\right)$$

или, обозначая  $-\ln\left(1 - \frac{s}{h_0}\right)$  через  $\varphi\left(\frac{s}{h_0}\right)$ , получим формулу в окончательном виде

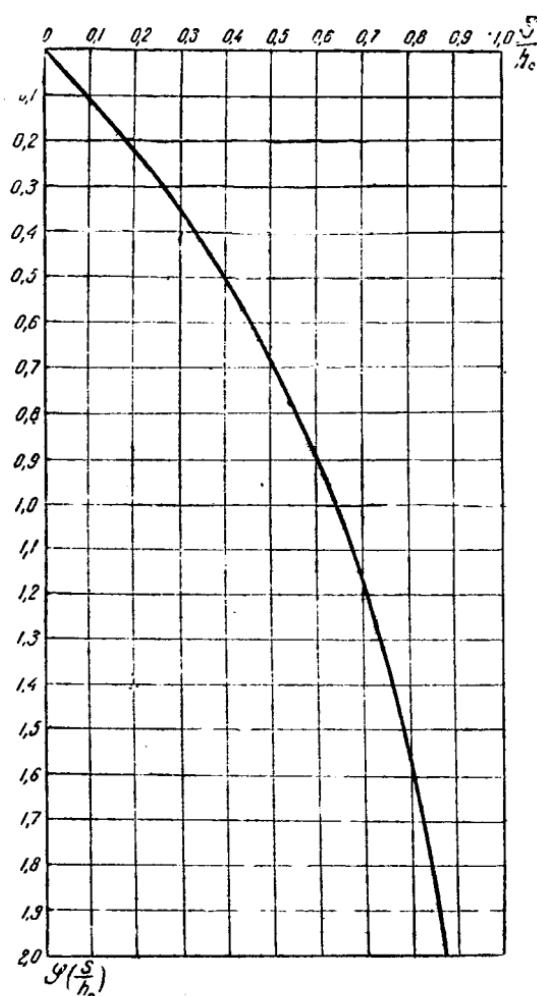
$$K = \frac{l}{t} \varphi\left(\frac{s}{h_0}\right).$$

Таблица 30

Значения функций  $\varphi\left(\frac{s}{h_0}\right) = -\ln\left(1 - \frac{s}{h_0}\right)$  (к опытам в трубке Каменского)

$\frac{s}{h_0}$	$\varphi\left(\frac{s}{h_0}\right)$	$\Delta$	$\frac{s}{h_0}$	$\varphi\left(\frac{s}{h_0}\right)$	$\Delta$	$\frac{s}{h_0}$	$\varphi\left(\frac{s}{h_0}\right)$	$\Delta$
0,00	—	—	0,33	0,400	—	0,67	1,109	—
0,00	—	—	0,34	0,416	—	0,68	1,139	—
0,01	0,010	—	0,35	0,431	—	0,69	1,172	0,031
0,02	0,020	0,010	0,36	0,446	0,015	0,70	1,204	0,032
0,03	0,030	0,010	0,37	0,462	0,016	0,71	1,238	0,034
0,04	0,040	0,010	0,38	0,478	0,016	0,72	1,273	0,035
0,05	0,051	0,010	0,39	0,494	0,016	0,73	1,309	0,035
0,06	0,062	0,011	0,40	0,510	0,016	0,74	1,347	0,038
0,07	0,073	0,010	0,41	0,527	0,017	0,75	1,386	0,039
0,08	0,083	0,010	0,42	0,545	0,018	0,76	1,427	0,041
0,09	0,094	0,011	0,43	0,562	0,017	0,77	1,470	0,043
0,10	0,105	0,011	0,44	0,580	0,018	0,78	1,514	0,044
0,11	0,117	0,012	0,45	0,598	0,018	0,79	1,561	0,047
0,12	0,128	0,011	0,46	0,616	0,018	0,80	1,609	0,048
0,13	0,139	—	0,47	0,635	0,019	0,81	1,661	0,052
0,14	0,151	—	0,48	0,654	0,019	0,82	1,715	0,054
0,15	0,163	0,012	0,49	0,673	0,019	0,83	1,771	0,056
0,16	0,174	—	0,50	0,693	0,020	0,84	1,828	—
0,17	0,186	—	0,51	0,713	0,020	0,85	1,897	0,064
0,18	0,196	0,012	0,52	0,734	0,021	0,86	1,966	0,069
0,19	0,210	0,012	0,53	0,755	0,021	0,87	2,040	0,074
0,20	0,223	0,013	0,54	0,777	0,022	0,88	2,120	0,080
0,21	0,236	—	0,55	0,799	0,022	0,89	2,207	0,087
0,22	0,248	0,012	0,56	0,821	0,022	0,90	2,303	0,096
0,23	0,261	0,013	0,57	0,844	0,023	0,91	2,408	0,105
0,24	0,274	0,013	0,58	0,868	0,024	0,92	2,526	0,118
0,25	0,288	0,013	0,59	0,892	0,024	0,93	2,659	0,133
0,26	0,301	—	0,60	0,916	0,024	0,94	2,813	0,154
0,27	0,315	—	0,61	0,941	0,025	0,95	2,996	0,183
0,28	0,329	0,014	0,62	0,957	0,026	0,96	3,219	0,223
0,29	0,346	—	0,63	0,994	0,027	0,97	3,507	0,298
0,30	0,357	—	0,64	1,022	0,028	0,98	3,912	0,405
0,31	0,371	0,014	0,65	1,050	0,028	0,99	4,605	0,693
0,32	0,385	0,014	0,66	1,079	0,029	—	—	—
	—	0,015	—	—	0,030	—	—	—

Для удобства вычислений проф. Каменским составлена таблица (табл. 30) и график (фиг. 27) ряда значений  $\varphi\left(\frac{s}{h_0}\right)$ ,



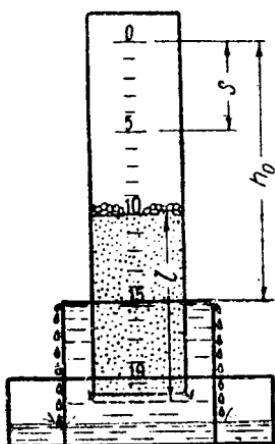
Фиг. 27. График величины  $\varphi\left(\frac{s}{h_0}\right)$ .

На нижнем конце трубки с помощью металлического кольца укрепляется сетка. Сетка в случае необходимости может быть заменена обвязкой из марли.

которыми следует пользоваться при вычислении коэффициента фильтрации.

#### А. Описание прибора

Прибор в простейшем случае состоит из стеклянной трубы



Фиг. 28. Установка трубы Каменского при фильтрации.

диаметром 2—4 см и длиной около 25 см.

На трубке нанесены деления через 1 см, расположенные сверху вниз, как показано на фиг. 28.

#### Б. Загрузка прибора

1. Установить трубку в банку высотой 20—25 см, куда по мере наполнения трубы песком понемногу добавлять воды.

Таблица 31

Форма для записи данных определения коэффициента фильтрации в трубке Каменского

№ опыта	Краткое описание грунта	Перво- началь- ный напор $h_0$ , см	Гадение время $t$ , см	$\frac{s}{h_0}$	$\varphi\left(\frac{s}{h_0}\right)$	Коэффициент фильтрации $K = \frac{l}{t} \varphi\left(\frac{s}{h_0}\right)$ , см/сек	Темпера- тура опыта $T$ , °C	Темпера- турный коэффициент $\tau = 0,7 + 0,03 \cdot T$	Коэффициент фильтрации при 10°C $K_{10} = \frac{K}{\tau}$
1	Мелко- зернистый песок	19	3	540	0,159	0,173	10	0,0032	16
2		19	5	960	0,265	0,318	10	0,0031	16
		10	3	1110	0,3	0,357	10	0,0032	15
		10	5	2160	0,5	0,693	10	0,0032	15

2. Наполнение трубки песком производить осторожно, небольшими порциями, слегка уплотняя его легкой деревянной трамбовкой.

3. Трубку наполнить песком до высоты 10 см (считая от дна). Когда песок будет весь насыщен водой, добавить в банку такое количество воды, чтобы, просочившись под напором снизу, она образовала над песком слой в 1—2 см.

4. Над песком насыпать слой гравия в 1—2 см для предохранения песка от размытия.

#### В. Производство опытов

5. По окончании вышеуказанных операций трубку наполнить водой сверху и сейчас же установить на уровне глаз на небольшой подставке в наполненный водой стакан высотой менее той высоты, до которой предполагается наблюдать падение уровня в трубке.

Стакан вместе с трубкой поместить в широкий, низкий цилиндр, куда будет собираться вода, переливающаяся через края стакана по мере падения уровня в трубке.

6. Секундомером отметить момент прохода мениска воды в трубке через нулевое деление, а затем момент прохода его через ряд ниже следующих делений (для малопроницаемых песков можно ограничиться близкими делениями, например в 2—3 см, а для хорошо фильтрующих — большими делениями).

Данные занести в таблицу по ниже помещаемой форме (табл. 31).

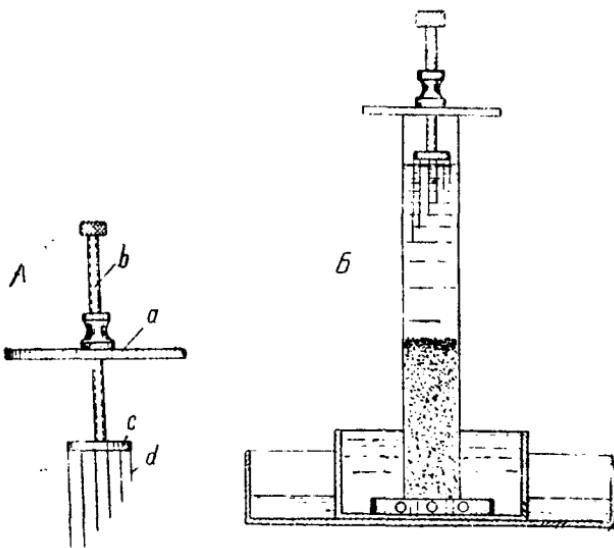
7. Для проверки опыта трубку вновь наполнить водой и повторить наблюдения.

В случае совпадения результатов наблюдений полученные данные

использовать для вычисления коэффициента фильтрации. В противном случае опыт необходимо повторить.

8. Для уничтожения возможных субъективных ошибок при отсчетах по делениям, наносимым на трубку, в лаборатории грунтоведения МГРИ сконструирован специальный прибор (фиг. 29, А).

Прибор состоит из диска *a*, сквозь который проходит винт *b*, несущий на своем конце второй диск *c*. К последнему диску по его окружности прикреплено шесть стальных тонких проволочек *d*, отличающихся одна от другой своей длиной (каждая длиннее соседней на 1 см).



Фиг. 29. *A* — прибор МГРИ для отсчета падения уровня;  
*B* — прибор МГРИ в рабочем положении.

При работе прибор устанавливается на трубке с помощью диска *a* и винта *b* на требуемую высоту от грунта. Отсчет скорости падения уровня воды в трубке отмечается по моментам отрыва уровня воды от конца проволочек. Общий вид установки описанного прибора при работе с трубкой указан на фиг. 29, *B*.

9. Опыт произвести при 2—3 значениях величины начального напора  $h_0$ . Последний можно менять, устанавливая трубку на различной высоте с помощью подставок, вкладываемых в стакан.

10. Одновременно с наблюдением за падением уровня произвести замеры температуры воды.

Пример расчета коэффициента фильтрации по данным опыта в трубке Каменского.

Первоначальный напор  $h_0 = 19$  см. За время  $t = 540$  сек. уровень упал на  $s = 3$  см и за  $t = 960$  сек. — на  $s = 5$  см.

Мощность фильтрующего песка в трубке  $l = 10$  см. Температура воды при опыте  $t^\circ = 16^\circ$  С.

а) Определяем отношение

$$\frac{s}{h_0} = \frac{3}{19} = 0,159.$$

б) По табл. 30 находим, что значению

$$\frac{s}{h_0} = 0,159$$

соответствует

$$\varphi\left(\frac{s}{h_0}\right) = 0,173,$$

откуда

$$K = \frac{l}{t} \varphi\left(\frac{s}{h_0}\right) = \frac{10}{540} \cdot 0,173 = 0,0032 \text{ см/сек.}$$

в) Температурный коэффициент

$$\tau = 0,7 + 0,03 T = 0,7 + 0,03 \cdot 16 = 1,18.$$

г) Коэффициент фильтрации при  $t^\circ = 10^\circ$  С

$$K_{10} = \frac{0,0032}{1 \cdot 18} = 0,0027 \text{ см/сек.}$$

д) Аналогичным образом найдем, что при  $s = 5$  см

$$K_{10} = 0,0026 \text{ см/сек.}$$

Описанный способ отличается чрезвычайной простотой оборудования и экспериментирования. Недостатками его являются:

- проведение опытов при переменном градиенте больше 1;
- некоторая сложность расчетов или необходимость применения специальных таблиц.

### Задание 19. Определение коэффициента фильтрации в трубке СПЕЦГЕО

Определение фильтрационных свойств песчаных грунтов может быть произведено в трубке СПЕЦГЕО (автор. инж. Симонов).

Трубка СПЕЦГЕО (фиг. 30) состоит из четырех частей: основной трубы 5, нижней крышки 1 с сеткой 3, верхней крышки 2 и стеклянного мерного цилиндра 4.

Мерный цилиндр снабжен шкалой с ценой деления, равной 1 см<sup>3</sup>.

Ход определения следующий:

- Заполнить трубку 5 испытуемым грунтом. Если требуется определить коэффициент фильтрации с ненарушенной структурой, то трубка непосредственно задавливается в грунт.

- Произвести постепенное замачивание грунта в трубке снизу вверх.

3. Заполнить мерный цилиндр водой, опрокинуть над трубкой и укрепить в верхней крышке так, чтобы горлышко его отстояло от поверхности грунта в трубке приблизительно на 0,5—1 м.м. В таком виде мерный цилиндр будет автоматически поддерживать над образцами постоянный уровень воды.

Как только вследствие просачивания воды через образец этот уровень понизится, в мерный цилиндр прорвется пузырек воздуха, и соответствующее количество воды выйдет из него. Этим достигается постоянство градиента, численное значение которого равно 1, так как в данном случае напор равен длине пути фильтрации.

4. Если после установки цилиндра в него прорываются крупные пузырьки воздуха, это свидетельствует о том, что горлышко цилиндра отстоит на значительном расстоянии от поверхности грунта. В этом случае необходимо посадить немного глубже цилиндр и добиться, чтобы через воду в мерном сосуде поднимались мелкие пузырьки воздуха, следующие на одинаковом расстоянии один за другим.

5. По достижении указанного режима заметить по шкале уровень воды в мерном цилиндре, пустить секундомер и через определенное время (50—100 сек. для среднезернистых грунтов, 250—500 сек. для глинистых песков) заметить второй уровень.

6. По данным опыта подсчитать коэффициент фильтрации по формуле<sup>1</sup>

$$K = \frac{Q}{T \cdot F} \text{ см/сек},$$

где  $Q$  — количество профильтровавшейся за время  $T$  воды (в  $\text{см}^3$ );

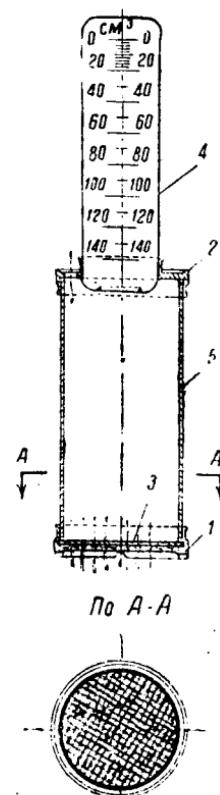
$T$  — время (в сек.);

$F$  — площадь поперечного сечения трубы (в  $\text{см}^2$ ).

7. Опыт повторить несколько раз. Данные занести в таблицу (табл. 32) и по ним вычислить среднее значение коэффициента фильтрации.

<sup>1</sup> Обычно на мерном цилиндре нанесена вторая шкала, деления которой равны отношению объема к площади поперечного сечения трубы. По этой шкале коэффициент фильтрации определяется непосредственным отсчетом за время 100 сек.

Например: начальный уровень в цилиндре был на делении 1,5; через 100 сек. уровень воды опустился до деления 2,7, откуда коэффициент фильтрации  $K = \frac{2,7 - 1,5}{100} = 0,012 \text{ см/сек.}$



Фиг. 32. Трубка СПЕЦГЕО для определения коэффициента фильтрации.

Таблица 32

**Форма для записи данных определения коэффициента фильтрации  
в трубке СПЕЦГЕО**

Площадь поперечного сечения трубы  $F = 28 \text{ см}^2$

№ опыта	Краткое описание грунта	Время, сек.	Расход, $\text{см}^3$	Коэффициент фильтрации, $\text{см}/\text{сек}$	Средний коэффициент фильтрации, $K_{ср}$	Примечание
		$T$	$Q$	$K$	$K_{ср}$	
1	Мелкозернистый песок	170	10	0,0021		
2		282	15	0,0019		
3		286	20	0,0025	0,0022	$t^\circ = 17^\circ$

**Необходимое оборудование:** трубка СПЕЦГЕО, секундомер.

**Задание 20. Определение коэффициента фильтрации по эмпирическим формулам**

Из эмпирических формул для вычисления коэффициента фильтрации наибольшее применение в практике получили формулы Газена, Слихтера, Крюгера, Цункера, Козени и Терцаги.

Все эти формулы могут применяться лишь для песков.

Определение коэффициента фильтрации связных грунтов по механическому составу, следует признать неправильным, так как водопроницаемость связных грунтов зависит от их естественной структуры не в меньшей степени, чем от механического состава.

Эмпирические формулы также не применимы для определения коэффициента фильтрации гравелистых и галечниковых пород, так как здесь на степень водопроницаемости их влияет характер заполнения крупных пор мелким материалом.

Ниже приводятся некоторые наиболее употребительные на практике формулы, а также nomограммы Биндермана для ускорения вычислений по ним (фиг. 31, 32 и 33).

**A. Формула Газена**

$$K = C \cdot d_{ef}^2 (0,7 + 0,03T) \text{ м/сутки.}$$

Здесь  $C$  — эмпирический коэффициент чистоты и однородности песков (для чистых и однородных песков принимается от 1200 до 800, для загрязненных глинистых и неоднородных песков — от 800 до 400);

$d_{ef}$  — действующий диаметр, определяемый графически;

$T$  — температура ( $^\circ\text{C}$ ).

Применимость формулы Газена ограничена. Эта формула применима лишь для песков с действующим диаметром от 0,1 до 3,0 мм и коэффициентом неоднородности  $\frac{d_{60}}{d_{ef}} < 5$ .

Формула Газена имеет следующие недостатки: ею совсем не учитывается пористость и мало учитывается (достаточно произвольным изменением коэффициента С) степень однородности песков.

Тем не менее получающиеся при пользовании формулой Газена ошибки для более или менее чистых мелкозернистых песков (в указанных выше границах применения формулы) сравнительно невелики.

Часто коэффициент С принимают равным 864 (что близко к средней его величине). Тогда формула при  $T = 10^\circ\text{C}$  получает следующий еще более упрощенный вид:

$$K = d_{ef}^2 \text{ см/сек.}$$

### *Определение K по номограмме для формулы Газена*

1. По данным механического анализа вычертить суммарную кривую, определить  $d_{ef}$  и  $d_{60}$  и проверить возможность применения формулы Газена для песка данного состава.

2. На горизонтальной оси номограммы (фиг. 31) найти точку, отвечающую найденному значению  $d_{ef}$ .

3. Из этой точки провести вертикаль до пересечения ее с кривой принятого для данного грунта значения С.

4. Найденную точку спроектировать на вертикальную рейку в левой части номограммы и прочитать значение искомого коэффициента фильтрации К.

Пример. Действующий диаметр  $d_{ef} = 0,17$ ; коэффициент С = 800.

Найдя на горизонтальной оси точку 0,17, восстанавливаем перпендикуляр до кривой С = 800. Точку пересечения переносим на вертикальную рейку и отсчитываем там значение коэффициента фильтрации, равное 16,3 м/сутки.

### **Б. Формула Слихтера**

$$K = 496 \cdot M \cdot d_{ef}^2 \text{ м/сутки.}$$

Здесь М — величина, зависящая от пористости;

$d_{ef}$  — действующий диаметр.

Пределы применимости формулы Слихтера определяются действующими диаметрами от 0,01 до 5,00 мм.

Формула Слихтера также не отражает степени однородности песков. Кроме этого, нет точных указаний автора относительно метода определения действующего диаметра. Обычно на практике вычисляют действующий диаметр так же, как для формулы Газена.

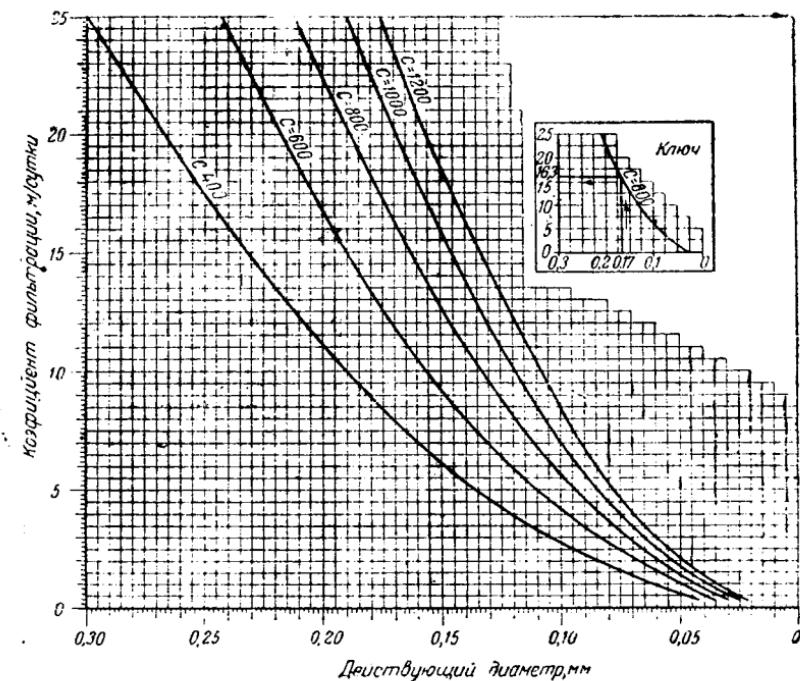
Значения  $M$  берут в зависимости от пористости (табл. 33).

Таблица 33

Зависимость коэффициента  $M$  от пористости

Пористость	$M$	Пористость	$M$	Пористость	$M$	Пористость	$M$
0,26	0,01187	0,37	0,03808	0,32	0,02356	0,43	0,06267
0,27	0,01350	0,38	0,04154	0,33	0,02601	0,44	0,06776
0,28	0,01517	0,30	0,04524	0,34	0,02878	0,45	0,07295
0,29	0,01684	0,40	0,04922	0,35	0,03163	0,46	0,07838
0,30	0,01905	0,41	0,05339	0,36	0,03473	0,47	0,08455
0,31	0,02122	0,42	0,05789				

Формула Слихтера дает результаты, более или менее близкие к экспериментальным значениям коэффициента фильтрации для среднезернистых и отчасти крупнозернистых песков.

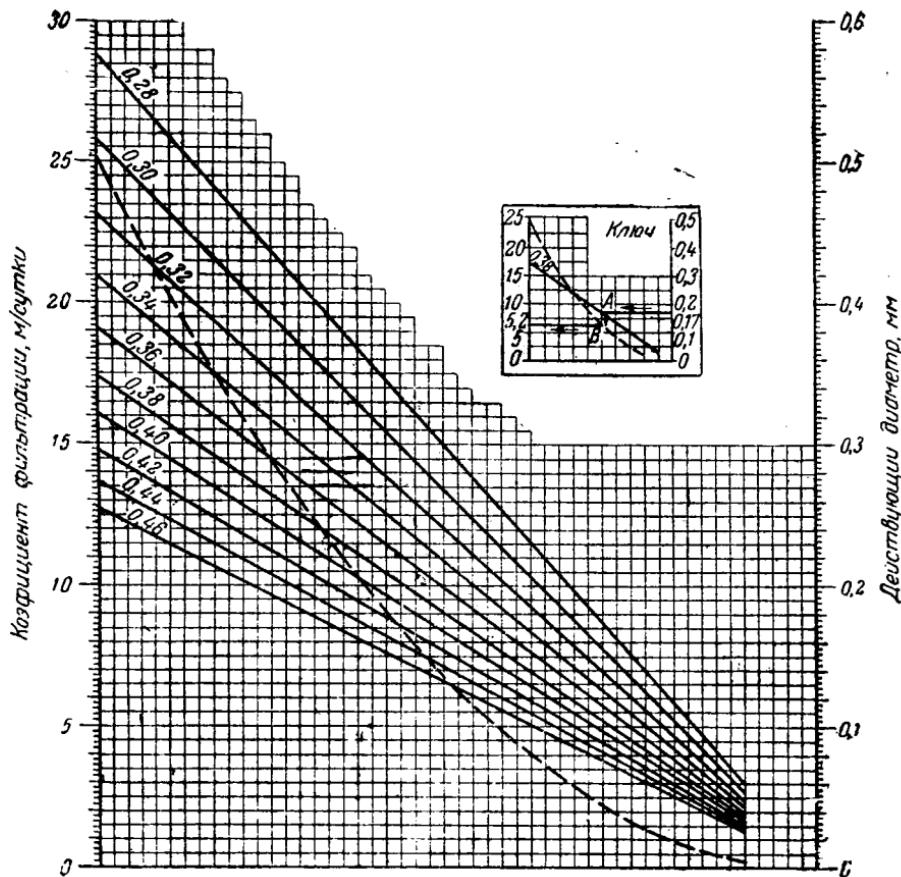


Фиг. 31. Номограмма для определения коэффициента фильтрации по формуле Газена.

Для массовых расчетов коэффициента фильтрации по формуле Слихтера рекомендуется пользоваться номограммой Биндемана.

## Определение $K$ по номограмме для формулы Слихтера

1. По данным механического анализа определить  $d_{ef}$ .
2. На правой вертикальной рейке номограммы (фиг. 32) найти точку, отвечающую значению  $d_{ef}$ .
3. Из этой точки провести горизонтальную линию до пересечения с прямой, отвечающей пористости грунта.



Фиг. 32. Номограмма для определения коэффициента фильтрации по формуле Слихтера.

4. Из точки пересечения опустить перпендикуляр до пересечения с пунктирной кривой.
5. Найденную на пунктирной кривой точку спроектировать на левую вертикальную рейку и прочитать значение искомого коэффициента фильтрации  $K$ .

Пример. Действующий диаметр  $d_{ef} = 0,17$ ; пористость 0,38. Проводим горизонтальную линию от точки 0,17 до пересечения

е с прямой 0,38. Из найденной точки опускаем перпендикуляр до пересечения его с пунктирной кривой. Точку пересечения перпендикуляра с пунктирной кривой сносим на левую вертикальную рейку, где и находим значение  $K = 5,8$  м/сутки.

### В. Формула Крюгера

$$K = 240 \frac{n}{(1-n)^2} d_q^2 \text{ м/сутки.}$$

В этой формуле  $n$  — пористость;

$d_q$  — действующий диаметр грунта по Крюгеру (в мм),

Действующий диаметр определяется Крюгером по следующей вспомогательной формуле:

$$\frac{1}{d_q} = \frac{q_1}{d_1} + \frac{q_2}{d_2} + \frac{q_3}{d_3} + \dots + \frac{q_n}{d_n},$$

где  $q_1; q_2; q_3$  и т. д. — соответствующие весовые доли участия отдельных фракций в составе грунта;

$d_1; d_2; d_3$  и т. д. — соответствующие средние диаметры частиц в пределах фракций.

При определении действующего диаметра Крюгер принимает во внимание весь механический состав грунта, отражая его величиной суммарной (удельной) поверхности частиц.

Под последней понимается поверхность всех частиц грунта в 1 см<sup>3</sup> грунта, выраженная в квадратных сантиметрах. Суммарную поверхность  $\Theta$  можно найти по формуле

$$\Theta = \frac{6(1-n)}{d_q}.$$

Формула Крюгера дает наилучшие результаты для среднезернистых песков.

### Определение $K$ по номограмме для формулы Крюгера

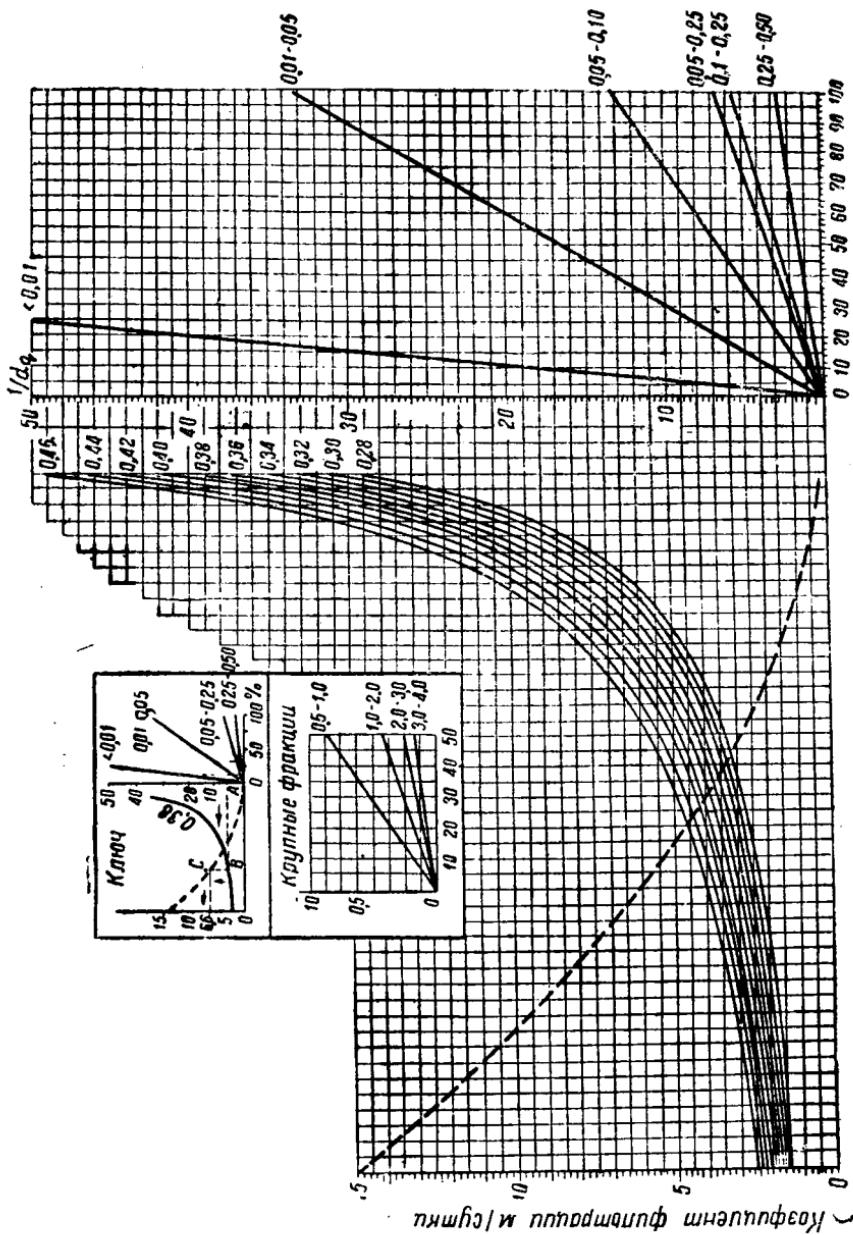
1. Найти обратную величину действующего диаметра

$$\left(\frac{1}{d} = \sum \frac{q}{d}\right).$$

Для этого необходимо в правой части номограммы (фиг. 33) от точек, лежащих на оси и выражающих процент содержания фракций, восстановить перпендикуляр до пересечения с прямыми линиями, отвечающими соответствующим фракциям. Длина каждого отрезка ординат, исчисленная в масштабе оси ординат, выражает соответствующее значение величины  $\frac{q}{d}$ , а следовательно сумма ординат будет равна значению величины, обратной действующему диаметру.

Если некоторым фракциям отвечает небольшой процент содержания, затрудняющий взятие отсчета, то тогда следует опре-

делить ординату для процентного содержания данной фракции, умноженного на 10 (или на 100), и полученную ординату арифметически уменьшить на 10 (или на 100).



Фиг. 33. Номограмма для определения коэффициента фильтрации по формуле Крингера.

Для крупнозернистых фракций дается дополнительная номограмма, вертикальный масштаб которой увеличен в 10 раз по

сравнению с основной номограммой. Это следует учесть при суммировании данных путем соответствующего деления значений ординат, полученных по дополнительной номограмме. При малом проценте содержания крупных фракций ими можно пренебречь, так как незначительная примесь крупных фракций оказывает ничтожное влияние на величину суммарной поверхности частиц грунта.

С этой же точки зрения допустимо округлять значение суммированной величины до 0,1.

2. После определения значения величины, обратной действующему диаметру, перейти к левой части номограммы.

От точки, отвечающей значению суммы ординат, провести влево горизонтальную линию до пересечения ее с одной из кривых, отражающих влияние пористости.

Полученную точку пересечения снести по вертикали на пунктирную кривую, а затем спроектировать полученную на пунктирной кривой новую точку на вертикальную шкалу левой части номограммы, где и сделать отсчет искомого значения коэффициента фильтрации  $K$ .

Пример. Определить коэффициент фильтрации  $K$  песка при пористости  $n = 0,38$  и следующем механическом составе:

Диаметр, м.м	Содержание, %
<0,01	1
0,01—0,05	3
0,05—0,25	11
0,25—0,50	80
0,50—1,0	5

Определяем значение величины  $\frac{1}{d_q}$  по правой части номограммы. При этом, учитывая малые проценты содержания первой, второй и последней фракций, определяем значение их ординат, соответствующее десятикратному содержанию фракций. Ординаты третьей и четвертой фракций определяем непосредственно. Для фракций 0,50—1,0 пользуемся дополнительной номограммой. Поэтому при определении действительной ординаты вводим второй делитель 10.

В результате имеем:

Фракции, м.м	Ордината, умноженная на 10	Действительная ордината
<0,01	19,5	$19,5 : 10 = 1,95$
0,01—0,05	10,0	$10,0 : 10 = 1,00$
0,05—0,25	—	—
0,25—0,50	—	—
0,50—1,00	0,67	$0,67 : 10 : 10 = 0,0067$

Сумма ординат или округления	5,9567
	6

От точки  $A$ , отвечающей сумме ординат 6, проводим горизонтальную линию влево до пересечения ее с кривой, соответствующей пористости 0,38, где получаем точку  $B$ .

Проводим затем вертикальную линию от этой точки до пунктирной кривой, где получаем точку  $C$ .

Последнюю проектируем на вертикальную ось левой части номограммы и находим значение коэффициента фильтрации, равное 6,6 м/сутки.

#### Г. Температурная поправка

При номографировании все значения коэффициента фильтрации  $K$  приведены к температуре  $t^{\circ} = 0^{\circ}$  С.

Для пересчета  $K$  на другие температуры для всех формул, кроме Газена, следует пользоваться температурной поправкой по формуле Пуазейля (формула 32, приложение II).

В табл. 34 даны численные значения температурных поправок по отношению к значению поправки для  $0^{\circ}$ , принятой за единицу.

Таблица 34

#### Температурные поправки $r$ (по Пуазейлю)

$t^{\circ}$	$r$	$t^{\circ}$	$r$	$t^{\circ}$	$r$	$t^{\circ}$	$r$
1	1,041	6	1,211	11	1,401	16	1,603
2	1,066	7	1,247	12	1,435	17	1,648
3	1,099	8	2,281	13	1,483	18	1,695
4	1,134	9	1,318	14	1,521	19	1,728
5	1,171	10	1,359	15	1,561	20	1,762

Для приведения найденного по номограмме значения  $K$  при  $t^{\circ} = 0^{\circ}$  к другой температуре необходимо помножить это значение  $K$  на соответствующее число  $r$ , указанное в таблице.

Например, требуется определить  $K$  при  $t^{\circ} = 15^{\circ}$ , если его значение при  $0^{\circ}$  было 4,2 м/сутки. Температурная поправка  $r$ , отвечающая  $15^{\circ}$ , равна 1,561; следовательно коэффициент фильтрации  $K_{15} = 4,2 \times 1,561 = 6,56$  м/сутки.

При определении  $K$  по номограмме для формулы Газена следует пользоваться температурной поправкой по формуле Газена (формула 31, приложение II).

Способы определения  $K$  по формулам Терцаги, Цункера, Замарина и Козени приведены в работе Биндемана [1].

Кроме перечисленных формул, можно отметить также способы определения  $K$  по графикам Мосвогостроя, в зависимости от действующего диаметра, приведенной пористости и числа пластичности. Описание и графики даны в «Справочнике по инженерной геологии» [10].

## ТЕМА СЕДЬМАЯ

# СЖИМАЕМОСТЬ

Сжимаемостью грунтов называют способность их уменьшаться в объеме — давать осадку под действием внешней нагрузки.

Степень сжимаемости и явления, происходящие при сжатии, зависят от характера и структуры грунта.

Сжатие песчаных грунтов связано с взаимным перемещением отдельных зерен и раздроблением их (при больших давлениях). Сжатие этого типа грунтов невелико и протекает быстро во времени, независимо от влажности.

При сжатии глинистых грунтов большую роль играют гидратные оболочки вокруг частиц, воспринимающие на себя часть нагрузки и деформирующиеся при сжатии.

Скорость сжатия глинистых грунтов зависит от состояния влажности грунта. При полном насыщении образца водой скорость сжатия грунтов определяется их водопроницаемостью и мощностью сжимаемого слоя.

При малых значениях коэффициента фильтрации и большой мощности сжимаемого слоя процесс сжатия может длиться многие годы.

В трехфазном состоянии, когда в порах глинистого грунта, кроме воды, находится воздух, имеющий возможность свободно выходить из грунта, сжатие происходит более быстро и не зависит от водопроницаемости. Гидратные оболочки при этом деформируются, но влажность породы до известного предела не меняется.

В дальнейшем изложении мы будем рассматривать грунт как двухфазную систему, состоящую из двух компонентов — скелет + вода.

Если такую систему поместить в сосуд с жесткими стенками, исключающими боковое расширение грунта, и подвергнуть вертикальной нагрузке, то грунт под влиянием последней будет уплотняться, т. е. уменьшаться в объеме за счет уменьшения пористости и влажности.

Многочисленные опыты, проведенные над грунтами, показали, что каждому сообщенному на грунт давлению соответствуют определенные пористость и влажность,

Графически зависимость пористости (или влажности) от давления изображают кривой, причем на оси абсцисс откладывают нагрузки  $P$ , а на оси ординат — приведенную пористость  $\epsilon$ . Такая кривая называется компрессионной кривой (фиг. 34). В общем виде компрессионная кривая выражается следующим уравнением:

$$\epsilon = -A \ln(P + P_c) + C_2.$$

В указанном уравнении

$\ln$  — натуральный логарифм;

$\epsilon$  — коэффициент пористости;

$P$  — давление (в  $\text{кг}/\text{см}^2$ ), соответствующее данному коэффициенту пористости;

$P_c$  — постоянная грунта, имеющая измерение давления и соответствующая начальному коэффициенту пористости;

$C_2$  — коэффициент уплотнения грунта;

$C_1$  — постоянная интегрирования.

Если первоначально загруженный грунт постепенно разгружать, то пористость его будет увеличиваться. Это явление, обратное сжатию, носит название набухания. Графически оно изображается восходящей ветвью компрессионной кривой, выражаемой уравнением

$$\epsilon = -A \ln(P + P_c) + C_2,$$

где  $A$  — коэффициент набухания,  $P_c$  — постоянная грунта, имеющая измерение давления, остальные обозначения те же, что и в предыдущем уравнении.

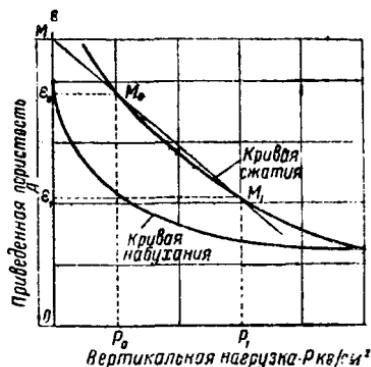
Испытание грунтов для определения компрессионной кривой обычно состоит в том, что образец грунта, заключенный в металлический цилиндр, подвергается равномерно распределенной нагрузке. Дно и поршень цилиндра оборудованы специальными пористыми прокладками, отводящими выдавливающуюся из образца воду.

Внешняя нагрузка на образец вызывает изменение его высоты, которая регистрируется специальными измерительными приборами.

Увеличение нагрузки производится после того, как оканчивается сжатие грунта под действием предыдущей нагрузки.

Одновременно для испытуемого грунта определяют удельный вес  $\gamma$ , начальную влажность  $w_0$  и объемный вес  $\Delta$ .

Указанные характеристики дают возможность определить приведенную пористость, которой обладал грунт до испытания; при



Фиг. 34. Компрессионная кривая (кривая сжатия и набухания).

этом следует исходить из соотношения

$$\varepsilon_0 = \frac{\gamma(1 + 0,01 w_0)}{\Delta} - 1,$$

где  $\varepsilon_0$  — начальная приведенная пористость.

Дальнейшие расчеты производят следующим образом. Зная уменьшение высоты образца  $\Delta h_n$  от данной нагрузки, определяют прирост приведенной пористости  $\Delta \varepsilon_n$  и приведенную пористость  $n$ , соответствующие той же нагрузке, по формуле

$$\Delta \varepsilon_n = \frac{\Delta h_n}{h_0} (1 + \varepsilon_0),$$

(где  $h_0$  — начальная высота образца) и

$$\varepsilon_n = \varepsilon_0 - \Delta h_n.$$

Зная начальную пористость и измеряя изменение высоты образца в процессе сжатия  $\Delta h$ , можно определить приведенную пористость при любой нагрузке.

Указанный способ построения компрессионной кривой основан на измерении линейной деформации образца. Кроме описанного, существует способ построения компрессионной кривой по влажности, он основан на учете изменения влажности образца в процессе опыта при разных нагрузках. По этому способу после каждой нагрузки производится разгрузка образца и его взвешивание. Последнее производят лишь после стабилизации осадки, о чем судят по показаниям мессура. Опыт проводится при нескольких ступенях давления. По окончании опыта образец высушивается и определяется вес скелета грунта. Зная вес влажного грунта при разных давлениях, определяют влажность образца, соответствующую каждому давлению.

Пользуясь зависимостью

$$w = \frac{W_t}{100},$$

можно по влажности  $w$ , соответствующей данному давлению, определить для этого же давления приведенную пористость  $\varepsilon$ .

Способ построения компрессионной кривой по изменению влажности применим только к грунтам, находящимся в состоянии полного водонасыщения. Кроме того, необходимо заметить, что этот способ несколько сложнее способа, основанного на измерении деформаций образца в приборе.

В настоящее время принято вести расчет компрессии по данным непосредственных измерений деформаций образца. Одновременно для контроля рекомендуется производить определение влажности и пористости исследуемого образца в начале и конце испытания путем взвешивания всего образца.

Описание способа построения компрессионной кривой по влажности можно найти в работах Цитовича [31], Маслова<sup>1</sup> и др.

<sup>1</sup> См. сборник „Свирьстрой“ № 13–14, 1937.

Кроме расчета приведенной пористости  $\epsilon$  при заданных давлениях, при компрессионных испытаниях определяют так называемый коэффициент уплотнения  $a$ , выражающий изменение приведенной пористости при изменении нагрузки на  $1 \text{ кг}/\text{см}^2$ . Последний определяется из приведенных уравнений логарифмических кривых.

Для практических целей производить определение коэффициента уплотнения и набухания из уравнений логарифмических кривых, ввиду относительной сложности вычислений, не рекомендуется. Обычно нагрузки в основаниях сооружений не превышают 1—3 и редко 5  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Поэтому процесс уплотнения и последующего набухания грунта происходит в сравнительно узких пределах. На графике он отвечает небольшому отрезку кривой, который без особой погрешности может быть принят за прямую линию. В таком случае коэффициент уплотнения определяется очень просто.

Положим, на фиг. 34 мы имеем компрессионную кривую. Заменив участок этой кривой между точками  $M_0$  и  $M_1$  прямой линией, можем написать для него уравнение

$$\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{P_0 - P_1} = -a,$$

где  $\varepsilon_0$  — приведенная пористость при давлении  $P_0$ ,

Решая это уравнение относительно  $\varepsilon_1$ , получим

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 - q(P_0 - P_1),$$

Из этого равенства можно вывести целый ряд равенств

$$\varepsilon_0 + aP_0 = \varepsilon_1 + aP_{11}$$

а следовательно и

$$\varepsilon_0 + aP_0 = \varepsilon_1 + aP_1 = \varepsilon_2 + aP_2 \text{ и т. д.} = \text{const.}$$

Обозначив  $\varepsilon + aP$  через  $A$ , получим упрощенное уравнение, связывающее пористость с давлением

$$\varepsilon = A - aP,$$

где  $A$  — есть отрезок  $OM$ , отсекаемый прямой  $M_1M$  на оси  $\varepsilon$ .

Для изучения сжимаемости грунтов в настоящее время пользуются некоторыми типами приборов, которые могут быть объединены в две группы. Первая группа — приборы типа Терцаги, с жесткими металлическими стенками, препятствующими расширению образца в стороны при его сжатии вертикальной нагрузкой.

Ко второй группе относятся приборы с боковым гидростатическим или аэростатическим обжатием образца, заменяющим действие жестких стенок в приборах первого типа.

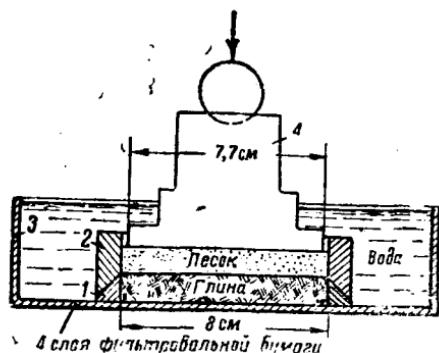
Наиболее простым представителем первой группы приборов

являются кольца Терцаги (фиг. 35). Исследуемый образец помещается в бронзовое кольцо 1. Это кольцо вместе с грунтом помещается на дно сосуда 3, покрытое несколькими листами фильтровальной бумаги. На кольцо с грунтом сверху помещается второе кольцо 2, тщательно притертное с первым на конус. Поверхность образца покрывается кружком влажной фильтровальной бумаги, поверх которой устраивается песчаный фильтр.

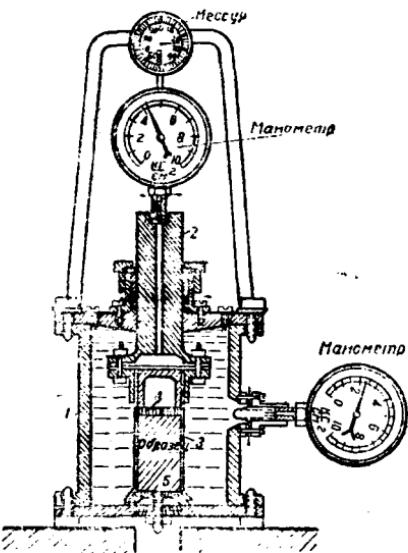
На фильтре помещается вкладыш 4 с гнездом для стального шарика, посредством которого передается давление на грунт от прессы.

Первоначально предложенный Терцаги прибор на сжатие в дальнейшем потерпел различные конструктивные изменения и усовершенствования. Однако принцип Терцаги, положенный в их основу, сохранился неизменным.

К числу приборов типа Терцаги относятся приборы конструкции МГРИ, ВСЕГИИГЕО, МИИТ, Цитовича и др.



Фиг. 35. Кольца Терцаги.



Фиг. 36. Прибор Лалетина для определения компрессионной зависимости грунтов.

Все перечисленные выше приборы типа Терцаги страдают весьма существенным и неустранимым недостатком, который заключается в наличии трения грунта о стенки прибора. Это трение, возникшая в процессе сжатия образца, уравновешивает собой некоторую часть действующей вертикальной нагрузки и не поддается учету.

Для устранения трения грунта о жесткие стенки прибора в последнее время был предложен ряд приборов, в которых образец заключается в резиновую камеру, а возможность расширения образца в стороны исключается путем создания бокового гидростатического или аэростатического давления. Указанные приборы, кроме компрессионной зависимости, дают возможность непосредственного определения коэффициента бокового давления,

путем измерения манометром давления жидкости (или воздуха), окружающей изучаемый в приборе образец.

К этому типу приборов относятся, например, прибор конструкции Лалетина [32] (фиг. 36).

Этот прибор представляет собой металлический цилиндр 1, в верхней крышке которого имеется поршень 2, передающий давление на образец, заключенный в резиновую оболочку 3.

Для предохранения образца от расширения в стороны при вертикальном сжатии полость цилиндра заполняется водой.

Вверху и внизу образца помещаются жесткие фильтры 4 и 5.

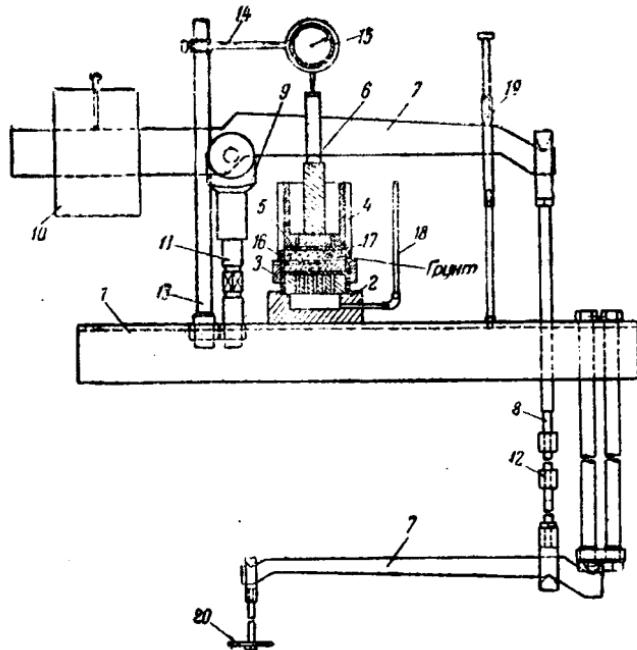
Измерение вертикальной нагрузки, действующей на образец, и бокового давления воды, удерживающего образец от расширения, производится специальным манометром.

Следует отметить, что описываемый тип приборов пока еще не нашел значительного применения в лабораторной практике.

## Задание 21. Построение компрессионной кривой

### А. Описание прибора

Прибор конструкции Московского геолого-разведочного института (фиг. 37) состоит из чугунного основания 1, на котором



Фиг. 37. Прибор МГРИ для компрессионных испытаний.

помещается база 2 с соединительной муфтой 3; муфта соединяет базу с рабочим цилиндром 4. В рабочий цилиндр входит плотно пригнанный облегченный поршень 5.

Давление на Поршень осуществляется через шарик 6 с помощью системы рычагов 7 и тяг 8 с передаточным числом 32—40. Верхний рычаг укреплен на двух шариковых подшипниках в обойме 9 и имеет уравновешивающий противогруз 10. Обойма соединена с основанием прибора винтом 11, имеющим на концах правую и левую нарезки; последнее обстоятельство дает возможность регулировать положение рычага, поднимая или опуская его на требуемую высоту.

Для уравновешивания нижнего рычага служит уравнительный винт 12 на тяге 8.

К основанию прибора прикреплена стойка 13, на которой перемещается держатель 14 измерительного прибора — мессура 15, регистрирующего изменение высоты образца.

Испытуемый образец закладывается в специальное кольцо 16, которое ввинчивается в рабочий цилиндр.

Внизу и сверху образца помещаются пористые прокладки — фильтры 17. Избыток воды, получаемый при сжатии грунта, удаляется через фильтры и специальные каналы базы прибора в стеклянную трубку — пьезометр 18 или через отверстия в поршне прибора.

Для закрепления рычага в каком-либо определенном положении служит специальный винт-арретир 19.

Нагрузка на рычаги осуществляется грузом, укладываемым на специальный держатель-подвеску 20.

## Б. Порядок работы

### a) Подготовка прибора

- 1) Уравновесить рычаги пресса.
- 2) Налить в нижнюю часть полости базы прибора воды до появления ее над пористым дном, положить пористую прокладку, удалить воду, появившуюся над поверхностью прокладки, и положить на пористую пластинку кружочек фильтровальной бумаги. Все внутренние части прибора и нарезки слегка смазать вазелином.

### б) Подготовка образца

- 3) Взвесить кольцо прибора на технических весах с точностью до 0,01 г (вес  $Q_0$ ), измерить его высоту  $h$ , диаметр, вычислить площадь  $F$  и все эти данные занести в журнал (см. табл. 36).
- 4) Ввернуть кольцо прибора в кольцо-пробобратель с режущими краями<sup>1</sup>.

Острым режущим концом пробобратель поставить в вертикальном положении на срезанную горизонтальную площадку мо-

<sup>1</sup> При испытании грунта с нарушенной структурой указанная операция отпадает. В этом случае кольцо прибора заполняется приготовленной грунтовой массой.

нолита грунта и руками медленно вдавливать его в грунт, обрезая ножом грунт за внешней стороной кольца. При этом необходимо следить, чтобы погружение пробобрателя в грунт происходило все время строго вертикально.

После того как грунт займет всю полость колец, отделить его от монолита, отвернуть от кольца прибора кольцо-пробобратель таким образом, чтобы грунт остался в кольце прибора.

5) Взятый в кольцо грунт срезать по плоскости в уровень с краями кольца. Эту операцию необходимо выполнить очень тщательно, чтобы объем грунта в кольце был в точности равен объему полости кольца.

6) Одновременно с этим из остатков грунта, непосредственно прилегавших к телу испытуемого образца, взять пробу на определение удельного веса.

7) Нарезку кольца тщательно очистить от приставших к ней частиц грунта, взвесить кольцо с грунтом на технических весах с точностью до 0,01 г и занести вес  $Q_1$  в журнал (см. табл. 36).

8. После указанных операций собрать прибор по следующей схеме:

#### *в) Сборка прибора*

а) Ввернуть кольцо с грунтом в соединительную муфту базы, предварительно смазав нарезку кольца машинным маслом или вазелином.

б) Покрыть образец смоченным кружком фильтровальной бумаги, поверх которой положить пористую прокладку.

в) Ввернуть цилиндр в базу прибора так, чтобы кольцо прибора с грунтом ввернулось в цилиндр доотказа, а затем довернуть доотказа соединительную муфту.

г) Вставить в цилиндр поршень, на шток которого в специальное гнездо положить шарик.

д) Собранный прибор поместить на основание. Верхний рычаг пресса при помощи уравнительного винта подвести к шарику и закрепить арретиром. Указанную операцию необходимо провести осторожно, чтобы не передать на образец добавочное усилие. Во избежание этого, закрепляя рычаг арретиром и вращая уравнительный винт, следует одновременно вращать пальцем в гнезде шарик. Закрепление считается достигнутым, когда шарик перестает вращаться, а верхний рычаг занимает горизонтальное положение по уровню. После этого подвесить тяги и нижний рычаг.

#### *г) Производство испытаний*

9. Когда имеется уверенность в том, что возможность набухания грунта исключена, к заключенному в прибор образцу подвести воду через трубку в основании прибора<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> При испытании образца без насыщения увлажнение не производится, а принимаются меры к сохранению его естественной влажности путем применения влажных тряпок, ваты и т. д. В этом случае закрепления арретиром не производится.

10. Оставить прибор на несколько суток для полного насыщения образца водой, для чего в трубке поддерживать все время постоянный уровень<sup>1</sup>.

11. Для контроля предварительно, перед насыщением образца водой, к скобе поршня прибора подвести ножку мессура, задвинув ее почти на весь свободный ход.

Держатель мессура закрепить в таком положении на стойке и взять по указателю отсчет, а затем в продолжение всего времени насыщения следить за показаниями измерительного прибора.

12. При неплотном закреплении рычага арретиром образец начнет набухать и мессур зафиксирует прирост высоты образца. В этом случае следует нажать арретиром на рычаг до того предела, пока измеритель деформаций не покажет начальный отсчет, т. е. отсчет, взятый до увлажнения образца грунта водой.

13. Далее необходимо определить величину так называемого эффективного давления. Делается это следующим образом: на рычаг ступенями от 0,1 до 0,5 кг/см<sup>2</sup> дается сжимающее усилие до того момента, когда мессур зафиксирует первые деформации сжатия. Предварительно необходимо взять нулевой (начальный) отсчет по индикатору.

Необходимая для этого нагрузка и есть эффективное давление  $P_{ef}$ , т. е. то давление, которое требуется для уравновешивания внутренних сил в образце.

14. После определения эффективного давления произвести определение компрессии грунта путем приложения ряда ступеней нагрузок. Первую ступень нагрузок довести до 1 кг на квадратный сантиметр площади образца (или 2 кг/см<sup>2</sup>). Отметить время начала опыта и записать все эти данные в журнал (см. табл. 35).

15. Величину груза, который необходимо приложить к подвеске рычага, следует рассчитать по формуле

$$Q = \frac{P \cdot F - Q}{f},$$

где  $Q$  — вес поршня прибора с шариком и пористой прокладкой (в г);

$F$  — площадь образца (в см<sup>2</sup>);

$P$  — заданное удельное давление на образец (кг/см<sup>2</sup>);

$f$  — передаточное число системы рычагов.

16. После приложения нагрузки произвести наблюдения за деформацией грунта путем снятия показаний мессура.

Отсчеты показаний мессура производить через следующие промежутки времени: 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 60; 90; 120 и 180 мин., считая с начала опыта.

<sup>1</sup> При замачивании грунта лучше брать воду, тождественную по химическому составу с грунтовой водой, которой был насыщен грунт в естественных условиях.

Дальнейшие замеры производятся с промежутком в 3 часа, в 6, 12, 18 часов и в 24 часа. Отсчеты показаний мессура и время их взятия заносят в журнал (см. табл. 35).

17. Нагрузку выдержать до наступления стабилизации осадки; последнее определяется тем, что показания мессура не меняются в течение 24 часов<sup>1</sup>.

18. По достижении стабилизации от данной нагрузки сообщить образцу новую ступень нагрузки, равную  $2 \text{ кг}/\text{см}^2$  (или  $3 \text{ кг}/\text{см}^2$ ), и производить наблюдения в соответствии с пп. 15 и 16. Вышеуказанный порядок наблюдений остается одним и тем же при каждой новой нагрузке<sup>2</sup>.

19. По окончании каждой ступени нагрузки по полученным в процессе опыта данным произвести вычисление величин деформации  $dh$  за время  $T$ , считая от начала данной ступени, и процента консолидации образца  $\Theta$  для моментов времени, соответствующих всем промежуточным наблюдениям от начала опыта до конца его. При этом полное сжатие образца считается соответствующим моменту времени, равному бесконечности (полной консолидации образца). Все вычисления, указанные в настоящем пункте, занести в журнал (см. табл. 35).

20. По достижении стабилизации осадки от последней заданной ступени нагрузки удалить из прибора всю воду и приступить к разгрузке прибора, а именно:

- а) снять груз и подвеску,
- б) разобрать рычаги,
- в) снять цилиндр с основания прибора, вынуть поршень и отвинтить кольцо с образцом.

21. При помощи сухой фильтровальной бумаги быстро освободить грунт в кольце от видимых следов воды и определить обычным способом — путем высушивания — его влажность  $w_{\text{к}}$ .

22. После опыта прибор тщательно очистить от грунта, промыть, вытереть и смазать тонким слоем вазелина.

23. Если заданием предусмотрено построение обратной ветви компрессионной кривой (кривой набухания), порядок работы после выполнения того, что предусмотрено п. 15, несколько меняется. По достижении стабилизации осадки от последней заданной ступени нагрузки произвести наблюдения за упругими деформациями образца путем разгрузки его в обратном порядке ступеней нагрузки. При этом запись показаний мессура вести только перед каждым изменением нагрузки; деформаций во времени можно не фиксировать.

По окончании набухания грунта при данном давлении часть нагрузки снять и ждать снова до полного прекращения процесса

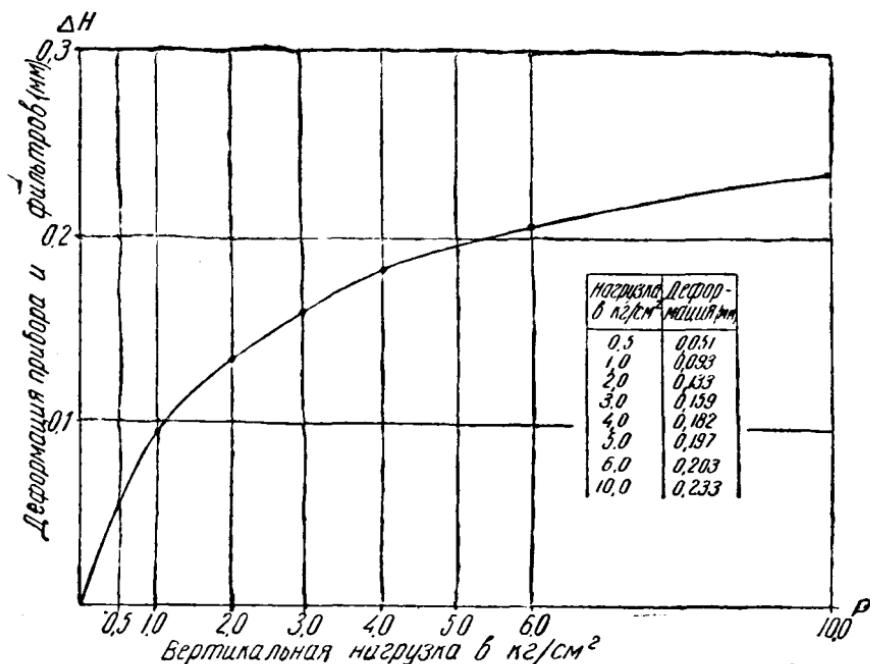
<sup>1</sup> Практически стабилизация считается достигнутой, если разность между двумя отсчетами, взятыми в течение суток, не превосходит  $0,005 \text{ мм}$ .

<sup>2</sup> Если осадка больше, рычаги после стабилизации ее займут наклонное положение; поэтому в таком случае необходимо после каждой ступени выравнивать рычаги (не перемещая мессура на станке), брать нулевой отсчет, а затем производить нагрузку следующей ступени.

набухания. После этого взять отсчет и снова снять часть нагрузки. Эту операцию повторять до полной разгрузки.

Окончание процесса набухания грунта в пределах каждой ступени давления устанавливается по показанию измерительного прибора совершенно так же, как это делалось при испытании грунта на сжатие.

По удалении последней нагрузки образец оставить в приборе до полного прекращения упругой деформации образца (4—5 суток), затем поступить, как изложено в пп. 20 б-в, 21 и 22.



Фиг. 38. Кривая тарировки компрессионного прибора.

**П р и м е ч а н и е.** При расчете деформации образца в данные опыта должна быть внесена поправка на деформацию прибора, для чего производится тарировка последнего. Тарировку производят так же, как и самые компрессионные испытания. Вместо грунта в кольцо закладываются специальный металлический диск и два бумажных фильтра, а затем производят загрузку прибора ступенями и замеряют его деформации по мессиру. По полученным данным строится график (фиг. 38), который используется при расчете действительной деформации образца. Действительная деформация образца равна разнице между суммарной деформацией (зарегистрированной индикатором при опыте) и деформацией прибора (полученной при тарировке).

Тарировка прибора производится периодически 2—3 раза в год.

### В. Обработка материалов испытаний

По полученным в процессе испытания данным произвести расчет опыта по следующей схеме:

1. Высота кольца (тоже начальная высота образца)  $h_0$ , мм.
2. Площадь кольца  $F$ , см<sup>2</sup>.
3. Объем кольца  $V$ , см<sup>3</sup>.
4. Вес кольца  $Q_0$ , г.
5. Вес грунта с кольцом до опыта  $Q_1$ , г.
6. » » » » после опыта  $Q_2$ , г.
7. » » » » после высыпывания  $Q_3$ , г.
8. Влажность грунта до опыта

$$W_0 = \frac{Q_1 - Q_3}{Q_3 - Q_0} \cdot 100\%.$$

9. Влажность грунта после опыта

$$W_k = \frac{Q_2 - Q_3}{Q_3 - Q_0} \cdot 100\%.$$

10. Объемный вес грунта до опыта

$$\Delta = \frac{Q_1 - Q_0}{V} \text{ г/см}^3.$$

11. Удельный вес (определяется специально)  $\gamma$ , г/см<sup>3</sup>.

12. Приведенная пористость до опыта

$$\varepsilon_0 = \frac{\gamma}{\Delta} (1 + 0,01 W_0) - 1.$$

13. Коэффициент влажности до опыта

$$K_{w_0} = \frac{W_0 \cdot \gamma}{\varepsilon_0 \cdot 100}.$$

14. Деформация образца для каждой ступени

$$\Delta h_n = \delta_n - \delta_0 - \Delta H,$$

где  $\delta_0$  — нулевой отсчет по мессуру;

$\delta_n$  — показания мессура при стабилизации осадки от данной нагрузки;

$\Delta H$  — деформация прибора при данной нагрузке (определяется по тарировочной кривой).

15. Прирост приведенной пористости для каждой ступени нагрузки

$$\Delta \varepsilon_n = \frac{\Delta h_n}{h_0} (1 + \varepsilon_0).$$

16. Приведенная пористость в соответствующие интервалы нагрузок

$$\varepsilon_n = \varepsilon_0 - \Delta \varepsilon_n.$$

## Журнал наблюдений для построения

Общая нагрузка на рычаги прибора, кг	Удельное давление, $\text{kg}/\text{cm}^2$	Дата	Время взятия отсчетов	Нулевой отсчет по мессуре	Показания мессура в процессе сжатия	Суммарная деформация образца и прибора	
$Q$	$P$			$\delta_0$	$\delta_n$	$\Delta h_n + \Delta H$	
0,55	0,4	25/1 1939 г.	8 ч. 00 м. 00 с.	9,753	9,753	—	
0,69	0,5		8 " 30 " 00 "	9,753	9,715	—	
0,5	0,5		10 " 00 " 00 "	9,753	9,644	0,109	
1,40	1,0		10 " 00 " 00 "	9,753	9,580	0,173	
1,40	1,0		10 " 01 " 30 "	9,753	9,560	0,193	
1,40	1,0		10 " 02 " 00 "	9,753	9,542	0,211	
1,40	1,0		10 " 03 " 00 "	9,753	9,530	0,223	
1,0	1,0		10 " 04 " 00 "	9,753	9,520	0,233	
1,0	1,0		10 " 05 " 00 "	9,753	9,510	0,243	
1,0	1,0		10 " 06 " 00 "	9,753	9,500	0,253	
1,0	1,0		10 " 07 " 00 "	9,753	9,492	0,261	
1,0	1,0		10 " 10 " 00 "	9,753	9,484	0,269	
1,0	1,0		10 " 15 " 00 "	9,753	9,477	0,276	
1,0	1,0		10 " 20 " 00 "	9,753	9,470	0,283	
1,0	1,0		10 " 30 " 00 "	9,753	9,464	0,289	
1,0	1,0		10 " 40 " 00 "	9,753	9,459	0,294	
1,0	1,0		10 " 50 " 00 "	9,753	9,452	0,301	
1,0	1,0		11 " 00 " 00 "	6,753	9,448	0,305	
1,0	1,0		11 " 30 " 00 "	9,753	9,445	0,308	
1,0	1,0		12 " 00 " 00 "	9,753	9,442	0,311	
1,0	1,0		13 " 00 " 00 "	9,753	9,440	0,313	
1,0	1,0		16 " 00 " 00 "	9,753	9,339	0,314	
2,82	2,0	26/1 1939 г.	9 " 00 " 00 "	9,753	9,438	0,315	
4,24	2,0	27/1 1939 г.	9 " 00 " 00 "	9,753	9,438	0,315	
7,07	3,0	30/1 1939 г.	9 " 30 " 00 "	9,753	9,186	0,567	
	5,0	3/II 1939 г.	10 " 01 " 00 "	9,753	8,994	0,759	
	5,0	7/II 1939 г.	9 " 18 " 00 "	9,753	8,764	0,989	

\* При  $P = 1 \text{ kg}/\text{cm}^2 \Delta h = 0,164 \text{ mm}$ .

## компрессионной кривой

Деформация прибора и фильтров, $\text{мм}$	Деформация образца от начала опыта, $\text{мм}$	Расчет процента консолидации			Примечание
		время от начала каждой ступени, мин.	деформация образца (считая от начала каждой ступени), $\text{мм}$	процент консолидации	
—	—				
0,051	0,058				
0,093	0,080	0,5	0,022	14	
	0,100	1,0	0,042	26	
	0,118	2,0	0,060	37	
	0,130	3,0	0,072	44	
	0,140	4,0	0,082	50	
	0,150	5,0	0,092	56	
	0,160	6,0	0,102	62	
	0,168	7,0	0,110	66	
	0,176	10,0	0,118	72	
	0,183	15,0	0,125	77	
	0,190	20,0	0,132	80	
	0,196	30,0	0,138	84	
	0,201	40,0	0,143	87	
	0,208	50,0	0,150	90	
	0,212	60,0	0,154	93	
	0,215	90,0	0,157	96	
	0,218	120,0	0,160	97	
	0,220	180,0	0,162	98	
	0,221	360,0	0,163	99	
	0,222	1380,0	0,164	100	
	0,222	2760,0	0,164	100	
0,133	0,434				
0,159	0,600				
0,197	0,792				

Расчет процента консолидации произведен только для нагрузки  $P = 1 \text{ kg}/\text{cm}^2$ Для  $P = 2,3$  и  $5 \text{ kg}/\text{cm}^2$  приведены данные после стабилизации осадки; промежуточные записи опущены

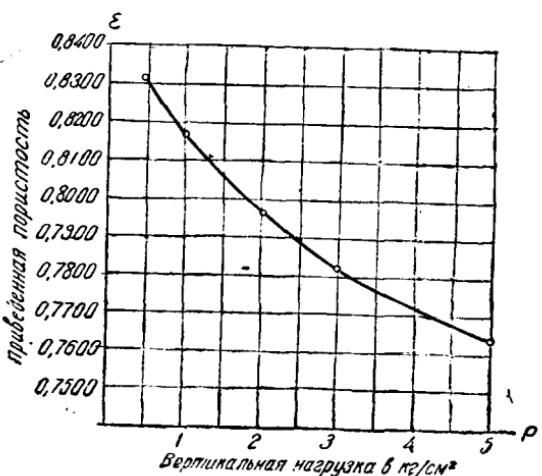
Необходимо отметить, что определение  $\Delta h$ ,  $\Delta \epsilon$  и  $\epsilon$  при проведении опытов под водой следует начинать с конечных их значений, соответствующих последней нагрузке, после чего вслед за определением величины  $\epsilon_k$  (приведенной пористости, соответствующей последней нагрузке) определить величину  $\epsilon'_k$  (приведенной пористости после опыта) с подсчетом по влажности:

$$\epsilon'_k = \frac{\gamma \cdot W_k}{100},$$

где  $W_k$  — влажность после опыта.

Если разница между  $\epsilon_k$  и  $\epsilon'_k$  будет в пределах  $\pm 5\%$  относительных (за 100 принимается величина  $\epsilon_k$ ), можно приступить к расчету приведенной пористости.

Если разница между  $\epsilon_k$  и  $\epsilon'_k$  будет  $> \pm 5\%$ , это говорит о том, что в грунте остался защемленный воздух (в случае если разница  $> +5\%$ ), или о том, что при испытании образец набух (если разница  $> -5\%$ ). В том и другом случае следует или повторить опыт вновь или построить компрессионную кривую, исходя из значений приведенной пористости в начале и конце опыта, определенных по весу. При этом промежуточные точки компрессионной кривой полу-



Фиг. 39. Компрессионная кривая.

чаются делением разности между начальными и конечными значениями (в цикле сжатия), пропорциональными наблюденным осадкам штампа прибора.

17. После проверки  $\epsilon_k$  и  $\epsilon'_k$  произвести расчет коэффициента уплотнения  $a$ :

$$a = \frac{\epsilon_{n-1} - \epsilon_n}{P_n - P_{n-1}} \text{ см}^2/\text{кг}.$$

18. Также произвести расчет относительного модуля сжатия:

$$E = \frac{(1 - \xi)(1 + 2\xi)}{1 + \xi} \cdot \frac{1 + A}{a},$$

где  $\xi$  — коэффициент бокового давления для данного грунта, определяемый по табл. 37;

$A$  — некоторая постоянная величина, равная  $A = \epsilon + ap$  и определяемая для каждого интервала нагрузок расчетом или графически (см. фиг. 34).

Таблица 36

## Результаты компрессионных испытаний

Основные данные по прибору и исследуемому образцу	$P_n$	$\Delta h_n$	$\frac{\Delta h_n}{h_0} (1 + \varepsilon_0)$	$\varepsilon_n = \varepsilon_0 - \frac{\Delta h_n}{h_0} (1 + \varepsilon_0)$	Примечание	
1. Высота кольца (тоже начальная высота образца), м.м.	$h_0$	20				
2. Площадь кольца, см <sup>2</sup> . . .	$F$	28,36				
3. Объем кольца, см <sup>3</sup> . . . .	$V$	56,72				
4. Вес кольца, г . . . . .	$Q_0$	116,83	0	—	0,8371	
5. Вес грунта с кольцом до опыта, г . . . . .	$Q_1$	224,76	0,4	—	0,8371	
6. Вес грунта с кольцом после опыта, г . . . . .	$Q_2$	222,72	0,5	0,058	0,8318	
7. Вес грунта с кольцом после высыпывания, г . . . . .	$Q_3$	199,08	1,0	0,222	0,0204	0,8167
8. Влажность грунта до опыта, % . . . . .	$W_0 = \frac{Q_1 - Q_3}{Q_3 - Q_0} \cdot 100$	31,22	2,0	0,434	0,0398	0,7973
9. Влажность грунта после опыта, % . . . . .	$W_k = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_3 - Q_0} \cdot 100$	28,74	3,0	0,600	0,0551	0,7820
10. Объемный вес грунта до опыта, г/см <sup>3</sup> . . . . .	$\Delta = \frac{Q_1 - Q_0}{V}$	1,90	5,0	0,792	0,0727	0,7644
11. Удельный вес . . . . .	$\gamma$	2,66				
12. Приведенная пористость до опыта . . . . .	$\varepsilon_0 = \frac{\gamma}{\Delta} (1 + 0,01 W_0) - 1$	0,8371				
13. Коэффициент влажности до опыта . . . . .	$K_{w_0} = \frac{W_0 \cdot \gamma}{\varepsilon_0 \cdot 100}$	0,9920				
14. Приведенная пористость после опыта (с подсчетом по влажности) . . . . .	$\varepsilon_k' = \frac{\gamma \cdot W_k}{100}$	0,7645				

19. Журнал наблюдений и все расчеты вести по ниже помещаемой форме (табл. 35, 36, 37).

20. По полученным данным построить:

а) Компрессионную кривую, откладывая по оси абсцисс в принятом масштабе нагрузки  $P$ , а по оси ординат соответствующие им значения приведенной пористости  $\epsilon$ . Рекомендуемые масштабы: для  $P$  от 1 см = 0,2 кг/см<sup>2</sup> до 1 см = 0,5 кг/см<sup>2</sup>; для  $\epsilon$  от 1 см = 0,01 до 1 см = 0,05 (фиг. 39).

б) Кривые зависимости между сжатием и временем для каждой ступени нагрузки. При построении этих кривых использовать данные журнала наблюдений (см. табл. 35). По оси ординат (сверху вниз) откладывать проценты консолидации  $\Theta$ , а по оси абсцисс (слева направо) время  $T$  в минутах, соответствующее данным процентам консолидации.

Рекомендуемые масштабы: для оси абсцисс от 10 мин. = 1 см, до 10 мин. = 2 см; для оси ординат от 10% = 1 см, до 10% = 2 см (см. фиг. 40).

Таблица 37

**Расчет коэффициента уплотнения и относительного модуля сжатия**

Интервал нагрузок, кг/см <sup>2</sup>		Среднее в интервале значение нагрузки	Значение приведенной пористости в данном интервале нагрузок	Коэффициент уплотнения, см <sup>2</sup> /кг	Относительный модуль сжатия при $\xi = 0,70$ *	
от $P_{n-1}$	до $P_n$	$P = \frac{P_{n-1} + P_n}{2}$	$\epsilon_{n-1}$	$a = \frac{\epsilon_{n-1} - \epsilon_n}{P_n - P_{n-1}}$	$E = \frac{(1-\xi)(1+2\xi)}{1+\xi} \cdot \frac{1+A}{a}$	
0,4	0,5	0,45	0,8371	0,8318	0,0530	14,84
0,3	1,0	0,75	0,8318	0,8167	0,0302	25,93
1,0	2,0	1,50	0,8167	0,7973	0,0194	40,06
2,0	3,0	2,50	0,7973	0,7820	0,0153	50,62
3,0	5,0	4,00	0,7820	0,7614	0,0088	87,07

**Задание 22. Косвенное определение коэффициента фильтрации по данным опыта на сжатие**

При сжатии грунта, все поры которого заполнены водой, происходит выжимание воды из грунта. Скорость фильтрации воды через грунт зависит от пористости грунта. По мере увеличения давления на грунт пористость его уменьшается, а сопротивление движению воды вследствие этого будет возрастать, что в свою очередь будет приводить к уменьшению скорости фильтрации.

\* Числовые значения  $\xi$  при расчетах для различных грунтов могут быть приняты равными:

утрамбованный песок — 0,36; рыхлый песок — 0,42; суглиноок — 0,60—0,65;

глина — 0,70—0,75.

Коэффициент фильтрации входит одной из основных величин в уравнение для расчета продолжительности осадки грунтов под влиянием внешнего давления. Поэтому определение коэффициента фильтрации для расчета осадки должно производиться под давлением, соответствующим принятому давлению на грунт от сооружения.

Для этого либо определяют коэффициент фильтрации опытным путем в приборе, либо рассчитывают его по данным компрессионных испытаний следующим образом:

$$K = \frac{0.85 ah^2 \cdot \gamma_0}{4(1 + \epsilon_{op}) t},$$

где  $K$  — коэффициент фильтрации (в см/сек), соответствующий давлению  $P_n$ ;

$h$  — толщина слоя испытуемого грунта в приборе (в см);

$\epsilon_{op}$  — средняя приведенная пористость во время опыта

$$\epsilon_{op} = \frac{\epsilon_{n-1} + \epsilon_n}{2};$$

$a$  — коэффициент уплотнения при данной ступени давления (в  $\text{см}^2/\text{кг}$ );

$\gamma_0$  — удельный вес воды (принимается равным единице);

$t$  — время в секундах, в которое происходило выжимание воды из пор грунта.

Графо-аналитическое определение коэффициента фильтрации производится следующим образом:

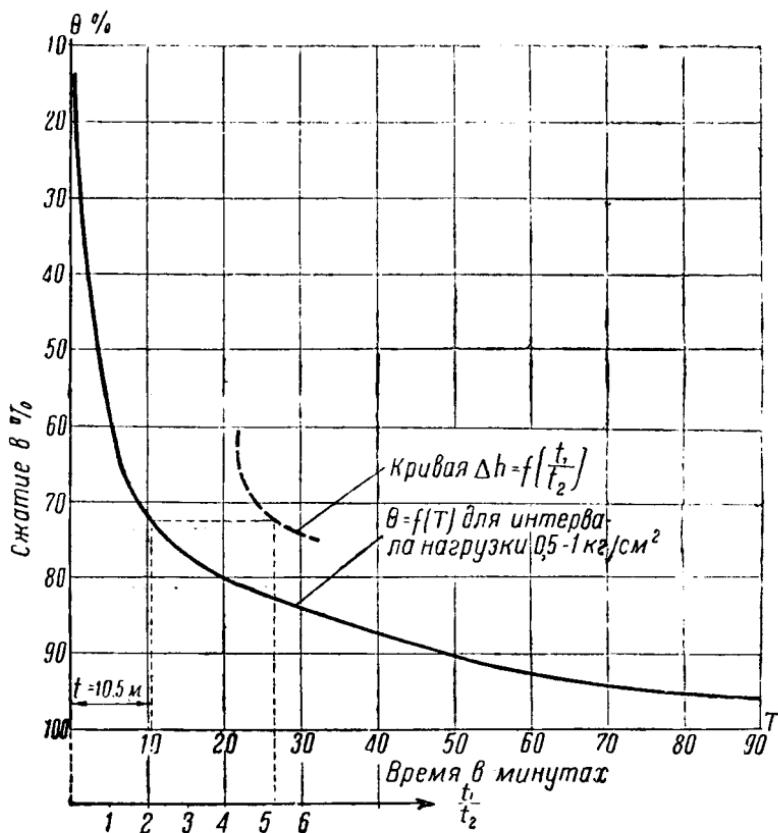
1. Для каждой ступени давления построить кривые зависимости между сжатием и временем или так называемые кривые консолидации (фиг. 40).

2. На каждом графике построить вспомогательную кривую, для чего для каждой ступени сжатия ( $\Theta = 30\%, 40\%, 50\%, 60\%$  и т. д. общего сжатия) произвести вычисление отношения  $\frac{t_1}{t_2}$ , где  $t_1$  — время, соответствующее данной ступени сжатия, а  $t_2$  — время, которое прошло к тому моменту, когда величина сжатия составляла лишь половину сжатия  $\Theta$ , т. е. равнялась  $\frac{\Theta}{2}$ . Например, для ординаты  $\Theta_{70}$ , соответствующей 70% общей осадки, абсциссой будет  $\frac{t_{70}}{t_{35}}$ , т. е. время, в которое происходила осадка на 70%, деленное на время, в которое происходила осадка на 35% всей величины сжатия и т. д.

Значения  $\frac{t_1}{t_2}$  отложить по оси абсцисс в произвольном масштабе. Полученные точки соединить плавной кривой.

3. На построенной кривой  $\Delta h = f\left(\frac{t_1}{t_2}\right)$  (на фиг. 40 показана пунктиром) найти точку пересечения кривой с ординатой, для которой соответствующая абсцисса имеет значение  $\frac{t_1}{t_2} = 5,27$ .

(точка A). Из этой точки провести линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с первой кривой, показанной сплошной линией. Из полученной таким образом точки пересечения опустить перпендикуляр на ось абсцисс и снять значение искомой величины  $t$  по масштабу для кривой  $\theta = f(T)$  (см. фиг. 40).



Фиг. 40. Кривая зависимости между сжатием и временем при постоянной нагрузке.

4. Указанные операции провести для всех построенных кривых.

5. Найденные значения  $t$  подставить в эмпирическую формулу, приведенную выше, и произвести расчеты среднего значения  $K$  для каждого давления.

6. Расчетные данные занести в таблицу по ниже помещаемой форме (табл. 38).

При мер. Предположим, что на компрессионной кривой (см. фиг. 39) мы рассматриваем отрезок, соответствующий сжатию образца в интервале нагрузок 0,5—1  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Для этого интер-

вала построена кривая консолидации (см. фиг. 40). Из графиков мы имеем следующие данные, полученные в результате опыта на сжатие:

$$P_1 = 0,5 \text{ кг}/\text{см}^2; \quad \varepsilon_1 = 0,8318;$$

$$P_2 = 1,0 \quad , \quad \varepsilon_2 = 0,8167;$$

$$a = 0,0302;$$

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{0,8318 + 0,8167}{2} = 0,8242; \quad h = 1,994 \text{ см.}$$

По кривой  $\theta = f(T)$  находим:

$$\text{для } 60\% \text{ сжатия } t_1 = 5,5; \quad t_2 = 1,25; \quad \frac{t_1}{t_2} = 4,4.$$

$$\text{, } 65\% \quad , \quad t_1 = 6,75; \quad t_2 = 1,50; \quad \frac{t_1}{t_2} = 4,5.$$

$$\text{, } 70\% \quad , \quad t_1 = 8,50; \quad t_2 = 1,75; \quad \frac{t_1}{t_2} = 4,8.$$

$$\text{, } 75\% \quad , \quad t_1 = 13,0; \quad t_2 = 2,00; \quad \frac{t_1}{t_2} = 6,5.$$

Сделав вспомогательные построения (как указано в п. 2), находим  $t = 10,5 \text{ мин.} = 630 \text{ сек.}$

Подставляя найденные значения в приведенную выше эмпирическую формулу, определим коэффициент фильтрации  $K$  для давления  $0,5-1 \text{ кг}/\text{см}^2$ :

$$K = \frac{0,85 \cdot 1,994 \cdot 0,0302 \cdot 1}{4(1 + 0,8242) \cdot 630} = 0,000022 \text{ см/сек.}$$

Аналогичным образом находим  $K$  для других значений нагрузки.

Приведенный выше способ косвенного определения коэффициента фильтрации по данным опыта на сжатие является менее точным, чем способ прямого определения коэффициента фильтрации в приборах типа Терцаги. Однако для практических целей этот косвенный способ дает результаты достаточно точные. Большшим преимуществом последнего способа является значительная экономия времени, так как в этом случае приходится производить только один опыт на сжатие, отнимающий гораздо меньше времени, чем прямой способ определения коэффициента фильтрации в приборах.

### Задание 23. Графический способ проверки компрессионных кривых по методу Работнова

При построении компрессионных кривых пользуются данными, получаемыми в результате лабораторного опыта. Иногда получаемые опытные данные не укладываются в плавную кривую. В этих случаях приходится проводить кривую так, чтобы она заняла некоторое среднее положение между полученными из опыта точками. Однако, такая кривая может иногда полу-

## Расчет коэффициента фильтрации по данным опыта на сжатие

Интервал нагрузок, кг/см <sup>2</sup>	Значение приведенной пористости в данном интервале нагрузок		Коэффициент уплотнения $a$ , см <sup>2</sup> /кг	Высота образца $h$ , см	Время $t$ , сек.	Коэффициент фильтрации $K_f$ , см/сек	Примечание
	от $P_{n-1}$	до $P_n$					
0,5	1,0	0,8318	0,8167	0,8242	0,0302	1,994	22 · 10 <sup>-6</sup>
1,0	2,0	0,8167	0,7973	0,8070	0,0194	1,978	7,8 · 10 <sup>-6</sup>
2,0	3,0	0,7973	0,7820	0,7896	0,0153	1,957	2,9 · 10 <sup>-6</sup>
3,0	5,0	0,7820	0,7644	0,7732	0,0088	1,921	0,1 · 10 <sup>-6</sup>

читься случайной, не отражающей логарифмической зависимости. Поэтому на практике возникает необходимость проверки правильности построения компрессионных кривых аналитическим путем.

Как говорилось выше, компрессионные кривые являются кривыми, характеризующимися логарифмическими уравнениями.

Аналитическая проверка правильности построения компрессионной кривой требует решения для каждого участка кривой трех таких уравнений. При этом решение этих уравнений возможно лишь приближенными методами и сопряжено с большой вычислительной работой.

Учитывая это, Работнов [25] предложил очень простой способ графической проверки компрессионных кривых, основанный на выведенных им соотношениях.

Для проверки правильности построения компрессионной кривой по способу Работнова необходимо:

1. Провести через компрессионную кривую произвольное количество горизонтальных прямых, находящихся на равных вертикальных расстояниях друг от друга (фиг. 41).

2. Из точек пересечения этих прямых с компрессионной кривой 1, 2, 3, 4 и 5 опустить перпендикуляры до пересечения с осью абсцисс в точках  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  и  $P_5$ .

3. Из точек, расположенных на оси абсцисс, провести прямые линии, наклоненные в сторону оси ординат под углом  $45^\circ$ , до пересечения с ранее проведенными перпендикулярами  $4P_4$ ,  $3P_3$ ,  $2P_2$ ,  $1P_1$  в точках  $N_4$ ,  $N_3$ ,  $N_2$  и  $N_1$ .

4. Если линия, проведенная через точки  $N_4$ ,  $N_3$ ,  $N_2$ ,  $N_1$  пересечения наклонных прямых с перпендикулярами, будет прямой, построенная компрессионная кривая правильна. Отклонение точек от прямой покажет несоответствие всей данной кри-

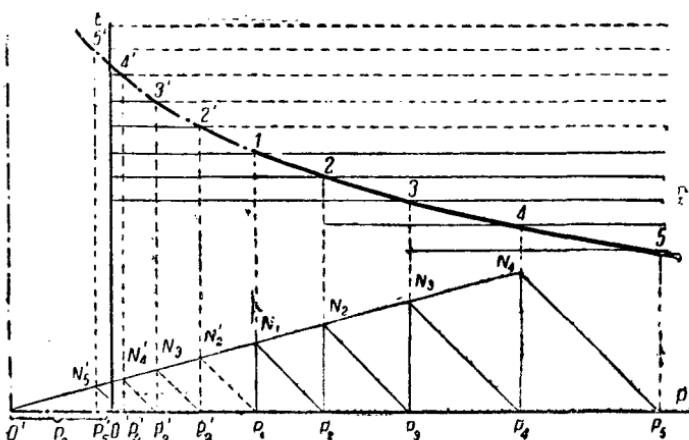
вой или ее отдельных участков уравнению логарифмики.

5. Отрезок  $O'O$ , отсекаемый прямой  $O'N_4$  на оси абсцисс, соответствует величине  $P_e$  в уравнении компрессионной кривой.

Если отрезок  $O'O$  будет лежать вправо от оси ординат, т. е. величина  $P_e$  получит отрицательное значение, то это, даже при соответствии всей кривой уравнению логарифмики, указывает на полное несоответствие полученной кривой теоретической кривой компрессии.

С помощью графического метода Работнова можно продолжить опытную компрессионную кривую теоретическими точками. Для этого необходимо провести следующие построения:

1. Провести дополнительные горизонтальные линии, аналогичные тем, которые были проведены ранее для проверки пра-



Фиг. 41. Корректирующая диаграмма для проверки и продолжения компрессионной кривой по Работнову.

вильности построения компрессионной кривой (на фиг. 41 дополнительные горизонтальные линии показаны пунктиром).

2. Из точки  $P_1$  провести прямую линию под углом  $45^\circ$  до пересечения с линией  $O'N_4$ . Из точки пересечения провести вертикальную прямую до пересечения ее с осью абсцисс (точка  $P_2'$ ) и с горизонтальной линией, на которой получаем точку  $2'$ , являющуюся дополнением компрессионной кривой.

3. Поступая аналогичным образом, можно получить ряд теоретических точек  $3', 4'$ , служащих для продолжения компрессионной кривой.

На фиг. 41 участки компрессионной кривой, построенные теоретически, показаны пунктиром.

Применяя описанные выше построения, можно произвести выравнивание — корректирование участков опытной компрессионной кривой, приведя ее в соответствие с теоретическим уравнением.

## ТЕМА ВОСЬМАЯ

# СОПРОТИВЛЕНИЕ ГРУНТОВ СДВИГУ

Сопротивление грунтов сдвигу обусловливается двумя причинами: трением и сцеплением.

Определение коэффициента трения и сцепления производится различными способами. Среди существующих способов можно выделить следующие три основные группы:

1. Способы определения сопротивления сдвига по одной или двум заранее фиксированным плоскостям.

2. Способы определения сопротивления сдвига по плоскостям максимальных тангенциальных напряжений.

3. Способ определения сопротивления сдвига по углу естественного откоса.

Способы первой группы могут быть в свою очередь разделены на две подгруппы:

а) способы поперечного сдвига с конечной плоскостью сдвига;

б) способы кольцевого сдвига с бесконечной (замкнутой) плоскостью сдвига.

Способы первой подгруппы получили наибольшее распространение в практике. Ниже будет дано их более подробное описание.

Определение сопротивления сдвига методом кольцевого среза осуществляется в приборе Покровского, с помощью особого штампа, имеющего кольцевой жолоб треугольного сечения.

Штамп вдавливается в испытуемый грунт до полного заполнения жолoba грунтом, а затем приводится во вращение около своей вертикальной оси. При вращении штамп срезает грунт по кольцевой поверхности.

Расчет коэффициента трения производится по специальной формуле.

Более подробное описание этого способа дано в работах Покровского [23], Попова [24], Гуменского [4] и др.

Способы второй группы основаны на опытах по раздавливанию образцов грунта (по методам Герсеванова, Давиденкова и др.).

Эти способы не нашли пока еще значительного распространения в практике из-за недоработанности методики.

Описание способов раздавливания можно найти в работах Герсеванова [13], Иванова и Охотина [5] и др.

Способ определения сопротивления сдвигу по величине угла естественного откоса применяется только для приближенного определения величины внутреннего трения сыпучих грунтов — чистых песков.

Лабораторные испытания грунтов для определения трения и сцепления способом поперечного сдвига Терцаги производят путем среза нескольких образцов, предварительно уплотненных разными вертикальными нагрузками. Срез каждого образца производится при вертикальной нагрузке, равной той, под которой он предварительно уплотнялся.

Каждый срез дает возможность получить точку для построения графика, по оси абсцисс которого откладывают вертикальные нагрузки, а по оси ординат — соответствующие им сдвигающие усилия (фиг. 42).

В результате получают прямую, характеризующуюся уравнением Кулона:

$$T = P \cdot f + C_0.$$

Согласно этому уравнению, суммарное сопротивление сдвигу  $T$  равно нормальному давлению на грунт  $P$ , умноженному на коэффициент трения  $f$  плюс некоторая постоянная  $C_0$ , характеризующая сцепление в грунте.

В уравнении Кулона

$$f = \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $\varphi$  — угол внутреннего трения.

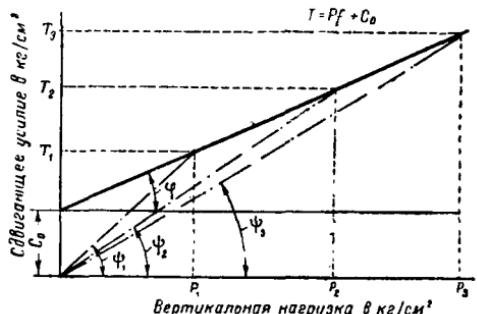
Если обе части равенства разделить на  $P$  и обозначить величину  $\frac{T}{P}$  через  $\operatorname{tg} \psi$ , получим

$$\operatorname{tg} \psi = \operatorname{tg} \varphi + c_0.$$

Величину  $\operatorname{tg} \varphi$  принято называть коэффициентом сдвига (среза).

Наличие величины  $C_0$  показывает, что даже при отсутствии нормального давления требуется приложить какое-то усилие  $T_0 = C_0$  для производства сдвига. Силу  $C_0$ , сопротивляющуюся сдвигу при отсутствии внешней нагрузки, называют сцеплением.

В несвязанных бесструктурных грунтах силы сцепления ничтожны по величине и практически равны нулю. Поэтому для них зависимость между сдвигающими и нормальными напряже-



Фиг. 42. График зависимости сопротивления сдвигу от вертикальной нагрузки.

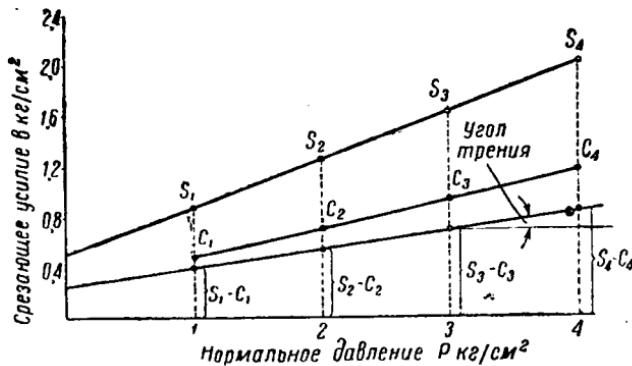
ниями при сдвиге может быть выражена более простым уравнением

$$T = P \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

Графически эта зависимость изображается прямой линией, пересекающей начало координат.

В связных грунтах сцепление достигает значительных размеров и изменяется в зависимости от влажности и структуры грунта.

Работами последних лет установлено, что величина трения также изменяется в зависимости от влажности, соответствующей степени уплотнения грунта. Поэтому определение трения и сцепления по методу Терцаги, в основу которого положен принцип постоянства сцепления, следует признать несовершенным.



Фиг. 43. График для определения трения и сцепления по Саваренскому.

Саваренским [26] предложен иной метод определения трения и сцепления. По этому методу предварительному уплотнению под водой подвергается 8—10 образцов. Каждая пара образцов уплотняется одинаковой для данной пары, но различной для различных пар нагрузкой. Из двух образцов, уплотненных одинаковым давлением, один срезается под нагрузкой, равной уплотняющей, а другой — без нагрузки. Предполагается, что первый срез (при наличии вертикальной нагрузки) преодолевает две силы: трение, вызываемое внешней нагрузкой, и сцепление, второй же — только сцепление.

Таким образом срезается 4 или 5 пар образцов. По данным опытов строится график, изображенный на фиг. 43, где по оси абсцисс откладываются вертикальные нагрузки  $P$ , а по оси ординат — срезающие усилия при сдвиге с нагрузкой  $S$  и без нагрузки  $C$ .

Через точки  $S_1, S_2, S_3 \dots S_n$  и  $C_1, C_2, C_3 \dots C_n$  проводятся прямые. Затем для каждой пары образцов находят разность  $S - C$  и наносят соответствующие ей точки на тот же график. Через получен-

ные точки проводится прямая линия, угол наклона которой к оси абсцисс принимается за угол внутреннего трения  $\phi$ . Величина сцепления получается для каждого вертикального давления различная, равная величине срезающего усилия при срезе без нагрузки.

Так как трение и сцепление являются для данного грунта величинами переменными, зависящими в основном от плотности и влажности, определение этих величин в лаборатории, согласно решению Совещания по исследованию грунтов 1940 г., следует производить при тех же условиях в отношении сохранности его структуры, уплотнения и степени влажности, какие будут в действительности при работе грунта под сооружением или в самом сооружении.

Ниже (см. задание 24) дано описание метода определения трения и сцепления, отражающий высказанные выше соображения и принятого Совещанием по исследованию грунтов 1940 г. в качестве стандартного.

Для лабораторного исследования трения и сцепления по способу поперечного сдвига существует целая серия приборов.

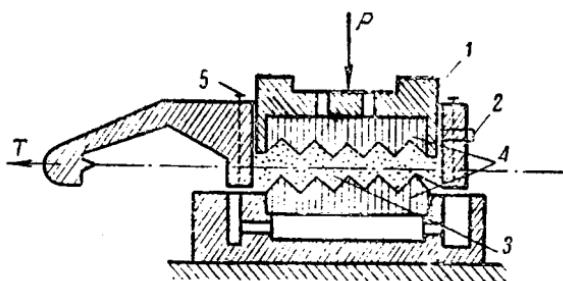
Все приборы устроены по так называемому принципу двух ящиков. Среди них различают одноплоскостные и двухплоскостные приборы, в зависимости от того, сколько фиксированных плоскостей грунта участвует в сдвиге.

К этой группе приборов относятся приборы Терцаги, ВСЕГИГЕО, Пузыревского и др.

Прибор Терцаги, схема которого изображена на фиг. 44, служит, главным образом, для определения внутреннего трения сыпучих грунтов. Описание прибора и порядка работы с ним дано в работе Паталеева и др. [21].

Прибор ВСЕГИГЕО (фиг. 45) устроен по принципу одноплоскостного среза и служит для определения сопротивления сдвигу связных грунтов.

Прибор состоит из панели 1 с неподвижно прикрепленными к ней кронштейнами 2. На кронштейны устанавливается пластина 3, в которую вставляется верхняя половина обоймы 4, заключающей в себе образец грунта. Нижняя половина обоймы 5 плотно вставляется в фигурийный вкладыш 6 с сетчатым дном. Обойма с вкладышем помещается в ванне 7. Ванна стоит на свободно насыпанных в выточку панели шариках и движется по



Фиг. 44. Схема прибора Терцаги для определения внутреннего трения сыпучих грунтов.

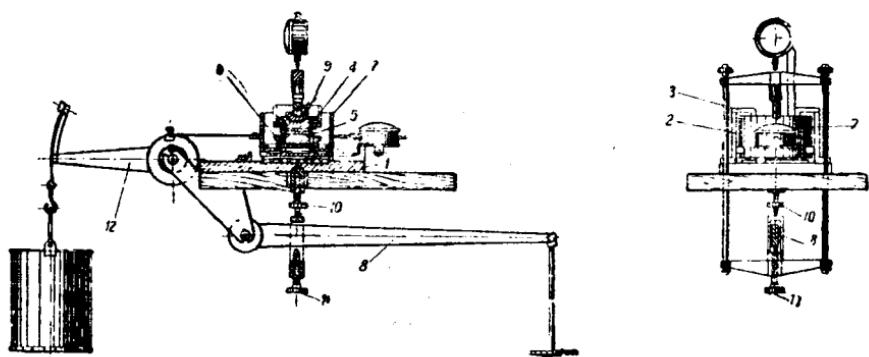
1—верхний вкладыш; 2—зажимные винты; 3—образец грунта; 4—пористые камни; 5—отжимные винты.

ним вместе с нижней половиной обоймы. При этом верхняя половина обоймы 4 с заключенным в ней грунтом остается неподвижной, в результате чего происходит срез. Рычаг 8 служит для передачи вертикального давления на грунт через шарик и вкладыш 9. Для сообщения горизонтального усилия служит рычаг 12.

Подробное описание прибора ВСЕГИНГЕО и порядка работы с ним дано в работе Троицкой [28].

Описание наиболее распространенного прибора Пузыревского приведено ниже.

Следует заметить, что приборов для определения внутреннего сопротивления сдвигу, а также для вычисления на основании этих данных коэффициентов сцепления и трения очень много, но до настоящего времени нет ни одного прибора, который удо-



Фиг. 45. Прибор ВСЕГИНГО для определения сопротивления сдвигу связных грунтов.

влетворял бы всем необходимым требованиям. Поэтому получаемые результаты испытаний на разных приборах часто не сравнимы между собой.

Требования, предъявляемые к приборам для определения силы внутреннего трения, в основном сводятся к следующему:

1. Прибор должен позволять производить исследования с грунтами нарушенной и ненарушенной структуры, так как грунты используются и как основания и как материал для постройки сооружений.

2. Прибор должен позволять точно учитывать все другие виды сопротивления, которые возникают при сдвиге грунта, и раздельно определять эти величины либо устранив их совершенно.

3. Конструкция прибора должна быть такова, чтобы в процессе опыта не появлялись не учитываемые или трудно учитываемые изменения состояния грунта вследствие реактивных сил и сил трения, развивающихся в процессе работы прибора.

4. Конструкция прибора должна обеспечивать плавность в нарастании сдвигающих напряжений и равномерность распределения напряжений в испытуемом грунте.

5. Прибор должен позволять осуществлять необходимую степень насыщения грунта водой.

6. Прибор должен удовлетворять требованиям объективной оценки времени затухания деформаций сдвига.

7. Наконец, крайне желательно, чтобы прибор для производства исследований явлений сдвига в грунтах был комбинированным, т. е. был одновременно прибором и для исследования других свойств грунтов (сжимаемости, фильтрационных свойств и др.).

### Задание 24. Определение сопротивления сдвигу в приборе Пузыревского

#### A. Описание прибора Пузыревского

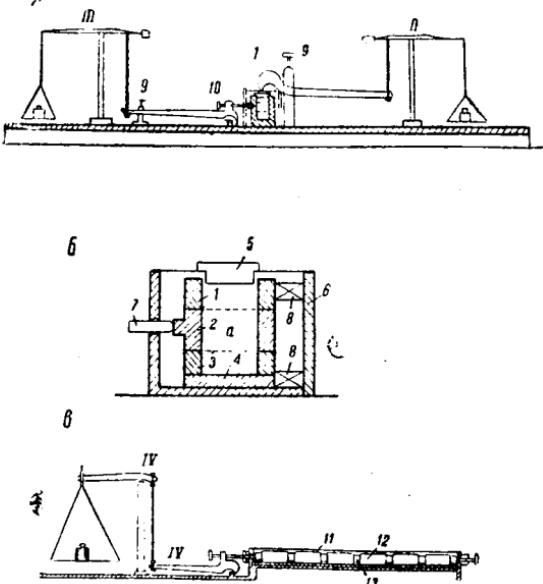
Прибор для испытания грунтов на сдвиг конструкции Пузыревского состоит из трех основных частей: из аппарата для среза I, системы рычагов для создания нормальных давлений на образец II и системы рычагов для создания сдвигающих усилий III (фиг. 46, а).

Все части прибора смонтированы на общем металлическом основании, выполненном из железа коробчатого сечения.

Аппарат для среза (фиг. 46, б) изготавливается из нержавеющего металла и состоит из следующих частей: коробки для испытания грунта на срез a, ванны b с вкладышем 8 и поршнем 5. Коробка для испытания грунта на срез состоит из верхней части 1, средней выдвижной части — срезывателя 2, нижней части 3 и отъемного дна 4.

Дно коробки скрепляется с нижней частью при помощи металлических крючков. Верхняя и нижняя части соединены между собой стяжными болтами.

Средняя часть — срезыватель помещается в коробке свободно, но без зазоров, так что срезыватель может двигаться только в горизонтальном направлении.



Фиг. 46. Прибор Пузыревского для определения сопротивления грунтов сдвигу.

а — общий вид прибора; б — аппарат для среза; в — ванна для предварительного уплотнения образцов.

У верхней, средней и нижней частей коробки имеется круглое отверстие, которое при соединении частей в одно целое образует полость в форме правильного цилиндра. Эта полость предназначена для помещения в ней грунта.

К срезывателю прикреплена специальная планка, которая служит для передачи перемещений срезывателя измерительному прибору.

Измерительный прибор закрепляется в держателе на специальной стойке, заделанной в основание прибора.

Ванна укрепляется на основании прибора. В стенке ванны со стороны действия сдвигающей силы имеется отверстие, в которое через специальный сальник проходит шток 7. Шток служит для передачи срезывателю горизонтальных сдвигающих усилий.

Приспособления для создания вертикальных и горизонтальных давлений представляют собой комбинацию неравноплечих рычагов, связанных между собой в системы так, что каждая из них дает выигрыш в силе в 20 раз.

Стопорный винт 9 служит для закрепления системы рычагов в определенном положении.

Нажимной винт 10 служит для передачи горизонтальных усилий, развиваемых рычажной системой.

В комплект каждого прибора Пузыревского включаются ванночки (фиг. 46, в), в которых образец грунта, помещенный в воду, подвергается уплотнению под определенной вертикальной нагрузкой.

Прибор для предварительного уплотнения состоит из металлической продолговатой ванночки 11, системы рычагов для передачи сжимающих усилий IV и патронов 12, в которых помещается уплотняемый грунт. Патроны представляют собой особые цилиндрические трубы, имеющие внутренний диаметр, равный диаметру цилиндрической полости аппарата для среза. Патроны закрываются с обоих концов металлическими пробками-поршнями 13.

На металлических пробках по их высоте устроены желобки для пропуска воды.

В ванне патроны располагаются горизонтально (так, как это показано на фиг. 46, в), чтобы одна и та же пробка закрывала отверстия двух соседних патронов.

При таком устройстве давление, действующее на грунт, будет одинаково во всех патронах, помещенных в одной ванне.

Иногда вместо горизонтальных ванн с шестью патронами употребляются индивидуальные патроны, помещенные в вертикальные ванночки, смонтированные на одном общем основании.

Несмотря на значительное распространение, которое получил прибор Пузыревского в практике инженерно-геологических работ, он страдает весьма существенными недостатками. Из наиболее существенных недостатков следует отметить следующие:

а) возможность заклинивания частиц грунта между трущимися частями прибора, что сильно искаляет сопротивление сдвигу в сторону его увеличения;

б) значительное трение грунта о стенки прибора вследствие большой величины соотношения высоты образца и его диаметра; вертикальное давление не полностью передается поэтому на плоскость сдвига;

в) возникновение трения грунта о металлы в процессе опыта.

## Б. Порядок работы

### а) Подготовка образца

1. Из исследуемого грунта взять в патроны монолитные образцы. Отбор образцов производится путем вдавливания патрона в грунт с одновременной зачисткой грунта ножом вокруг режущего края пробоотборителя.

Для уменьшения трения грунта по стенкам внутреннюю поверхность патронов полезно предварительно слегка смазать вазелином.

При испытании грунтов с нарушенной структурой подготовка образцов производится следующим образом: грунт в количестве 3—5 кг высушивают до воздушно-сухого состояния и после размельчения в ступке пестиком, обтянутым резиной, просеивают через сито 1 мм. Отсеянный от крупных включений материал замешивают с водой до состояния, близкого к верхнему пределу пластичности, а затем заполняют этой массой патроны.

Для определения коэффициентов трения и сцепления необходимо заготовить не менее шести образцов.

2. Зачистить торцевые поверхности образцов. Грунт предварительно покрыть кружками смоченной фильтровальной бумаги. Одновременно с этим необходимо взять пробы для определения объемного веса и влажности образцов.

3. Собранные патроны поместить в ванну и приложить к ним уплотняющую нагрузку  $N$  (например 6 кг/см<sup>2</sup>). Вес груза, который следует положить на подвеску рычагов для передачи заданной уплотняющей нагрузки, определить по формуле

$$Q = \frac{N \cdot F}{L},$$

где  $Q$  — вес груза на подвеске рычага (в кг);

$N$  — заданная уплотняющая нагрузка (в кг/см<sup>2</sup>);

$F$  — площадь сечения образца (в см<sup>2</sup>);

$L$  — передаточное число системы рычагов.

Практически величина уплотняющей нагрузки  $N$  устанавливается в соответствии с тем давлением, которое будет в действительности при работе грунта под сооружением или в теле сооружения. Чтобы избежать выдавливания грунта из патронов, нагрузку следует увеличивать небольшими ступенями и постепенно довести ее до необходимой.

4. После приложения нагрузки в ванну налить воды с таким расчетом, чтобы покрыть поверхность всех патронов.

Если грунт взят выше уровня грунтовых вод, уплотнение может производиться при естественной влажности. В этом случае для предохранения образцов от высыхания нужно закрыть их со всех сторон влажной ватой или тряпками.

5. Уплотнение производить до прекращения процесса сжатия грунта.

6. После того как уплотнение образцов закончено, слить воду, снять нагрузку и приступить к срезу образцов в приборе Пузыревского.

### *б) Производство среза*

7. Из патрона, в котором производилось предварительное уплотнение грунта, образец перевести в полость испытательной коробки. Для этого патрон поставить над коробкой так, чтобы его внутренняя поверхность составляла продолжение цилиндрической полости коробки. Перемещение образца произвести плавным нажимом на грунт деревянным шомполом.

При перемещении грунта из патрона в прибор необходимо следить за тем, чтобы средняя часть его — срезыватель 2 не была выведена из своего исходного положения, т. е. чтобы внутренняя полость коробки представляла на всем своем протяжении непрерывную цилиндрическую поверхность. Внутренние стенки обоймы предварительно слегка смазать вазелином.

8. На перемещенный в аппарат для среза грунт положить кружок фильтровальной бумагки и вставить поршень 5.

9. Собрать систему рычагов II для создания нормальных напряжений.

10. Подвергнуть образец вертикальному давлению, равному по величине тому, при котором грунт был предварительно уплотнен (в нашем примере 6 кг/см<sup>2</sup>).

Расчет вертикальной нагрузки произвести по формуле

$$Q_p = \frac{P \cdot F - q}{L_p},$$

где  $Q_p$  — вес груза на подвеске рычага (в кг);

$P$  — заданное вертикальное давление (в кг/см<sup>2</sup>);

$F$  — площадь сечения образца в (см<sup>2</sup>);

$q$  — вес поршня прибора (в кг);

$L_p$  — передаточное число системы рычагов II.

11. К планке срезывателя подвести закрепленный на штативе мессур. Последний установить с таким расчетом, чтобы штифт его мог следовать за указательной планкой на всем пути сдвига срезывателя.

12. Один конец штока 7 подвести вплотную к боковой плоскости срезывателя; к другому концу штока подвести нажимной винт 10 нижнего рычага системы III, передающей сдвигающие напряжения.

13. Приступить к срезу. Для этого необходимо дать системе рычагов III необходимую нагрузку.

Загрузку рычага следует производить небольшими ступенями и достаточно медленно, чтобы происходящие в образце деформации не отставали от роста сдвигающих усилий. Рекомендуется в качестве груза применять дробь или воду.

Переходить к следующей ступени загрузки следует после того, как в образце прекратятся деформации сдвига от нагрузки предыдущей ступени. Об этом можно судить по показанию мессура.

14. Увеличение нагрузки необходимо производить до тех пор, пока не наступит непрерывный сдвиг образца.

15. Когда произошел сдвиг, прибор разгрузить, тщательно вынуть все три части срезанного образца и определить его объемный вес и влажность.

16. Определить вес груза на подвеске горизонтально действующих рычагов и рассчитать величину сдвигающего усилия по формуле

$$T = \frac{Q_T \cdot L_T}{2F},$$

где  $T$  — удельное сдвигающее усилие (в  $\text{кг}/\text{см}^2$ );

$Q_T$  — вес груза на горизонтальном рычаге (в  $\text{кг}$ );

$L_T$  — соотношение плеч горизонтально действующих рычагов;

$F$  — площадь сечения образца (в  $\text{см}^2$ ).

17. По окончании опыта коробку прибора тщательно очистить, протереть и смазать полость и все трущиеся плоскости вазелином. После этого можно приступить к новому опыту.

18. Перевести в аппарат для среза новый образец, приложить вертикальную нагрузку  $P_2 < P_1$  ( $4 \text{ кг}/\text{см}^2$ ) и произвести по предыдущему его срез.

19. Третий образец срезать под вертикальной нагрузкой, равной  $P_3 < P_2$  ( $2 \text{ кг}/\text{см}^2$ )<sup>1</sup>.

20. Испытание на сдвиг при каждой вертикальной нагрузке повторить 2—3 раза. При этом необходимо определить объемный вес и влажность образцов до и после опытов.

21. Данные занести в таблицу по ниже помещаемой форме (табл. 39).

П р и м е ч а н и е. Формулы для расчета нагрузок даны для приборов с уравновешенными рычагами. При неуравновешенных рычагах в формулы следует внести соответствующие поправки, согласно паспорту прибора, на котором производятся опыты.

<sup>1</sup> Величины вертикальных нагрузок при срезе определяются заданием, при этом всегда так, чтобы наибольшее значение  $P$  было равно нагрузке, под которой образец уплотнялся, и чтобы последующие нагрузки были меньше. При срезах по способу Саваренского половина образцов, как было сказано, срезается в приборе без всякой вертикальной нагрузки.

## Форма для записи данных определения сопротивления сдвига

Площадь сечения образца (площадь сдвига)  $F = 19,62 \text{ см}^2$ . Вес поршня прибора  $q = 0,235 \text{ кг}$ . Передаточное число системы рычагов для горизонтальных усилий  $L_T = 20$ . Передаточное число системы рычагов для вертикальных нагрузок  $L_P = 20$ ,  $\gamma = 2,66$ ;  $K_{w_0} = 1,0$ .

№ опыта	Уплот- няющая нагрузка, $\text{кг}/\text{см}^2$	Вертикальные нагрузки при сдвиге		Горизонтальные усилия		Влажность, %		Объемный вес		Приведенная пористость		Примечание
		вес груза на подвеске рычага, кг	удельная верти- кальная нагрузка, $\text{кг}/\text{см}^2$	вес груза на подвеске рычага, кг	удельные сдвигающие усилия, $\text{кг}/\text{см}^2$	до опыта	после опыта	до опыта	после опыта	до опыта	после опыта	
		$N$	$Q_p = \frac{P \cdot F - q}{L_p}$	$P$	$Q_T$	$T = \frac{Q_T \cdot L_T}{2F}$	$w_1$	$w_2$	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$
1	6	5,872	6	4,807	2,450	31,48	27,09	1,90	1,96	0,8371	0,7206	$\operatorname{tg} \varphi = 0,321$ ,
2	6	5,872	6	4,632	2,361	29,00	26,96	1,84	1,96	0,8714	0,7171	$\angle \varphi = 17^\circ 48'$ ,
3	6	3,910	4	3,433	1,750	31,70	27,00	1,90	1,96	0,8386	0,7182	$C_0 = 0,475 \text{ кг}/\text{см}^2$
4	6	3,910	4	3,041	1,550	30,81	27,51	1,91	1,96	0,8195	0,7317	Испытание прово- дилось без зама- чивания
5	6	1,948	2	2,111	1,076	32,01	27,36	1,89	1,96	0,8523	0,7278	
6	6	1,948	2	2,258	1,151	31,53	27,64	1,90	1,96	0,8432	0,7352	

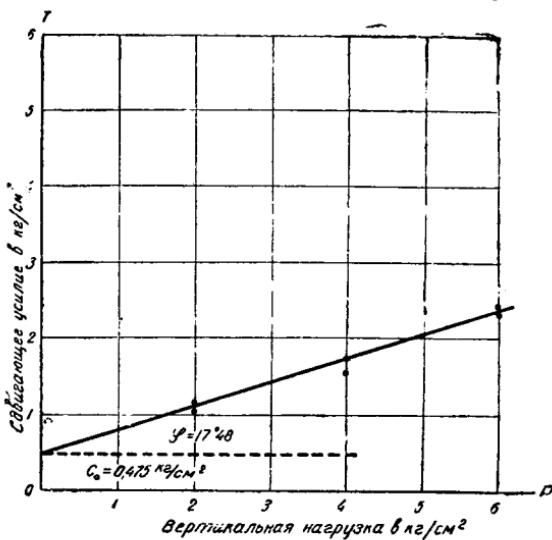
## В. Расчет коэффициентов сдвига, трения и первоначального сцепления

1. Коэффициент сдвига определяется из соотношения между нормальными и горизонтальными давлениями на образец в момент сдвига:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{T}{P},$$

где  $T$  — горизонтальное давление на образец в момент среза;  
 $P$  — соответствующее нормальное давление.

2. Коэффициент внутреннего трения и сцепление в грунте могут быть определены графо-аналитическим способом. Для этого не-



Фиг. 47. График зависимости сопротивления сдвигу от вертикальной нагрузки.

обходимо воспользоваться системой прямоугольных координат и отложить в принятом масштабе по оси абсцисс значения вертикальных давлений в  $\text{кг}/\text{см}^2$ , а по оси ординат — значения соответствующих моменту сдвига горизонтальных усилий. Через полученные точки провести некоторую среднюю прямую линию до пересечения с осью ординат (фиг. 47). Отрезок, отсекаемый прямой линией на оси ординат, выражает величину сцепления в  $\text{кг}/\text{см}^2$ . Тангенс же угла наклона полученной прямой линии к горизонту есть тангенс угла  $\operatorname{tg} \phi$  или коэффициент внутреннего трения при сдвиге.

Пользуясь справочными таблицами, произвести определение угла внутреннего трения,

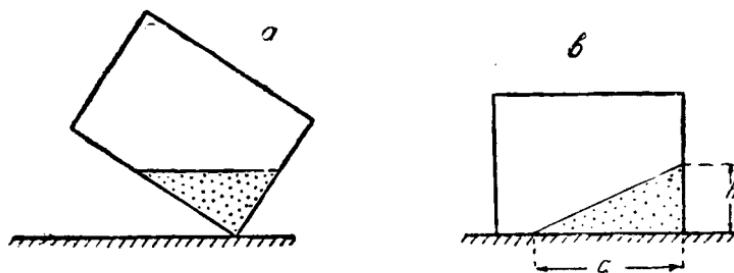
## Задание 25. Определение угла внутреннего трения песков по углу естественного откоса

Для рыхлых сыпучих песков некоторое представление о величине угла внутреннего трения можно получить посредством определения угла естественного откоса, т. е. угла, под которым располагается свободно насыпаемый песок.

В лаборатории угол естественного откоса обычно определяют для двух состояний грунта: а) грунт воздушно-сухой, б) грунт затоплен водой.

### А. Ход определения угла естественного откоса сухой породы

1. В стеклянную прямоугольную банку размером  $60 \times 30 \times 20$  или  $30 \times 20 \times 10$  см, поставленную на ребро (фиг. 48, а), насыпать испытуемый песок так, чтобы верхняя его поверхность



Фиг. 48, а — б. Определение угла естественного откоса песков.

была горизонтальна. Насыпание песка производить через воронку так, чтобы высота падения песка была равна примерно 30 см.

2. Осторожно перевести банку в нормальное положение (фиг. 48, б). При этом испытуемый грунт начнет осыпаться, образуя угол естественного откоса.

3. Замерить катеты образовавшегося угла и определить угол по формуле  
где  $t$  — температура воды при опыте.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{a}.$$

или непосредственно — транспортиром.

4. Опыт повторить несколько раз (не менее 3) и взять среднее значение.

### Б. Ход определения угла естественного откоса песка под водой

1. После засыпки песка в банку, поставленную на ребро, покрыть песок листом бумаги, для того чтобы предохранить его от размывания водой при наливании.

2. Осторожно налить в банку воду.

3. Банку осторожно поставить на дно и медленно вытянуть бумагу.

4. Через некоторое время, необходимое для того, чтобы образовавшийся откос пришел в состояние равновесия, произвести определение угла откоса, как было указано выше.

5. Оставить грунт в банке на 10—12 часов, после чего повторить опыт.

Данные занести в таблицу по следующей форме (табл. 40).

Таблица 40

Форма для записи данных определения угла естественного откоса

Сухой грунт					Под водой					Примечание
№ опыта	$h, см$	$a, см$	$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{a}$	$< \alpha$	№ опыта	$h, см$	$a, см$	$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{a}$	$< \alpha$	
1	9,8 10,0 9,6	17,0 16,9 16,8	0,577 0,591 0,570	30°00' 30°38' 29°41'	1	8,0 7,8 7,8	15,0 14,7 14,7	0,533 0,530 0,530	28°02' 27°51' 27°51'	

## ЛИТЕРАТУРА

### а) Основная

1. Биндеман Н. Н., Способ графического определения коэффициента фильтрации песков по механическому составу и пористости, ОНТИ, 1935.
2. Васильев А. М., Исследование грунтов для инженерных целей, ОНТИ, 1935.
3. Васильев А. М., Упрощенные определения физических и водных свойств грунтов, ГОНТИ, 1939.
4. Гуменский Б. М., Лабораторные методы исследований грунтов в дорожно-строительных целях, изд. Наркомхоза РСФСР, 1938.
5. Иванов Н. Н. и Охотин В. В., Дорожное почвоведение и механика грунтов, Гострансиздат.
6. Каменский Г. Н., Основы динамики подземных вод. Ч. I. Геолразведиздат, 2-е издание, 1943.
7. Коротеев А. П., Спутник гидрогеолога, ОНТИ, 1934.
8. Приклонский В. А., Общее грунтоведение, Геологиздат, 1943.
9. Приклонский В. А. и Коломенский Н. В., Краткий курс общего грунтоведения, Геолиздат, 1943.
10. Справочник по инженерной геологии, под ред. Ф. П. Саваренского, ГОНТИ, М.-Л., 1939.
11. Филатов М. М., Лабораторный практикум по морфологии, физике и механике грунтов, Гострансиздат, М., 1936.

### б) Дополнительная

12. Бурмайстер Д. М., Новый метод определения относительной консистенции грунтов. Материалы I Международного конгресса по механике грунтов, 1936.
13. Герсанов Н. М., Основы динамики грунтовой массы, Госстройиздат, 1933.
14. Гуменский Б. М., Указания к производству лабораторных исследований грунтов для строительных целей. Изд. Ленинградского городского совета депутатов трудящихся, Л., 1940.
15. Иванов Н. Н., Грунтовые дороги, Л., 1931.
16. Иванова М. В., Методы исследования грунтов, М., 1933.
17. Коломенский Н. В., Универсальный прибор для определения коэффициентов фильтрации связанных грунтов. Тр. Геол. ин-та АН СССР, т. IX, изд. АН СССР, М., 1939.
18. Литвинов И. М., Исследование строительных свойств грунтов с нарушенной структурой, ОНТИ, Харьков, 1937.
19. Охотин В. В., Грунтоведение, изд. Военно-транспортной академии Красной Армии, Л., 1940.
20. Паталеев А. В., Боженков С. А. и Бирюков А. А., Механика грунтов, основания и фундаменты. Ч. I. 2-е издание, Трансжелдориздат, М., 1943.

21. Покровский Г. И. и Лаш Ф. Л., Исследование методов определения максимальной и минимальной пористости песков. Вестник Военно-инженерной академии им. Куйбышева № 21, М., 1937.
22. Покровский Г. И. и Федоров И. С., Сопротивление грунтов срезыванию. Сборник ВИМС № 3, 1934.
23. Приклонский В. А., Обработка и практическое использование данных лабораторного исследования грунтов, М., 1943.
24. Попов И. В., Механика грунтов. ОНТИ. М. 1937.
25. Работнов Н. К., Метод графического анализа компрессионных кривых, «Москва-Волгострой» № 2/20, 1936.
26. Саваренский Ф. П., К вопросу определения величины трения и сцепления в связных грунтах. Тр. Геол. ин-та АН СССР, т. IX, ч. 1, изд. АН СССР, М., 1939.
27. Технические условия и нормы проектирования гидroteхнических сооружений. Определение геотехнических характеристик грунта. Стройиздат, Л., 1941.
28. Троицкая М. Н., Определение сопротивления грунтов сдвигу, Госгеолиздат, М., 1941.
29. Файнциммер В. М., Выделение высокодисперсной части грунтов из суспензии с помощью суперцентрофуги Шарпле. Тр. Геол. ин-та АН СССР, вып. 23, М., 1940.
30. Филатов М. М., Основы дорожного грунтоведения, Гострансиздат, М., 1935.
31. Цитович Н. А., Механика грунтов, Стройиздат, Л., 1940.
32. Лалетин Н. В., Исследование грунтов для строительных целей, Стройиздат, 1940.

**НАИМЕНОВАНИЕ И СПОСОБЫ ВЫРАЖЕНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА ПО ПРИКЛОНСКОМУ**  
 (одобрено Свящанием по исследованию грунтов 1940 г.)

Компоненты грунта	Способ выражения											
	весовой (по отношению к весу абсолютно-сухой породы)			по отношению ко всему объему породы			по отношению к объему твердой фазы			по отношению к объему пор		
	отношение	наименование	обозначение	отношение	наименование	обозначение	отношение	наименование	обозначение	отношение	наименование	обозначение
Поры	Вес воды в объеме пор $V_n$	Весовая пористость или полная влажность при данной пористости	$W$	Объем пор $V_n$	Пористость	$n$	Объем пор $V_n$	Приведенная пористость	$\epsilon$	—	—	—
	Вес скелета $G_s$			Объем всей породы $V$			Объем скелета $V_s$					
Вода	Вес воды $G_w$		$w$	Объем воды $V_w$	Объемная влажность	$n_w$	Объем воды $V_w$	Приведенная объемная влажность	$\epsilon_w$	Объем воды $V_w$	Относительная влажность	$K_w$
	Вес скелета $G_s$	Влажность		Объем всей породы $V$			Объем скелета $V_s$			Объем пор $V_n$		
(абсолютная влажность)												
Воздух	Вес воды в объеме воздуха $V_a$	Дефицит насыщения	$w_a$	Объем воздуха $V_a$	Аэриованность	$n_a$	Объем воздуха $V_a$	Приведенная аэрированность	$\epsilon_a$	Объем воздуха $V_a$	Относительная аэрированность	$K_a$
	Вес скелета $G_s$			Объем всей породы $V$			Объем скелета $V_s$			Объем пор $V_n$		

## ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА

№ п/п по лкоду	Услов- ные обоз- значения величин	Размер- ность	Наименование величин	Расчетные формулы	Значения букв в формулах	Примечание
1	$v$	см/сек	Скорость падения частиц в воде по Стоксу	$v = \frac{2}{9} g \frac{\gamma - \gamma_1}{\eta} \left( \frac{d}{2} \right)^2$	$g$ — ускорение силы тяжести $\eta$ — вязкость воды $\gamma_1$ — удельный вес воды $d$ — диаметр частиц	Формула Сто
2	$\delta$	$\text{г}/\text{см}^3$ или $\text{т}/\text{м}^3$	Объемный вес твердой фазы	$\delta = \frac{\Delta}{1 + 0,01 w}$	$w$ — весовая влажность в %	
3	$\delta_u$	То же	Объемный вес грунта под водой	$\delta_u = \frac{\delta(\gamma - 1)}{\gamma}$		
4	,	,	То же	$\delta_u = \frac{(100 - n)(\gamma - 1)}{100}$	$n$ — пористость в %	
5	$n$	%	Пористость	$n = \left( \frac{\gamma - \delta}{\gamma} \right) 100$		
6	,	%	"	$n = \left[ 1 - \frac{\Delta}{\gamma(1 + 0,01 w)} \right] 100$		
7	,	%	"	$n = \left( \frac{\epsilon}{1 + \epsilon} \right) 100$		
8	$\epsilon$	Отвле- ченная	Приведенная пористость (коэффициент пористо- сти)	$\epsilon = \frac{\gamma - \delta}{\delta}$		
9	,	То же	То же	$\epsilon = \frac{\gamma(1 + 0,01 w)}{\Delta} - 1$		

## Продолжение приложения

44

№ по порядку	Условные обозначения величин	Размерность	Наименование величин	Расчетные формулы	Значения букв в формулах	Примечания
10	$\epsilon$	Отвлеченная	Приведенная пористость (коэффициент пористости)	$\epsilon = \frac{W \cdot \gamma}{100}$		Формула 10成立а тс при полной высыпании водой
11	"	То же	То же	$\epsilon = \frac{n}{100 - n}$		
12	$D$	" "	Степень плотности (относительная плотность) песка	$D = \frac{(n_{\max} - n)(100 - n_{\min})}{(n_{\max} - n_{\min})(100 - n)}$		
13	" "	" "	То же	$D = \frac{\epsilon_{\max} - \epsilon}{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}}$		
14	$F$	" "	Уплотняемость песка	$F = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_{\min}(100 - n_{\max})}$		
15	" "	" "	" "	$F = \frac{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}}{\epsilon_{\min}}$		
16	$n_w$	%	Объемная влажность	$n_w = w \cdot \delta$		
17	"	%	" "	$n_w = \left( \frac{\epsilon}{1 + \epsilon} \right) 100$		
18	$W$	%	Полная влажность при данной пористости (весовая пористость)	$W = \frac{100 \epsilon}{\gamma}$		Для некапущих групп полная влажность равна весовой пористости $W = \epsilon$
19	"	%	То же	$W = \frac{n}{\delta}$		

Продолжение приложений

10  
закончен  
и. И. П.

по порядку	Услов- ные обоз- значения величин	Размер- ность	Наименование величин	Расчетные формулы	Значения букв в формулах	Примечан
20	W	%	Полная влажность при данной пористости (весовая пористость)	$W = \frac{100 \varepsilon}{\gamma}$		Для набухающих грунтов W.
21	"	%	То же	$W = \frac{100 \varepsilon}{\delta(1 + \varepsilon)}$		
22	"	%	" "	$W = \left(\frac{1}{\delta} - \frac{1}{\gamma}\right) 100$		
23	"	%	" "	$W = \frac{n}{\gamma(100 - n)}$		
24	$K_w$	Отвле- ченная	Относительная влажность (степень влажности, коэффициент или степень водонасыщенности)	$K_w = \frac{w\gamma(100 - n)}{100 n}$		
25	"	То же	То же	$K_w = \frac{w\gamma}{100 \varepsilon}$		
26	"	" "	" "	$K_w = \frac{(\Delta - \delta) 100}{n}$		
27	"	" "	" "	$K_w = \frac{w\delta}{100 n}$		
28	"	" "	" "	$K_w = \frac{w}{W}$		

Продолжение приложения II

146

№ по порядку	Услов- ные обоз- значения величин	Размер- ность	Наименование величин	Расчетные формулы	Значения букв в формулах	Примечание
29	$M_p$	%	Число пластичности	$M_p = W_f - W_p$	$W_f$ — верхний предел пластичности $W_p$ — нижний предел пластичности	
30	$K_p$	Отвле- ченная	Показатель консистенции	$K_p = \frac{w - w_p}{M_p}$		
31	$\tau$	То же	Температурная поправка по Газену	$\tau = 0,7 + 0,03 t$	$t$ — температура опыта	
32	.	.	Температурная поправка по Пузейлю	$\tau = 1 + 0,0337 t + 0,000221 t^2$	$t$ — температура опыта	
33	$K$	см/сек	Коэффициент фильтрации по формуле Терцаги	$K = \frac{C}{\eta} \left[ \frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{(1 - n)}} \right]^2 d_{ef}^3$	$C$ — эмпирический коэ- фициент, равный 10,48 для гладких зерен и 6,02 — для песка с угловаты- ми зернами $\eta$ — вязкость воды	
34	.	м/сутки	Коэффициент фильтрации по формуле Козени	$K = 4000 \frac{n^3}{(1 - n)^2} d_{ef}^2$	$d_{ef}$ — действующий диа- метр $n$ — пористость	
35	.	*	Коэффициент фильтрации по формуле Цункера	$K = C \left( \frac{n}{1 - n} \right)^2 \frac{1}{U^2}$	$C$ — коэффициент фор- мы зерен $U$ — удельная поверх- ность частиц	

**ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПОРОД**  
 (по Охотину 1940 г.)

Наименование грунта	Содержание частиц, %		
	глинистых $<0,005 \text{ мм}$ *	пылеватых $0,005^*—0,05 \text{ мм}$	песчаных $0,05—2,0 \text{ мм}$
Глина	$>30$	—	—
Суглинок тяжелый	30—20	—	—
Суглинок средний	20—15	—	Больше, чем пылеватых
Суглинок средний пылеватый	20—15	Больше, чем песчаных	—
Суглинок легкий	15—10	—	Больше, чем пылеватых
Суглинок пылеватый	15—10	Больше, чем песчаных	—
Супесь тяжелая	10—6	—	Больше, чем пылеватых. В песчаных преобладают частицы $2—0,25 \text{ мм}$
Супесь мелкозернистая	10—6	—	Больше, чем пылеватых. В песчаных преобладают частицы $0,25—0,05 \text{ мм}$
Супесь тяжелая пылеватая	10—6	Больше, чем песчаных	—
Супесь легкая	6—3	—	Больше, чем пылеватых. В песчаных преобладают частицы $2—0,25 \text{ мм}$
Супесь легкая мелкозернистая	6—3	—	Больше, чем пылеватых. В песчаных преобладают частицы $0,25—0,05 \text{ мм}$
Супесь легкая пылеватая	6—3	Больше, чем песчаных	—
Песок	$<3$	—	Больше, чем пылеватых. В песчаных преобладают частицы $2—0,25 \text{ мм}$
Песок мелкозернистый	$<3$	—	Больше, чем пылеватых. В песчаных преобладают частицы $0,25—0,05 \text{ мм}$

\* При использовании шкалы Стокса за глинистые частицы принимаются частицы  $<0,002 \text{ мм}$ .

## ТАБЛИЦА ДЕСЯТИЧНЫХ ЛОГАРИФМОВ ЧИСЕЛ от 0 до 1000

Логарифмы чисел от 1 до 999 находятся по таблицам сразу. Например,  $\lg 354$  найдем так: характеристика равна числу цифр без единицы, т. е. 2. Мантиссу найдем по первому столбцу (число), где стоит 35, и по столбцу, где стоит 4, т. с. 54900. Итак,

$$\lg 354 = 2,54900.$$

Если число имеет цифру более трех, то сначала нужно выставить характеристику, а затем мантиссу определяют по таблицам для первых трех цифр числа и дополняют ее пропорционально табличной разности. Например, 2543. Характеристика равна 3. Мантисса  $= 40483 + 171 \times \frac{3}{10} = 40534$ . Здесь 171 — табличная разность. Итак,

$$\lg 2543 = 3,40534.$$

Число	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	— ∞	00000	30103	47712	60206	69897	77815	84510	90309	95424
1	00000	04139	07918	11394	14613	17609	20412	23045	25527	27875
2	30103	32222	34242	36173	38021	39794	41497	43136	44716	46240
3	47712	49136	50515	51851	53148	54407	55630	56820	57978	59106
4	60206	61278	62325	63347	64345	65321	66276	67210	68124	69020
5	69897	70757	71600	72428	73239	74036	74819	75587	76343	77085
6	77815	78533	79239	79934	80618	81391	81954	82607	83251	83885
7	84510	85126	85733	86332	86973	87506	88081	88649	89209	89763
8	90309	90849	91381	91908	92428	92942	93450	93952	94448	94939
9	95424	95904	96379	96848	97313	97772	98227	98677	99123	99564
10	00000	00432	00860	01284	01703	02119	02531	02938	03342	03743
11	04139	04532	04922	05308	05690	06076	06440	06819	07188	07555
12	07918	08279	08636	08991	09342	09691	10037	10380	10721	11059
13	11394	11727	12057	12385	12710	13033	13354	13672	13988	14301
14	14613	14922	15229	15534	15536	16137	16435	16732	17026	17319
15	17609	17898	18184	18469	18752	19033	19312	19590	19836	20140
16	20412	20683	20952	21219	21484	21748	22011	22272	22531	22789
17	23045	23300	23553	23805	24055	24304	24551	24797	25042	25285
18	25527	25768	26007	26245	26182	26717	26951	27184	27416	27646
19	27875	28103	28330	28556	28780	29003	29226	29447	29667	29885

## Продолжение приложения IV

Число	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	30103	30320	30535	30750	30963	31175	31387	31597	31806	32015
21	32222	32428	32634	32838	33041	33244	33445	33646	33846	34044
22	34242	34439	34635	34830	35025	35218	35411	35603	35793	35984
23	36173	36361	36549	36736	36922	37107	37291	37475	37658	37840
24	38021	38202	38382	38561	38739	38917	39094	39270	39445	39620
25	39794	39967	40140	40312	40483	40654	40824	40993	41162	41330
26	41497	41664	41830	41996	42100	42325	42488	42651	42813	42975
27	43136	43297	43457	43616	43775	43933	44091	44248	44404	44560
28	44716	44871	45025	45179	45332	45484	45637	45788	45939	46090
29	46240	46389	46538	46687	46835	46982	47129	47276	47422	47567
30	47712	47857	48001	48144	48287	48430	48572	48714	48855	48996
31	49136	49276	49415	49554	49593	49831	49969	50106	50243	50379
32	50515	50651	50786	50920	51055	51188	51322	51455	51587	51720
33	51851	51983	52114	52244	52375	52504	52634	52763	52892	53020
34	53148	53275	53403	53529	53656	53782	53908	54033	54158	54283
35	54407	54531	54654	54777	54900	55023	55145	55267	55388	55509
36	55630	55751	55871	55991	56110	56229	56348	56467	56585	56703
37	56820	56937	57054	57171	57287	57403	57519	57634	57749	57864
38	57978	58092	58206	58320	58433	58546	58659	58771	58883	58995
39	59106	59218	59329	59439	59550	59660	59770	59879	59988	60097
40	60206	60314	60423	60531	60638	60746	60853	60959	61066	61172
41	61278	61384	61490	61595	61700	61805	61909	62014	62118	62221
42	62325	62428	62531	62634	62737	62839	62941	63043	63144	63246
43	63347	63448	63548	63649	63749	63849	63949	64048	64147	64246
44	64345	64444	64542	64640	64738	64836	64933	65031	65128	65225
45	65321	65418	65514	65610	65706	65801	65896	65992	66087	66181
46	66276	66370	66404	66558	66652	66745	66839	66932	67025	67117
47	67210	67302	67394	67486	67578	67669	67761	67852	67943	68034
48	68124	68215	68305	68395	68495	68574	68664	68753	68842	68931
49	69020	69108	69197	69285	69373	69461	69548	69631	69723	69810
50	69897	69984	70070	70157	70243	70329	70415	70501	70586	70672
51	70757	70842	70927	71012	71096	71181	71265	71349	71433	71517
52	71600	71681	71767	71850	71933	72016	72097	72181	72263	72346
53	72428	72509	72591	72673	72751	72835	72916	72997	73078	73159
54	73299	73320	73400	73489	73530	73640	73719	73799	73878	73957
55	74036	74115	74194	74273	74351	74429	74507	74586	74663	74741
56	74819	74896	74974	75051	75128	75205	75282	75358	75435	75511
57	75587	75661	75740	75815	75891	75967	76042	76118	76193	76268
58	76313	76418	76492	76567	76641	76716	76790	76864	76938	77012
59	77085	77159	77232	77305	77379	77452	77525	77597	77670	77743

## Продолжение приложения IV

Число	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
60	77815	77887	77960	78032	78104	78176	78247	78319	78390	78462
61	78533	78604	78675	78746	78817	78888	78958	79029	79099	79169
62	79239	79309	79379	79449	79518	79588	79657	79727	79796	79865
63	79934	80003	80072	80140	80209	80277	80346	80414	80482	80550
64	80618	80686	80754	80821	80889	80956	81023	81090	81158	81224
65	81291	81358	81425	81491	81558	81624	81690	81757	81823	81889
66	81954	82020	82086	82151	82217	82282	82347	82413	82478	82543
67	82607	82672	82737	82802	82866	82930	82995	83059	83123	83187
68	83251	83315	83378	83442	83506	83569	83632	83696	83759	83822
69	83885	83948	84011	84073	84136	84198	84261	84323	84386	84448
70	84510	84572	84634	84696	84757	84819	84880	84942	85003	85065
71	85126	85187	85248	85309	85370	85431	85491	85552	85612	85673
72	85733	85794	85854	85914	85974	86034	86094	86153	86213	86273
73	86332	86392	87451	86510	86570	86629	86688	86747	86806	86364
74	86923	86982	87040	87099	87157	87216	87274	87332	87390	87448
75	87506	87564	87622	87679	87737	87795	87852	87910	87967	88024
76	88081	88438	88195	88252	88309	88366	88423	88480	88536	88593
77	88649	88705	88762	88818	88874	88930	88986	89042	89098	89154
78	89209	89265	89321	89376	89432	89487	89542	89597	89653	89708
79	89763	89818	89873	89927	89982	90037	90091	90146	90200	90255
80	90309	90363	90417	90472	90526	90580	90634	90687	90741	90795
81	90849	90902	90956	91009	91062	91116	91169	91222	91275	91328
82	91381	91434	91487	91540	91593	91645	91698	91751	91803	91855
83	91908	91960	92012	92065	92117	92169	92221	92273	92324	92876
84	92428	92480	92531	92583	92634	92686	92737	92788	92840	92891
85	92942	92993	93044	93095	93146	93197	93247	93298	93349	93399
86	93450	93500	93551	93601	93651	93702	93752	93802	93852	93903
87	93952	94002	94052	94101	94151	94201	94250	94300	94349	94399
88	94448	94498	94547	94596	94645	94694	94743	94792	94841	94890
89	94939	94988	95036	95085	95134	95182	95231	95279	95328	95376
90	95424	95472	95521	95569	95617	95665	95713	95761	95809	95856
91	95904	95952	95999	96047	96095	96142	96190	96237	96284	96332
92	96379	96426	96473	96520	96567	96614	96661	96708	96755	96802
93	96848	96895	96942	96988	97035	97081	97128	97174	97220	97267
94	97313	97359	97405	97451	97497	97543	97589	97635	97681	97727
95	97772	97818	97864	97909	97955	98000	98046	98091	98137	98183
96	98227	98272	98318	98363	98408	98453	98498	98543	98588	98632
97	98677	98722	98767	98811	98856	9890	98945	98989	99034	99078
98	99123	99167	99211	99255	99300	99344	99388	99432	99476	99520
99	99564	99607	99651	99695	99739	99782	99826	99870	99913	99957

## ТАБЛИЦА ТАНГЕНСОВ УГЛА от 0 до 45°

0	'	tg	0	'	tg	0	'	tg
0	0	0,000	16	0	0,287	31	0	0,601
	30	0,009		30	0,296		30	0,613
1	0	0,017	17	0	0,306	32	0	0,625
	30	0,026		30	0,315		30	0,637
2	0	0,035	18	0	0,325	33	0	0,649
	30	0,044		30	0,335		30	0,662
3	0	0,052	19	0	0,344	34	0	0,675
	30	0,061		30	0,354		30	0,687
4	0	0,070	20	0	0,364	35	0	0,700
	30	0,079		30	0,374		30	0,713
5	0	0,087	21	0	0,384	36	0	0,727
	30	0,096		30	0,394		30	0,740
6	0	0,105	22	0	0,404	37	0	0,754
	30	0,114		30	0,414		30	0,767
7	0	0,123	23	0	0,424	38	0	0,781
	30	0,132		30	0,435		30	0,795
8	0	0,141	24	0	0,445	39	0	0,810
	30	0,149		30	0,456		30	0,824
9	0	0,158	25	0	0,466	40	0	0,839
	30	0,167		30	0,477		30	0,854
10	0	0,176	26	0	0,488	41	0	0,869
	30	0,185		30	0,499		30	0,885
11	0	0,194	27	0	0,510	42	0	0,900
	30	0,203		30	0,521		30	0,916
12	0	0,213	28	0	0,532	43	0	0,933
	30	0,222		30	0,543		30	0,949
13	0	0,231	29	0	0,554	44	0	0,966
	30	0,240		30	0,566		30	0,983
14	0	0,249	30	0	0,577	45	0	1,000
	30	0,259		30	0,589			
15	0	0,268						
	30	0,277						

# СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Предисловие . . . . .	3
Принятые в книге условные обозначения главнейших величин . . . . .	4
Тема I. Гранулометрический анализ . . . . .	5
Предварительная подготовка грунтов к гранулометрическому анализу . . . . .	6
Задание 1. Гранулометрический анализ на ситах . . . . .	9
Задание 2. Гранулометрический анализ методом отмучивания . . . . .	10
Задание 3. Гранулометрический анализ по Робинзону . . . . .	16
Задание 4. Гранулометрический анализ ареометрическим методом . . . . .	21
Задание 5. Полевой метод гранулометрического анализа по Рутковскому . . . . .	33
Задание 6. Способы изображения гранулометрического состава . . . . .	37
Тема II. Удельный и объемный вес и пористость . . . . .	41
Задание 7. Удельный вес . . . . .	41
Задание 8. Влажность грунтов . . . . .	43
Задание 9. Объемный вес . . . . .	45
Задание 10. Пористость . . . . .	52
Задание 11. Степень плотности и степень влажности . . . . .	56
Тема III. Консистенция глинистых грунтов . . . . .	59
Задание 12. Определение пластичности и консистенции грунтов . . . . .	59
Задание 13. Набухание . . . . .	68
Задание 14. Размокание . . . . .	71
Тема IV. Влагоемкость и водоотдача . . . . .	73
Задание 15. Определение влагоемкости и водоотдачи . . . . .	74
Тема V. Капиллярные свойства грунтов . . . . .	79
Задание 16. Определение капиллярных свойств грунтов . . . . .	80
Тема VI. Водопроницаемость грунтов . . . . .	83
Задание 17. Определение коэффициента фильтрации в приборе Тима . . . . .	84
Задание 18. Определение коэффициента фильтрации в трубке Каменского . . . . .	89
Задание 19. Определение коэффициента фильтрации в трубке СПЕЦГЕО . . . . .	94
Задание 20. Определение коэффициента фильтрации по эмпирическим формулам . . . . .	96
Тема VII. Сжимаемость . . . . .	104
Задание 21. Построение компрессионной кривой . . . . .	109
Задание 22. Косвенное определение коэффициента фильтрации по данным опыта на сжатие . . . . .	120
Задание 23. Графический способ проверки компрессионных кривых по методу Работнова . . . . .	123
Тема VIII. Сопротивление грунтов сдвигу . . . . .	126
Задание 24. Определение сопротивления сдвигу в приборе Пузырьского . . . . .	131
Задание 25. Определение угла внутреннего трения песков по углу естественного откоса . . . . .	138
Литература . . . . .	140
Приложения . . . . .	
I. Наименование и способы выражения основных характеристик грунта по Приклонскому . . . . .	142
II. Основные формулы для расчета характеристик грунта . . . . .	143
III. Гранулометрическая классификация пород . . . . .	147
IV. Таблица десятичных логарифмов чисел от 0 до 1000 . . . . .	148
V. Таблица тангенсов угла от 0 до 45° . . . . .	151

ВОЛОГОДСКАЯ

ГИМНАЗИЯ

Ф. А. БИБИКОВА